



Universidad
del País Vasco

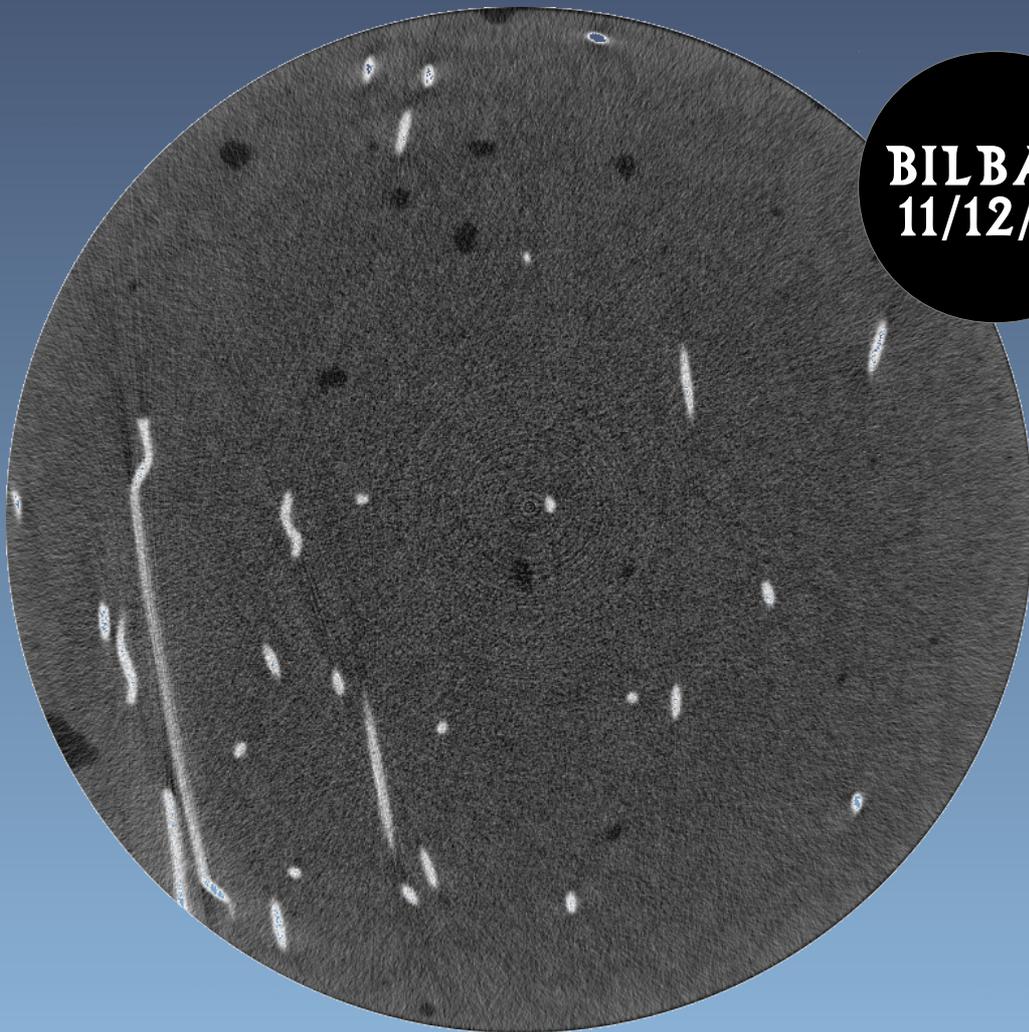
Euskal Herriko
Unibertsitatea



Ingeniaritza Goi Eskola Teknikoa
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Bilbao

ERRESISTENTZIA MODERATUKO OHIKO APLIKAZIOETAN ALTZAIRU ZUNTZEZ INDARTURIKO HORMIGOI AUTOTRINKOTZAILEAREN ERABILERAREN OPTIMIZAZIOA

(Optimización del Uso de Hormigones Autocompactantes Reforzados con
Fibras de Acero en Aplicaciones Convencionales de Resistencias Moderadas)



BILBAO
11/12/13

DOKTORE TESIA / TESIS DOCTORAL

EGILEA / AUTOR: **AIMAR ORBE MATEO**

ZUZENDARIAK / DIRECTORES: **RAMÓN LOSADA RODRÍGUEZ**
EDUARDO ROJÍ CHANDRO

Tesis Doctoral

**ERRESISTENTZIA MODERATUKO OHIKO
APLIKAZIOETAN ALTZAIRU ZUNTZEZ
INDARTURIKO HORMIGOI
AUTOTRINKOTZAILEAREN
ERABILERAREN OPTIMIZAZIOA**

(Optimización del uso de Hormigones Autocompactantes Reforzados con
Fibras de Acero en Aplicaciones Convencionales de Resistencias Moderadas)

Presentada por
Aimar Orbe Mateo

Para la obtención del grado de
Doctor Ingeniero Industrial

por la
**Universidad del País Vasco /
Euskal Herriko Unibertsitateko**
en el
Departamento de Ingeniería Mecánica

Dirigido por:
Dr. D. Ramon Losada Rodríguez
Dr. D. Eduardo Rojí Chandro

Bilbao, Octubre de 2013

Nire hiru neskei,
tesi honek lapurtu didan denboragatik

Hizkuntza xaboiaren alderantzizkoa da:
zenbat eta gehiago erabili xaboa,
orduan eta urrituago eta xahutuago;
hitzak, ordea, alderantziz,
zenbat eta erabiliago orduan eta aberatsago.

Abdelfattah Kilito

No limits, Jonathan? he thought, and he smiled.
His race to learn had begun.

Jonathan Livingstone Seagull
Richard Bach

Resumen

El objetivo de la presente tesis doctoral, se centra en plantear las posibilidades estructurales de fibras cortas de acero como refuerzo de la matriz de hormigón, habitualmente denominado HRFA, junto con la posibilidad de proporcionarle propiedades autocompactantes, que mejoren ciertos aspectos del material, formando el denominado Hormigón Autocompactante Reforzado con Fibras de Acero (HACRFA), en determinadas condiciones, gracias a las propiedades y características que se han atestiguado en este documento.

Para tal fin y a diferencia de la mayoría de las experiencias anteriores que conocemos, se construye y analiza un tramo de muro de gran envergadura (3 metros de alto y 6 metros de largo). Este planteamiento permite estudiar la disposición de las fibras de acero dentro de un elemento estructural de gran tamaño y ejecutado en condiciones reales de obra, para determinar el comportamiento del material teniendo en cuenta todos los condicionantes posibles, algunos de los cuales no están presentes en las investigaciones de laboratorio.

La exhaustiva caracterización del material que compone la estructura, conlleva la división del muro en 380 probetas de diversos tamaños que se someten a prometedores ensayos no destructivos y a los habituales ensayos destructivos. Las correlaciones establecidas entre ambos campos, posibilitan la determinación de aspectos resistentes de forma indirecta y sin dañar el material, estableciendo nuevas vías para un interesante control de calidad sobre la propia estructura.

Para complementar el análisis a posteriori, se establece una metodología para determinar de manera previa a la ejecución de los trabajos la orientación de las fibras dentro de la masa de hormigón. Las simulaciones realizadas por medio de la Dinámica Computacional de Fluídos, permiten además establecer una serie de estimaciones de las resistencias residuales del material a partir de la orientación de las fibras prevista, detectando a priori puntos débiles o inadecuados procesos de hormigonado.

Como colofón se realiza una comparativa económica y sostenibilidad medioambiental entre la aplicación a depósitos de contención cilíndricos propuesta, ejecutada por un lado mediante un hormigón convencional y el HACRFA por el otro. Cada sistema presenta sus ventajas y desventajas pero se concluye que el HACRFA puede resultar igual o más económico y sostenible, que un diseño estructural convencional.

Estos trabajos se enmarcan dentro de las investigaciones desarrolladas por el Área de Conocimiento de Ingeniería de la Construcción adscrito al Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad del País Vasco / Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU).

Aimar Orbe
Ingeniero Industrial
Bilbao, Octubre de 2013.

Abstract

The aim of this Doctoral Thesis, focuses on the structural possibilities of short steel fibres as reinforcement of the concrete matrices, commonly referred as SFRC, along with the ability to provide self-compacting properties, which improve certain aspects of the material, forming the called Steel Fibre Reinforced Self Compacting Concrete (SFRSCC), under certain conditions, thanks to the properties and features that have been described in this document.

Unlike most of the previous experiences we know, a large wall section (6 metres-high and 3 metres-long) is cast and analysed. This approach allows to study the orientation of the steel fibres within the large structural element, cast in real on-site conditions, to determine the behaviour of the material taking into account all possible conditionings, some of which are not present on laboratory researches.

The exhaustive characterization of the material that composes the structure requires extracting 380 specimens of different sizes from the wall, which undergo promising non-destructive tests and more common destructive ones. The correlations established between both fields, allow to determine strength issues indirectly and without damaging the material, establishing new interesting avenues for developing quality control methods on the structure itself.

To complement the analysis, a methodology to determine the fibre orientation within the concrete matrix prior to the casting is established. Computational Fluid Dynamics simulations allow also the establishment of a set of estimations regarding the residual strength of the material, from the predicted fibre orientation, detecting weaknesses or inadequate casting processes.

In the culmination, a economical and environmental sustainability comparative study is performed, for the proposed retaining cylindrical tank, designed with conventional reinforced concrete on one hand and the SFRSCC on the other. Each system has its own advantages and disadvantages, but SRFSCC can be equal or even, more economical and sustainable than a conventional structure design.

This work has been carried out within the research activities of the Construction Engineering knowledge area attached to the Mechanical Engineering Department of the University of the Basque Country (UPV/EHU).

Aimar Orbe
Industrial Engineer
Bilbao, October 2013

Agradecimientos

Quisiera agradecer primeramente a los directores de la presente Tesis Doctoral, Ramón y Eduardo, por la ayuda y paciencia que me han mostrado durante este largo periodo de trabajo. Me habéis conducido correctamente alentándome cuando más lo necesitaba y frenándome cuando me desbocaba.

También quiero expresar mi gratitud, mencionándolos por orden de cercanía: a Jesús, por estar siempre dispuesto a echarme una mano (o dos, o tres, o las que hagan falta); a Tomás, por ser un consejero inestimable; a Mikel y Fran por crear una burbuja de distensión y humor en medio del ajetreo cotidiano; a Raúl por mancharse conmigo con el polvo de los cientos de probetas que he manejado, al resto de mis compañeros de trabajo en el Departamento de Ingeniería Mecánica (Aitor, Unai, Mikel, Yokasta, Pedro, Ciprian, Gheorghe, etc.), del Departamento de Ingeniería de Comunicaciones (Amaia, Iván y Álvaro que han contribuido con un estudio paralelo de las señales atenuadas por el HACRFA) y, en general, de la ETSI de Bilbao.

Así mismo, aprecio la colaboración de David, Leire, Josu, Pello, Jesús, Bengo y demás profesionales de Tecnalia, por el apoyo técnico prestado, además de ser excelentes compañeros.

De igual manera, debo agradecer a los colegas de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Antonio, Albert, Pau, Ana y Josep María, por haberme dado ese primer empujón, los conocimientos iniciales y herramientas para proceder con esta ardua labor.

No puedo dejar de mencionar a José Antonio Hurtado y Santiago Beceiro, excelentes profesionales de Financiera y Minera (Italcementi Group), así como a Javier Álamo de ArcelorMittal (Wire-Solutions), por la ayuda técnica y material prestada. Al mismo tiempo, quiero agradecer la amabilidad e interés de Carlos García Marcos y Marcos Gregorio del Consorcio de Aguas Bilbao-Bizkaia.

El estudio tomográfico ha resultado posible gracias a la colaboración de Juan Manuel Manso y Pedro Miguel Bravo en representación de la Universidad de Burgos (UBU), así como de la empresa TAC 64 S.L. a los que estoy muy agradecido.

El análisis mediante herramientas de Dinámica Computacional de Fluidos (CFD), no hubiese sido posible sin la inestimable ayuda de Daniel Fuster y Pie-

re Yves Lagréé (Institut Jean Le Rond D'Alembert UPMC), Stephan Popinet (NIWA) y, en general, de la comunidad de desarrolladores del programa Gerris.

También debo agradecer el esfuerzo de los desarrolladores de los programas de código abierto 3Dslicer, Meshlab, Salomé, LibreOffice, Texmaker, etc. por proporcionar herramientas que han servido para desarrollar la presente investigación.

Por último, parte de esta investigación ha sido financiada por los proyectos MIVES IV ref: BIA 2010-20789-C04-04 otorgado por el Ministerio de Ciencia e Innovación y BIRGAITEK 7-12-TK-2009-10 de la Diputación Foral de Bizkaia, así como agradecer al Grupo de Investigación IT781-13 financiado por el Gobierno Vasco, por lo que el autor de la presente Tesis Doctoral muestra su más profundo agradecimiento a dichas instituciones.

No puedo pasar sin agradecer a mi familia y amigos el apoyo prestado, pero sin embargo, todo esto no hubiese sido posible sin las sonrisas que cada noche me esperaban en casa.

Indice General

| | |
|-----------------|-----|
| Resumen | III |
| Abstract | VII |
| Agradecimientos | XI |
| Indice General | XV |

| | | |
|----------|---|----------|
| I | Antecedentes | 1 |
| 1 | Introducción | 3 |
| 1.1. | Ámbito de la investigación | 3 |
| 1.2. | Objetivos de la investigación | 5 |
| 1.3. | Metodología y procedimiento | 5 |
| 1.4. | Estructura del documento | 6 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| II | Estudios preliminares | 9 |
| 2 | Estado del Arte | 11 |
| 2.1. | Introducción | 11 |
| 2.2. | Características del HRFA | 12 |
| 2.2.1. | Tipos de fibras | 14 |
| 2.2.2. | Propiedades mecánicas del HRFA | 15 |
| 2.2.3. | Modelos constitutivos | 23 |
| 2.2.4. | Control de calidad | 26 |
| 2.3. | Características del HAC | 30 |
| 2.3.1. | Métodos de diseño | 31 |
| 2.3.2. | Reología del HAC | 33 |
| 2.3.3. | Requisitos en estado fresco | 34 |
| 2.4. | Dinámica de fluidos computacional | 36 |
| 2.4.1. | Fluidos no Newtonianos | 38 |
| 2.5. | Aplicaciones estructurales | 39 |
| 2.5.1. | Fabricación y puesta en obra | 40 |
| 2.6. | Conclusiones finales | 41 |

| | | |
|------------|--|-----------|
| III | Campaña experimental en laboratorio | 45 |
| 3 | Selección del HACRFA | 47 |
| 3.1. | Introducción | 47 |
| 3.2. | Elección del tipo de fibra | 47 |
| 3.2.1. | Configuración y procedimiento | 49 |
| 3.2.2. | Resultados de arrancamiento | 50 |
| 3.3. | Formulación del hormigón | 51 |
| 3.3.1. | Determinación de la pasta | 53 |
| 3.3.2. | Optimización del esqueleto granular | 54 |
| 3.3.3. | Determinación de aditivos | 55 |
| 3.3.4. | Procedimiento de mezcla | 57 |
| 3.3.5. | Validación de resultados | 57 |
| 3.4. | Consideraciones finales | 58 |
| <hr/> | | |
| IV | Campaña experimental a escala real | 61 |
| 4 | Ejecución del elemento estructural | 63 |
| 4.1. | Introducción | 63 |
| 4.2. | Extrapolación a la fabricación en planta | 63 |
| 4.2.1. | Control de humedad | 64 |
| 4.2.2. | Procedimiento y ciclos de amasado | 64 |
| 4.3. | Preparación del muro | 65 |
| 4.3.1. | Encofrado | 66 |
| 4.3.2. | Procedimiento de hormigonado | 67 |
| 4.3.3. | Proceso de curado | 68 |
| 4.4. | Ensayos sobre el elemento estructural | 68 |
| 4.4.1. | Análisis Visual | 69 |
| 4.4.2. | Impulsos ultrasónicos | 70 |
| 4.5. | Selección de probetas y ensayos | 71 |
| 4.5.1. | Ensayos a realizar | 71 |
| 4.5.2. | Tamaño de probetas | 71 |
| 4.5.3. | Esquema de corte del muro | 72 |
| 4.6. | Consideraciones finales | 72 |
| 5 | Ensayos no destructivos (END) | 77 |
| 5.1. | Introducción | 77 |
| 5.2. | Velocidad de impulsos ultrasónicos | 77 |
| 5.2.1. | Procedimiento del ensayo | 78 |
| 5.2.2. | Resultados de las mediciones | 80 |
| 5.3. | Métodos estereológicos | 80 |
| 5.3.1. | Análisis de las caras de corte | 83 |
| 5.3.2. | Estimación del factor de orientación | 83 |
| 5.4. | Métodos magnéticos | 84 |
| 5.4.1. | Configuración del ensayo | 85 |
| 5.4.2. | Análisis de las probetas cúbicas | 85 |
| 5.4.3. | Análisis de las probetas prismáticas | 92 |
| 5.4.4. | Estimación de la densidad de fibras | 94 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 5.4.5. | Estimación del factor de orientación | 95 |
| 5.5. | Tomografía axial computerizada | 97 |
| 5.5.1. | Procedimiento del estudio | 98 |
| 5.5.2. | Resultados en probetas pequeñas | 98 |
| 5.5.3. | Resultados en probetas grandes | 99 |
| 5.5.4. | Estimación de la densidad de fibras | 99 |
| 5.5.5. | Correlación con ensayos magnéticos | 101 |
| 5.6. | Atenuación de señales | 103 |
| 5.7. | Determinación de la permeabilidad | 104 |
| 5.7.1. | Procedimiento del ensayo | 105 |
| 5.7.2. | Resultados de penetración | 105 |
| 5.8. | Consideraciones finales | 106 |
| 6 | Ensayos destructivos (ED) | 107 |
| 6.1. | Introducción | 107 |
| 6.2. | Ensayo de compresión | 107 |
| 6.2.1. | Ubicación de las probetas | 108 |
| 6.2.2. | Resultados de compresión | 108 |
| 6.3. | Ensayo Barcelona | 110 |
| 6.3.1. | Configuración del ensayo | 110 |
| 6.3.2. | Ubicación de las probetas | 111 |
| 6.3.3. | Resultados del ensayo Barcelona | 112 |
| 6.4. | Ensayo Brasileño | 117 |
| 6.4.1. | Configuración del ensayo | 117 |
| 6.4.2. | Resultados del ensayo brasileño | 118 |
| 6.5. | Ensayo a cortante | 118 |
| 6.5.1. | Configuración del ensayo | 118 |
| 6.5.2. | Ubicación de las probetas | 118 |
| 6.5.3. | Resultados del ensayo a cortante | 119 |
| 6.6. | Ensayo a flexotracción | 120 |
| 6.6.1. | Configuración del ensayo | 120 |
| 6.6.2. | Ubicación de las probetas | 121 |
| 6.6.3. | Resultados del ensayo a flexotracción | 121 |
| 6.7. | Consideraciones finales | 139 |
| V | Predicción de la orientación | 141 |
| 7 | Simulación de hormigonado mediante CFD | 143 |
| 7.1. | Introducción | 143 |
| 7.2. | Resolución de ecuaciones de Navier-Stokes | 143 |
| 7.2.1. | Parámetros reológicos | 144 |
| 7.2.2. | Modelo completo | 151 |
| 7.3. | Resultados de la simulación | 154 |
| 7.3.1. | Contrastación experimental | 155 |
| 7.3.2. | Predicción de resistencias | 157 |
| 7.4. | Predicción de la ley constitutiva del material | 161 |
| 7.5. | Consideraciones finales | 162 |

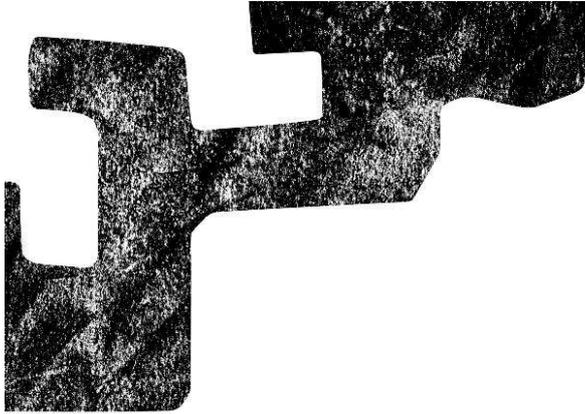
| | | |
|------------------|--|------------|
| VI | Aplicación a casos prácticos | 165 |
| 8 | Depósitos circulares de contención | 167 |
| 8.1. | Introducción | 167 |
| 8.2. | Ejemplos de la aplicación | 168 |
| 8.2.1. | Dimensiones, armados y materiales | 170 |
| 8.3. | Caso de estudio | 173 |
| 8.3.1. | Coste del producto | 176 |
| 8.3.2. | Reducción de plazos | 179 |
| 8.4. | Índice de sostenibilidad | 180 |
| 8.4.1. | Criterio medioambiental de optimización del cemento. | 182 |
| 8.4.2. | Criterio medioambiental de optimización de los áridos. | 183 |
| 8.4.3. | Criterio medioambiental de optimización del agua de amasado. | 185 |
| 8.4.4. | Criterio medioambiental de optimización del uso de aditivos. | 186 |
| 8.4.5. | Criterio medioambiental de optimización del armado. | 187 |
| 8.4.6. | Criterio medioambiental de control de los impactos. | 190 |
| 8.4.7. | Criterio medioambiental relativo al plazo de construcción. | 191 |
| 8.4.8. | Criterio medioambiental relativo al control del material. | 193 |
| 8.4.9. | Comparativa entre ambos casos de estudio. | 194 |
| 8.5. | Consideraciones finales | 194 |
| <hr/> | | |
| VII | Conclusiones finales | 197 |
| 9 | Conclusiones y perspectivas futuras | 199 |
| 9.1. | Conclusiones | 199 |
| 9.2. | Nuevas líneas de investigación | 205 |
| <hr/> | | |
| | Referencias | 207 |
| <hr/> | | |
| ApéndiceA | Velocidad de impulsos ultrasónicos | 221 |
| A.1. | Mediciones completas | 221 |
| ApéndiceB | Método magnético | 237 |
| B.1. | Resultados completos del método magnético | 237 |
| ApéndiceC | Ensayos a flexotracción | 247 |
| C.1. | Resultados y diagramas | 247 |
| ApéndiceD | Simulaciones computacionales | 315 |
| D.1. | Comparativa respecto al viscosímetro BML | 315 |
| <hr/> | | |
| | Índice de Tablas | 317 |
| | Índice de Figuras | 319 |

Notaciones y Acrónimos

323

Publicaciones

329



PARTE **I**

Antecedentes

CAPÍTULO 1

Introducción

1.1. **Ámbito de la investigación**

El hormigón es un material que se caracteriza por componerse de una matriz frágil, que presenta una adecuada resistencia a compresión, pero reducida a tracción. Desde sus orígenes, diversos tipos de materiales han sido empleados para reforzar y complementar las capacidades estructurales del hormigón. De entre todos ellos, las barras de acero (lisas en sus comienzos y corrugadas después) han sido las que se han beneficiado de un mayor desarrollo.

Dicho refuerzo del hormigón se ha denominado convencionalmente hormigón armado. Con motivo de dotar de mayor contribución al hormigón en el equilibrio tensional de las secciones solicitadas, se han desarrollado diferentes técnicas de tesado que comprimen el hormigón previamente a su puesta en servicio. De esta manera, se posibilita la reducción de las secciones de los elementos estructurales. Existen dos técnicas en función del momento de tesado de la armadura; el pretensado previo al hormigonado de la pieza y el postesado, el cual se realiza una vez el hormigón endurecido alcanza una cierta resistencia. El tipo de armado más empleado en los hormigones pre- y postesados son los alambres, formando cordones mediante un arrollado helicoidal, y tendones, siendo éstos últimos conjuntos de los anteriores.

En lo que respecta a la mejora del hormigón con fibras, múltiples patentes fueron registradas entre finales del siglo XIX y comienzos del siglo XX. Sin embargo, tuvo que esperarse hasta la década de los sesenta para que el Hormigón Reforzado con Fibras de Acero (HRFA) recibiese un nuevo impulso con estudios, que empezaron a analizar su comportamiento.

La cuantía de acero dosificada aporta una mayor tenacidad y ductilidad a la frágil matriz de hormigón. Este beneficio, no obstante, depende además de la orientación en la que se disponen las fibras dentro de la masa. En base a la formulación del hormigón diseñada, es posible obtener una distribución aleatoria en el espacio, conformando un material isótropo. En función del proceso de hormigonado, se puede forzar la disposición de las fibras en un plano o dirección predominante.

La respuesta a tracción del material puede presentar desde una pérdida de resistencia tras la fisuración de la matriz (reblandecimiento) hasta un incre-



(a) Hormigón autocompactante (HAC) (b) Hormigón reforzado con fibras de acero (HRFA)

Figura 1.1: Tecnologías del hormigón combinadas en la investigación.

mento en la tensión soportada (endurecimiento). Grandes cantidades de fibras pueden originar un material de grandes prestaciones (Figura 1.1), fisurándose el hormigón de manera múltiple.

El uso de las fibras posibilita reducir el espesor de los elementos estructurales al evitar la necesidad de recubrimientos mínimos para garantizar la integridad de las armaduras. Además, la ausencia de barras o emparrillados de armado rígidos, permite crear elementos estructurales de formas no planas con mayor facilidad. Al mismo tiempo, las múltiples fibras cosen mejor la matriz consiguiendo un mejor control de la fisuración y, por tanto, mejoran su durabilidad. Al evitar los trabajos de ferrallado y vibrado, es posible reducir costes y plazos de la ejecución, así como mejorar las condiciones de seguridad y salud en la obra. Por todo ello, resulta interesante la posibilidad de sustituir parte o el total de la armadura convencional por fibras.

A pesar de disponer de suficiente conocimiento del material, muchas de las leyes constitutivas se basan en los resultados de ensayos sobre probetas. Nuevos métodos predictivos permiten establecer la respuesta a tracción del HRFA en la fase de diseño, pero mediante factores de orientación generales.

La dosificación del mismo esta condicionada por varios aspectos como la resistencia requerida, el ambiente al que estará sometido el elemento o la consistencia prevista. En la década de los ochenta se desarrollo en Japón un hormigón muy fluido, capaz de rellenar los encofrados bajo su propio peso, sin necesidad de vibrado exterior. Incluso el movimiento de la masa puede forzar la orientación de las fibras en un plano o dirección predominante. En un inicio llamado Hormigón de Altas Prestaciones, pasó a llamarse Hormigón Autocompactante (HAC) con posterioridad.

La dinámica de fluidos computacional se muestra como una opción válida e interesante para definir la orientación de las fibras en cualquier geometría de elemento y proceso de hormigonado. Se trata de un campo de estudio amplio pero poco profundizado hasta la fecha.

1.2. Objetivos de la investigación

Los principales objetivos de la presente investigación se centran en el estudio de la distribución y orientación de las fibras de acero dentro de la matriz de hormigón en elementos estructurales a escala real.

Los estudios realizados hasta la fecha se centran, en su mayoría, en el estudio del material, el HRFA, sobre probetas moldeadas para tal fin. Ello ha dado lugar a la caracterización del comportamiento post-fisuración del material. Pero la realidad de la obra difiere, de manera notable, de los elementos de pequeña escala fabricados en el laboratorio de investigación. Por lo tanto, se requiere una mayor comprensión de los fenómenos que afectan la fabricación del HRFA a gran escala y la distribución y orientación de las fibras derivadas del proceso constructivo empleado.

Un estudio a escala real permitiría establecer la adecuación de las hipótesis de partida en situaciones reales de obra. Así mismo, se debería disponer de técnicas de predicción y control, lo suficientemente precisas, que no requieran extraer testigos o probetas de la estructura para garantizar la correcta colocación de los materiales. De tal manera, los elementos con responsabilidad estructural, básicamente sometidos a tracción, podrían beneficiarse de las ventajas adjuntas al empleo del HRFA.

En consecuencia, la tesis presupone que el material es apto para las prestaciones que se exigen, demostrando las ventajas de esa aptitud.

1.3. Metodología y procedimiento

Para alcanzar los objetivos establecidos en la investigación, se ha empleado la siguiente metodología de estudio:

Primero, se ha decidido cual será la aplicación estructural a estudiar en razón a caracterizarse por estar sometido principalmente a esfuerzos de tracción, simplificando los condicionantes del diseño y las capacidades estructurales. Una vez escogido el elemento, se analizan los esfuerzos a los que se verá sometido durante la vida útil mediante herramientas de cálculo clásicas.

Segundo, se decide el tipo de fibra a emplear en base a los resultados de una campaña de ensayos de arrancamiento. Se formula la dosificación de hormigón a emplear acorde al tipo de fibra y a las propiedades en estado fresco derivados del tipo de puesta en obra.

Tercero, se ejecuta con HACRFA un elemento laminar a escala real mediante el procedimiento especificado. Tras el fraguado de la lámina se procede a su desencofrado y posterior manipulación para el proceso de corte y obtención de las correspondientes probetas para su ensayo.

Cuarto, Se realiza una exhaustiva campaña de ensayos no destructivos y a rotura sobre probetas de diferente tamaño y ubicación dentro del elemento estructural. Los resultados obtenidos se relacionan entre sí para establecer posibles métodos de control sobre estructuras reales, sin la necesidad de extracción de testigos.

Quinto, se presenta una aproximación a la modelización del proceso de hormigonado mediante la dinámica de fluidos computacional (CFD), lo que permite predeterminar la orientación de las fibras en fase de diseño.

Sexto, por último, se presenta el caso práctico de un depósito de contención

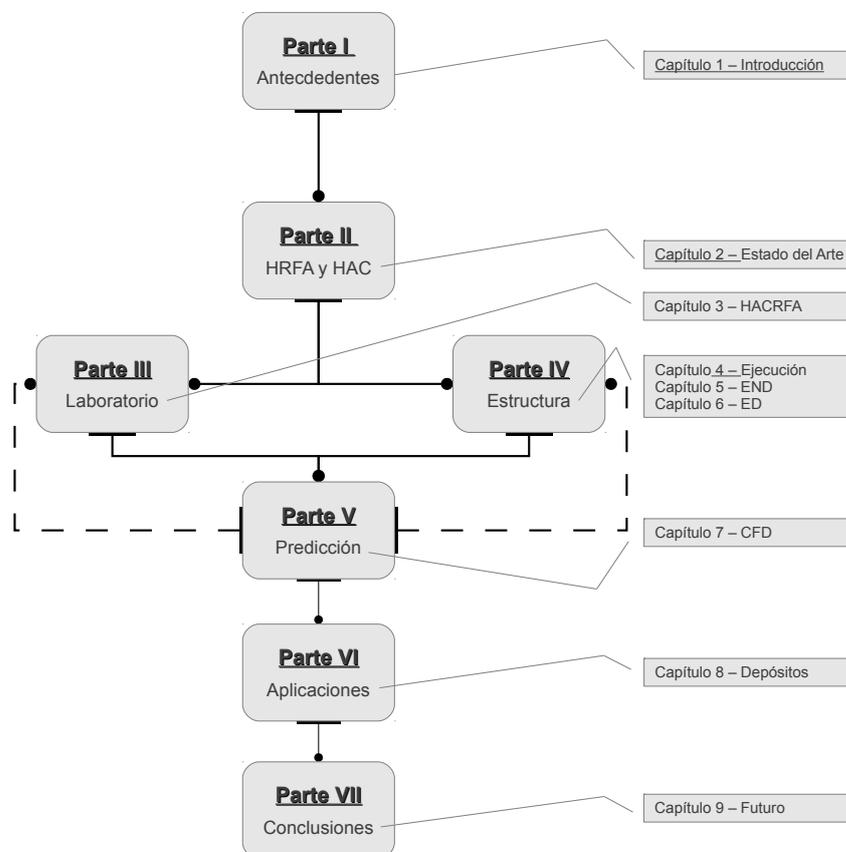


Figura 1.2: Optimización del HACRFA - vista general de las 7 partes que componen la tesis.

circular. Se comparan una estructura reforzada de manera convencional y otra mediante fibras, desde el punto de vista económico, de plazos de ejecución y su sostenibilidad.

1.4. Estructura del documento

La presente tesis se subdivide en 7 partes, tal y como queda representado en la Figura 1.2.

La presente introducción al estudio desarrollado en la Tesis Doctoral compone la Primera Parte del documento.

La Segunda Parte se centra en el estudio de los materiales a emplear, el HRFA por un lado, el HAC por otro y la unión de ambas tecnologías en último término. Se analizan sus propiedades y comportamiento en estado fresco y endurecido, así como los ensayos normalizados para dicha determinación. El Capítulo 2 al mismo tiempo, revisa las líneas de investigación en lo que a dinámica de fluidos computacional se refiere. Este tipo de modelización podría permitir predecir la orientación de las fibras.

En la Tercera Parte se establece el diseño del HACRFA a nivel de laborato-

rio. El Capítulo 3 detalla la elección de los materiales (tipo de fibra, contenido de cemento, relación agua/cemento, etc. Se contrastan los resultados en estado fresco y endurecido con los requisitos de la aplicación propuesta.

El fundamento de la presente tesis doctoral se recopila en la Cuarta Parte. En ella se exponen los pormenores de la ejecución de un tramo de muro a escala real y posterior manipulación y corte. Como punto de partida, en el Capítulo 4 se formula el hormigón a emplear. El Capítulo 5 detalla de manera pormenorizada los diversos ensayos no destructivos a los que se ha sometido la propia lámina y las probetas extraídas de la misma. En el Capítulo 6, se reflejan los ensayos destructivos realizados sobre diversas probetas con diferente ubicación en el conjunto del elemento laminar.

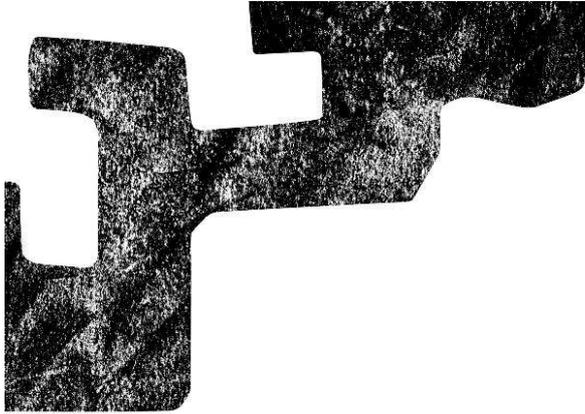
La Quinta Parte de la investigación llevada a cabo es la más ambiciosa. En ella se recoge a lo largo del Capítulo 7, el modelo planteado para la predicción de la orientación de las fibras en base a la CFD. Su idoneidad se verifica contrastando las mediciones reológicas y los resultados de ensayos ingenieriles con el modelo establecido.

En la Sexta Parte y dentro del Capítulo 8, se muestran casos prácticos en los que el empleo del material puede resultar viable y adecuado desde el punto de vista económico, de plazos de ejecución y su sostenibilidad.

Las conclusiones finales se resumen en la Parte Séptima y última. Así mismo, dentro del Capítulo 9, se aportan recomendaciones para nuevas líneas de investigación futuras en lo que respecta a la predicción y control de la orientación de las fibras.

Como ultimo punto del documento, se enumeran las fuentes y referencias bibliográficas consultadas en el desarrollo de la presente tesis doctoral.

Finalmente, con motivo de aportar información más exhaustiva sobre el contenido de las diversas partes de las que se compone la tesis, se adjuntan tres apéndices. En ellos se recogen de manera extensa los resultados de los diversos ensayos realizados.



PARTE **II**

Estudios preliminares

CAPÍTULO 2

Estado del Arte

2.1. Introducción

Se define como hormigón reforzado con fibras (HRF), aquel hormigón que incluye en su composición fibras cortas y discretas de varios materiales, aleatoriamente distribuidas en su masa. Dichas fibras pueden presentar una función estructural, si su contribución permite reducir o, incluso, sustituir la armadura convencional considerándolo en la comprobación de Estados Límites Últimos (ELU) o Estados Límites de Servicio (ELS). En caso contrario, su carácter no estructural implica que únicamente pueden considerarse para la mejora de la resistencia el fuego, abrasión, el control de fisuración, etc. [EHE-08 (2008)].

La principal característica del hormigón autocompactante (HAC) es su capacidad de compactarse por si solo, sin la necesidad de vibración externa. Sin embargo, ciertas situaciones pueden requerir un cuidadosamente controlado y ligero vibrado [Self-Compacting Concrete European Project Group (2005)]. La comprobación de su adecuada dosificación se realiza en estado fresco, mientras que una vez endurecido su comportamiento es incluso mejor que el del hormigón convencional. Este tipo de hormigones tiende a presentar una resistencia a compresión mayor y una menor porosidad debido a su estudiada formulación y a un mayor empleo de áridos finos.

El hormigón autocompactante reforzado con fibras de acero (HACRFA) es un material de más reciente estudio, que pretende aunar, mediante la sinergia de ambas tecnologías, las bondades de la autocompactibilidad y el refuerzo mediante fibras. La facilidad de puesta en obra debido a la eliminación de las fases de vibrado y ferrallado, principalmente, permiten reducir costes y plazos de manera notable. Unido a sus ventajas, también se suman las dificultades de formular tal hormigón.

Este capítulo pretende realizar una breve recopilación del estado del arte relativo a ambos materiales y su combinación. A continuación se hará una breve reseña de las aplicaciones estructurales en las que se ha empleado hasta la fecha.

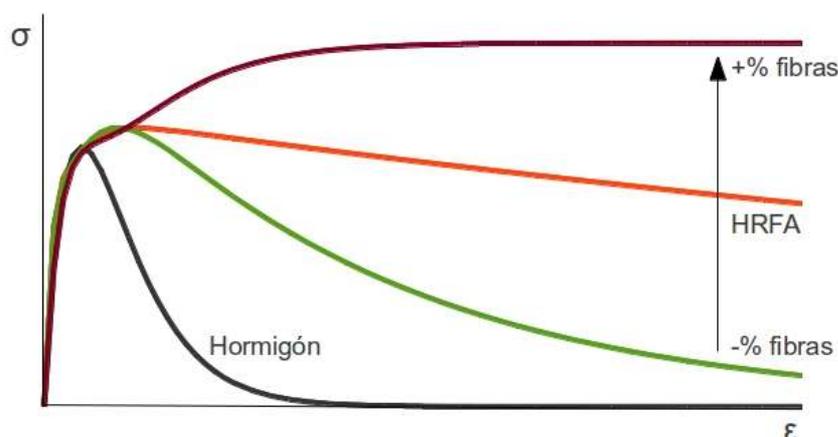


Figura 2.1: Incremento de ductilidad para diversas cuantías de fibras.

2.2. Características del HRFA

La necesidad de reforzar la frágil matriz de hormigón debido a su reducida resistencia a tracción, ha derivado en diversas tendencias. La adición de fibras a matrices cementicias es un hecho desde finales del siglo XIX. A comienzos del siglo XX se empezaron ya a registrar diversas patentes en esa línea. Pero es desde la década de 1960, cuando se establecen las bases para los estudios que han profundizado en el conocimiento del material desde entonces.

Dicho refuerzo pretende por un lado aumentar la resistencia a tracción del material y, por otro, dotar de cierta ductilidad al mismo. Ambos aspectos se consiguen gracias a que las fibras cosen las fisuras originadas en el hormigón y son capaces de soportar esfuerzos a través de ellas. Este incremento de energía absorbida depende en gran medida de la cuantía de fibras que atraviese la sección fisurada (Figura 2.1).

Tal y como reflejan diversos estudios [Wille et al (2011)], los hormigones reforzados con fibras pueden ser adecuados, incluso, para diseñar elementos estructurales de ultra-altas prestaciones. Para ello, es imprescindible un anclaje o adhesión correcta por parte de la fibra dentro de la matriz. Existen diversas variables que condicionan dicho comportamiento como pueden ser la compacidad del hormigón, la geometría de la fibra o la calidad del acero, por citar algunas.

Hormigones de mayor calidad y fibras de mayor longitud o geometrías no rectas, permiten una mejor adhesión y anclaje. Este hecho puede resultar contraproducente si la resistencia del acero no es también elevada. Se entiende por elevada, la resistencia cercana a 2000 MPa que se alcanzan empleando aceros de alto contenido en carbono en la fabricación de las fibras. Los esfuerzos a los que se ven sometidas las fibras, en este caso, pueden ser excesivas y originar su rotura. La ausencia de deslizamiento de la fibra provocaría roturas de carácter repentino y frágil en el conjunto del elemento, que conviene evitar.

La orientación de las fibras también juega un papel predominante en las propiedades mecánicas que presentará el material en estado endurecido. Un

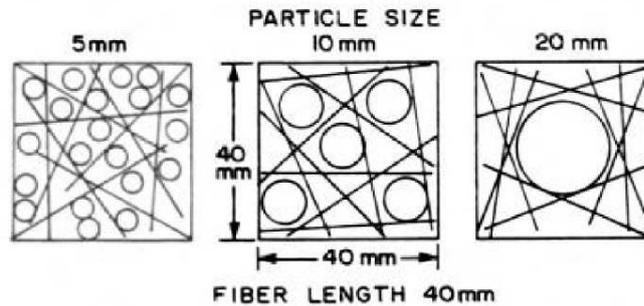


Figura 2.2: Efecto del tamaño máximo de árido [Johnston (1996)].

mayor porcentaje de fibras equivaldría a un mayor refuerzo, no siempre idéntico, en una distribución espacial. Sin embargo, es posible orientar las fibras de manera predominante en una dirección o plano, tal y como se expone en el Apartado 2.2.2.2.

Los componentes del hormigón (cemento, agua y áridos) pueden ser los mismos que en hormigones convencionales. Las fibras pueden añadirse directamente a la amasadora de la planta o bien, mezclarse con el hormigón dentro de la cuba del camión hormigonera. Los tiempos de amasado del HRFA tienden a ser mayores que en los hormigones tradicionales, dado que se requiere tiempo extra para la correcta mezcla y distribución de las fibras; más si cabe cuando éstas se suministran encoladas entre sí [Kooiman et al (1999)]. Las fibras pueden suministrarse en grupos encolados paralelamente, en lugar de individualmente, formando una especie de peine.

Las fibras rígidas como las de acero, tienden a desplazar los áridos gruesos incrementando la porosidad del material compuesto, mientras que las flexibles pueden amoldarse a los huecos entre ellos. Por otro lado, la adición de un nuevo agregado esbelto como son las fibras, origina una reducción de la trabajabilidad del hormigón. El efecto de cosido de la matriz, interesante en el hormigón endurecido, también afecta, aunque en menor medida a la masa fresca. Para contrarrestar dicho efecto, es recomendable reducir el tamaño máximo de árido [Johnston (1996)]. La Figura 2.2 muestra la mejora en la distribución y orientación de las fibras al emplear árido grueso más pequeño. De esta manera también se reducen las probabilidades de la formación de bolas de fibras segregadas del hormigón, comúnmente denominados *erizos*. Estos apilamientos de fibras pueden llegar a bloquear las bombas e, incluso, originar coqueas en el hormigón. Los erizos se pueden formar durante el proceso de adición de fibras, trabándose entre ellas antes de llegar a mezclarse de manera correcta con el hormigón, o durante el proceso de amasado debido a un exceso del mismo u otras causas relacionadas con las características de los materiales, como ya se ha mencionado aquí. El empleo de superplastificantes también ayuda a mejorar dicho comportamiento. La cuantía de fibras a emplear se convierte a menudo en un compromiso entre los requisitos en estado fresco y estado endurecido.

La tipificación de este hormigón de acuerdo al Anejo n°14 de la Instrucción EHE-08, se realiza de acuerdo a las designaciones mostradas en (2.1a) y (2.1b).

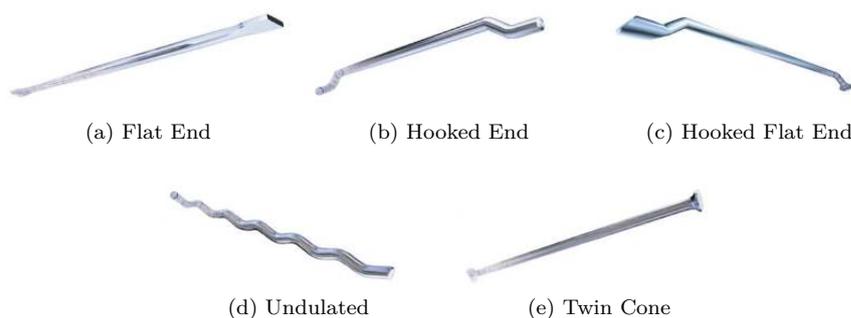


Figura 2.3: Tipos de fibras.

$$T \sim R/f - R1 - R3/C/TM - TF/A \quad (2.1a)$$

$$T - D \sim G/f/C/TM/A \quad (2.1b)$$

Los términos empleados son los habituales establecidos para designar hormigones convencionales. con la salvedad que el término T denota el tipo de hormigón reforzado con fibras, siendo HMF en masa, HAF armado y HPF para el pretensado. La sigla f se relaciona con el tipo de fibra a emplear, estando abierto a la fibra de acero (A), polimérica (P) y de vidrio (V). R1 y R3 indican las resistencias características residuales a flexotracción ($f_{R,1,k}$ y $f_{R,3,k}$) en MPa, y TF la longitud máxima de la fibra en mm. Si no se considera la contribución estructural de la fibra, no ha lugar a especificar las resistencias características residuales a flexotracción (f-R1-R3) y dichos campos se sustituyen por su misión, que bien puede ser el control de la retracción (CR), la mejora del comportamiento en caso de incendio (RF) u otras funciones (O). Sorprende que no se deba especificar la geometría de la fibra ni el diámetro y cuantía de la misma, que como se explicará más adelante, juega un papel importante en su capacidad para absorber mayor energía (aunque sí se recogen en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares). Existe la posibilidad de especificar la dosificación (Ecuación (2.1b)) mediante el término G en (kg/m^3).

2.2.1. Tipos de fibras

Existen fibras de diferentes materiales como las fibras de acero, vidrio, polipropileno, poliéster, etc. En esta Tesis se ha procedido al empleo de fibras de acero. En lo que respecta a las fibras de acero, los procesos de fabricación son diversos en función del material de partida, obteniéndose por medio de alambres estirados en frío, láminas cortadas, extractos fundidos, conformados en frío o aserrados de bloques de acero (UNE-EN 14889-1). La sección transversal de las fibras puede ser circular, rectangular o de forma irregular.

Existe una amplia gama en el mercado con variedad de diámetros y longitudes, así como calidades de acero. Las longitudes suelen oscilar entre 20 y 60 mm, los diámetros de 0,40 a 1,30 mm y las calidades de 900 a 1900 MPa. De entre ellos, las geometrías más habituales se muestran en la Figura 2.3.

Una de las características más importantes de las fibras es la denominada relación de aspecto (l/d), donde l indica la longitud y d el diámetro de las fibras. Elevadas relaciones tienden a originar *erizos* de fibras dentro de la masa. Esto representa una incorrecta ejecución y refuerzo, debido a una distribución no homogénea. El empleo de fibras esbeltas se presenta por tanto, más problemático [ACHE (1999)].

Las fibras pueden suministrarse sueltas, en sacos hidrosolubles o encoladas en manojos. Cabe destacar que estos sacos y materiales de encolado pueden alterar la estudiada dosificación del hormigón, al incrementar el contenido de aire ocluido, aportar más agua o absorber parte de la dosificada. La ventaja de los sacos radica en su facilidad de adición en el proceso de amasado. Las fibras encoladas, en cambio, permiten disponer de fibras con mayor relación de aspecto y evitar la formación de erizos al presentar el conjunto una menor relación de aspecto global. Evidentemente, se debe comprobar la disolución del material de unión para permitir una adecuada distribución de las fibras.

Las fibras pueden someterse a un proceso de galvanizado o proceder de aceros inoxidable. Habitualmente no suele ser necesario proteger las fibras por el pequeño recubrimiento requerido y la escasa expansión que presentan una vez oxidados superficialmente. Y por contra, el emplear este tipo de recubrimientos aumenta sustancialmente el coste de las mismas. Se ha comprobado, además, que un inadecuado pasivado de las fibras, puede producir hinchazón del hormigón [Belleze et al (2004)].

2.2.2. Propiedades mecánicas del HRFA

Cuantificar los beneficios aportados por el refuerzo en forma de fibras cortas mezcladas aleatoriamente en la matriz de hormigón resulta complicado. Dicha mejora se muestra principalmente en el comportamiento a tracción (Figura 2.6) del material que resulta capaz de soportar esfuerzos aún habiéndose fracturado la matriz, puesto que las fibras cosen y puentean las fisuras originadas, garantizando la transmisión de cargas. Existe una amplia gama de ensayos normalizados, directos e indirectos, que permiten obtener información sobre las características resistentes del HRFA.

- Resistencia a compresión

Un material de base cementicia como es el aquí estudiado presenta una gran capacidad para absorber esfuerzos de compresión, aunque siendo un material frágil, la rotura se presenta de manera repentina. Los estudios realizados hasta la fecha, indican que la adición de fibras no aporta un incremento notorio de la resistencia a compresión del material compuesto [Maidl (1995)]. Sin embargo, la energía de fractura absorbida y la capacidad de deformación aumentan gracias a la inclusión del refuerzo en forma de fibras [König and Kützing (1999)]. La norma UNE 83507 describe el procedimiento para ensayar probetas moldeadas o extraídas de HRFA.

- Resistencia a tracción

Como ya se ha indicado anteriormente, el interés por introducir las fibras como refuerzo dentro de la matriz de hormigón se basa en mejorar el comportamiento frente a esfuerzos de tracción del composite. Al igual que ocurre durante el ensayo a compresión, el hormigón como material

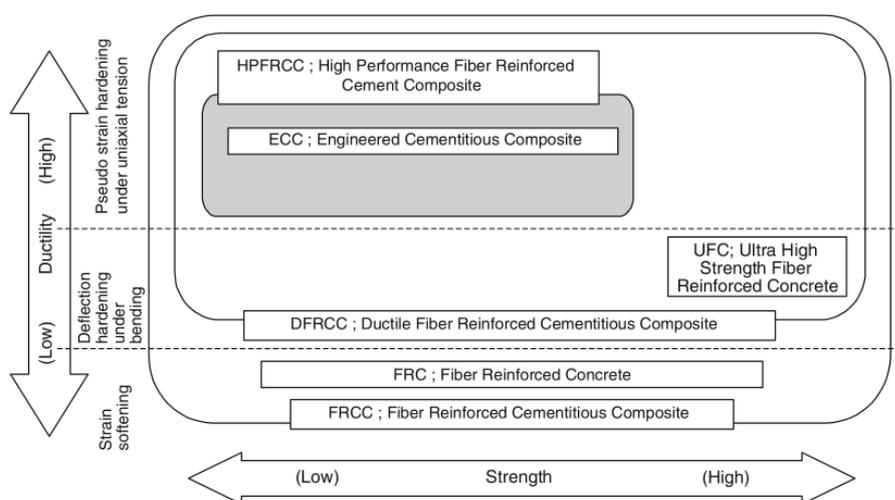


Figura 2.4: Clasificación esquemática de los HRF [Rokugo et al (2009)].

frágil que es, presenta una rotura sin apenas ductilidad al superar su resistencia a tracción. Éste valor resulta muy inferior a su equivalente a compresión, por lo que habitualmente se tiende a despreciar.

Los comportamientos posibles a mostrar difieren en función de la cantidad de fibras dosificada y el método de diseño empleado (Figura 2.4), como son los casos del hormigón reforzado con fibras con bajas cuantías (HRF), hasta los compuestos cementicios reforzados con fibras de altas prestaciones (HPFRCC), pasando por los hormigones reforzados con fibras de ultra altas resistencias (UFC). Cada uno de estos materiales se diseña en base a diferentes principios de acuerdo a los objetivos a alcanzar (Figura 2.4). Algunos de estos materiales tienen como objetivo aportar cierta ductilidad al material, mientras que otros se encaminan a mejorar la durabilidad del mismo o incrementar sus valores máximos de resistencia. Para ello se basan en la formación de múltiples micro fisuras en lugar de una única macro fisura.

De esta manera, mientras que en los HRF existe una caída de tensión tras la fisuración de la matriz, comportamiento llamado de reblandecimiento, los otros materiales compuestos, permiten incrementar la carga por encima de la resistencia a tracción del material, originando un comportamiento de endurecimiento y aportando de paso, una mayor ductilidad al material. La Figura 2.5 muestra gráficamente las relaciones tensión-elongación y tensión-deformación de los diferentes compuestos cementicios reforzados con fibras.

La citada resistencia a tracción del material se puede medir en base a diferentes procedimientos. El método más directo para su caracterización consiste en el ensayo a tracción uniaxial [Barr et al (2003a)] [Barragán (2002)]. Para ello se emplean probetas cilíndricas (15 cm de diámetro y 30 cm de altura) entalladas de manera perimetral en su parte media y a la que se le han cortado los extremos para evitar fenómenos derivados de los efectos pared. Las probetas se pegan a los platos de ensayo y se disponen

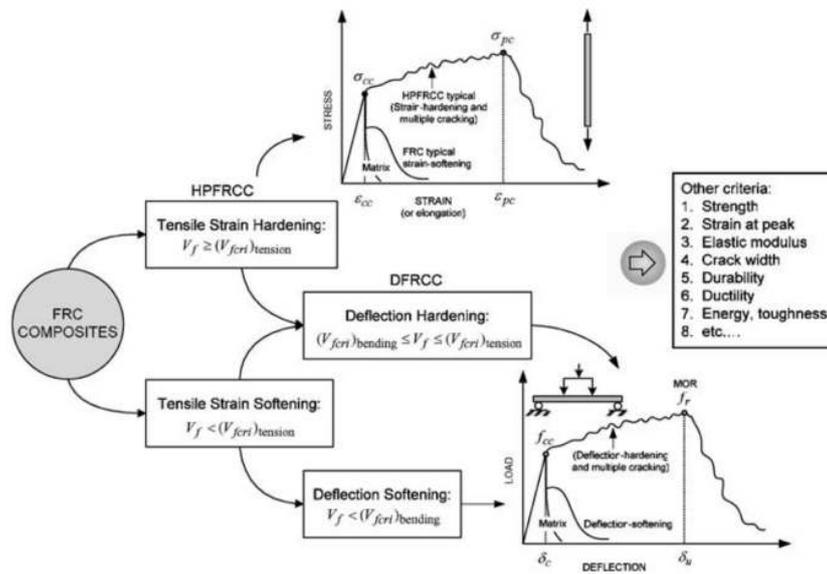


Figura 2.5: Clasificación gráfica de los HRF [Naaman and Reinhardt (2006)].

equipos de medida de desplazamiento para determinar la abertura de la fisura. Esta fisura se originará en la entalla, puesto que resulta la sección más débil del conjunto.

Otros tipos de ensayos recogidos en la normativa UNE, permiten determinar dicho valor de manera indirecta por medio de ensayos a flexotracción (UNE 83509 y UNE-EN 14651). Ambas normas difieren en el procedimiento a seguir para la realización del ensayo. A su vez, mientras que en la primera situación emplea dos puntos de aplicación de carga, a un tercio de cada uno de los dos puntos de apoyo, en una probeta prismática sin entallar, la segunda norma propone un ensayo de tres puntos, aplicando la carga en el centro de la pieza, en la vertical de la entalla a realizar. Mientras que el primer caso solo estudia el valor de la carga máxima, con el segundo se analiza el desarrollo completo del ciclo de carga y la abertura de fisura (CMOD), resultando más acorde para determinar posteriormente un modelo constitutivo del material. Las diferentes normativas emplean criterios distintos a la hora de abordar los ensayos a flexotracción en base a una configuración de cuatro o tres puntos.

Otros estudios sin embargo, buscan un equilibrio entre las propuestas, directa e indirecta, anteriores, intentando minimizar la complejidad sin emplear grandes cantidades de material al reducir el tamaño de las probetas. Entre ellos, deben citarse el ensayo Brasileño y el ensayo a hendidura. La configuración del primero es muy simple, ya que emplea probetas cilíndricas sobre las que se aplica una compresión de manera radial. Los elementos de medición permiten determinar el desplazamiento de las dos mitades semicirculares fracturadas tras el ensayo. En los puntos de aplicación de la carga se concentran esfuerzos de compresión, pasando a una tensión de tracción constante en el resto de la probeta. A pesar de ello,

tras la fisuración de la matriz se generan esfuerzos flectores debido a la excentricidad de la carga aplicada.

Otro procedimiento similar, desarrollado por [Tschegg and Linsbauer (1986)], genera una hendidura en la parte superior de una probeta cúbica especialmente moldeada a tal efecto. Sin embargo, su aplicación no se ha extendido para su completa aceptación como método de ensayo de la resistencia a tracción del HRFA.

El ensayo Barcelona, pretende estimar la resistencia a tracción por medio de un modificado ensayo de doble punzonamiento [Molins et al (2009)]. En este caso, se aplica una carga de compresión concentrada en una pequeña superficie a cada lado de la probeta. De esta manera, se genera una tracción interior en base al modelo de bielas y tirantes establecido, que fractura la matriz. La energía absorbida durante el ensayo es función de la densidad y orientación de fibras que alberga la probeta [Mora (2008)] [Pujadas et al (2011)].

También existe la opción de realizar ensayos sobre paneles de gran diámetro expuesto en [Bernard (2000)] (hasta 980 mm de diámetro) y empleado en [Maturana (2013)] (2 metros de diámetro). La primera aplicación en el campo de la edificación en España se ha realizado en el edificio de la nueva sede de la ingeniería LKS en Arrasate (Gipuzkoa)) diseñando forjados de losa maciza de 0.3 m de canto y 8 metros de luz. La resistencia del HRFA se ha comprobado mediante el ensayo de dichos paneles bajo una carga concentrada en el centro y analizando las líneas de rotura generadas.

■ Resistencia a cortante

Los mecanismos de mejora de la resistencia frente a esfuerzos tangenciales que aportan las fibras no han sido completamente estudiados a pesar de los estudios realizados [Slater et al (2012)]. La normativa vigente (EHE-08) considera que la contribución al aumento de la resistencia a cortante está relacionada con la resistencia residual de una manera simplificada. Existen, sin embargo, estudios que afirman que el refuerzo de fibras incrementa la resistencia, pero dicho aumento está supeditado a la orientación de las fibras [Boulekbache et al (2012)]. El comportamiento frente a punzonamiento de losas macizas cuyo único refuerzo son las fibras puede ser comprobado mediante el ensayo sobre paneles antes citado [Michels et al (2012)].

Las diversas normativas e instrucciones se centran en consecución de una ley constitutiva como la que se muestra en la Figura 2.6 en base a los parámetros obtenidos en estos ensayos. Aunque para el ensayo a tracción directa parece el más intuitivo van Mier and van Vliet (2002), las dificultades inherentes a la ejecución del mismo inclinan la balanza en favor generalmente de los ensayos a flexotracción. Éstos requieren de un análisis inverso para su transposición en un modelo tensión-deformación/abertura de fisura representativo del material. [Kooiman (2000)] establece un ejemplo para la elección del tipo de ensayo en base a múltiples criterios. En él, se analizan de forma ponderada la complejidad de la configuración, preparación y ejecución del ensayo junto con la reproducibilidad, costes, aceptación, procesado de resultados y fiabilidad de diversos ensayos, tras lo cual se concluye que, aunque el ensayo Brasileño es el

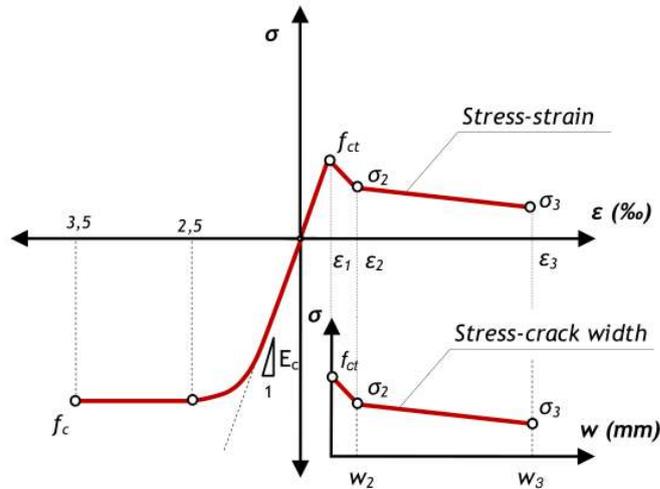


Figura 2.6: Diagrama tensión-elongación $\sigma - \epsilon$ y tensión-abertura de fisura $\sigma - w$ del HRFA [Laranjeira et al (2010)].

más sencillo y el de tracción directa el que permite analizar los resultados de manera más simple, es el ensayo a flexotracción a tres puntos el más idóneo.

A partir de los valores obtenidos en estos ensayos, y mediante un análisis inverso (Apartado 2.2.3) por regla general, se determinan los parámetros que conforman la ley constitutiva del material. Es necesario recordar, que la dispersión en todos ellos resulta elevada. Al mismo tiempo, el tamaño de la probeta, la geometría y las condiciones de contorno deben ser lo más aproximadas al elemento en cuestión estudiado. Como punto de partida para comprender la resistencia a tracción que es capaz de desarrollar el material, se presenta a continuación una pequeña introducción al comportamiento individual de cada una de las fibras en lo que respecta a su arrancamiento y orientación. El potencial incremento de propiedades mecánicas que puede presentar el material es función de las características, que se desarrollan en los subapartados siguientes.

2.2.2.1. Comportamiento frente al arrancamiento

Numerosos estudios han profundizado en el análisis del arrancamiento de las fibras individuales con el fin de determinar las fases de que se compone dicho fenómeno. Los mecanismos que intervienen durante el proceso de extracción de las fibras son la adhesión, la fricción, el anclaje mecánico y el entrelazado de las fibras [Naaman and Najm (1991)]. La adhesión entre fibra y matriz depende en gran medida de las propiedades de la zona de transición de la interfase matriz-fibra. Este mecanismo es el que primero se activa y donde hormigón y acero trabajan conjuntamente para absorber los esfuerzos de tracción generados. Para su mejora resulta interesante el empleo de hormigones con reducidas relaciones agua/cemento [Wei et al (1986)] [Groth (2000)] y más compactos. Los hormigones autocompactantes, por ejemplo, resultan interesantes de acuerdo a esos resultados. El incremento de la resistencia de la zona de transición de la interfase, estará limitado a la posible rotura de las fibras, en lugar de su arrancamiento, lo que puede dar origen a resultados contraproducentes, como

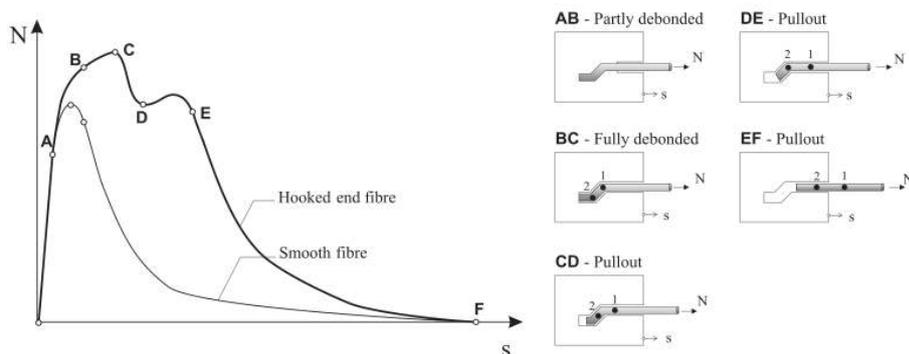


Figura 2.7: Relación carga-deslizamiento durante el ensayo de arrancamiento [Cunha (2010)].

una menor energía absorbida durante la rotura del elemento.

El incremento de carga origina un despegue de la fibra y matriz, hasta el valor de carga máxima que es donde se origina el despegue total de la fibra. Entonces entra en acción el siguiente mecanismo, la fricción, que evita una rotura frágil del material a medida que la fibra se desliza hacia el exterior y crece la fisura generada. Los tipos de fibra actualmente empleados en la construcción presentan geometrías modificadas, que aportan un anclaje mecánico que contribuye a una mejor fricción y a una mayor ductilidad en el material. Las fibras, por tanto, son enderezadas a medida que se deslizan por un conducto no rectilíneo tal y como se representa en la Figura 2.7. Finalmente y para densidad elevadas de fibras ($\approx 10\%$ del volumen) [Homrich and Naaman. (1988)], se podría producir un entrelazado entre las fibras que aportaría una mayor resistencia a su arrancamiento.

Desde el punto de vista del material aporta gran información sobre su comportamiento, pero desde el punto de vista estructural no es lo más apropiado dado que el HRFA debe ser estudiado como material compuesto que es. En un plano de rotura se pueden encontrar múltiples fibras, que superponen las tensiones generadas en la matriz. Al mismo tiempo, la orientación de las fibras tiene una influencia relevante, puesto que el comportamiento difiere del estudiado, al mismo tiempo que ocurren fenómenos de flexión en la propia fibra y desconchados de la matriz en el ángulo obtuso de las fibras inclinadas. Aunque los modelos de estudio han ido desarrollándose para el análisis del ensayo, los resultados no son extrapolables a un elemento estructural de escala mayor.

Son muchos los factores que dificultan establecer unos modelos universales del arrancamiento de las fibras. Entre ellos, se deben citar el tipo de fibra, la orientación de la misma, su longitud embebida en la matriz y la propia resistencia de la matriz. Las configuraciones del ensayo también son diversas [Marković (2006)] [Grünewald (2004)] [Groth (2000)], aunque no existe un método estándar para tal fin, con lo que se origina mayor incertidumbre a la hora de comparar los datos.

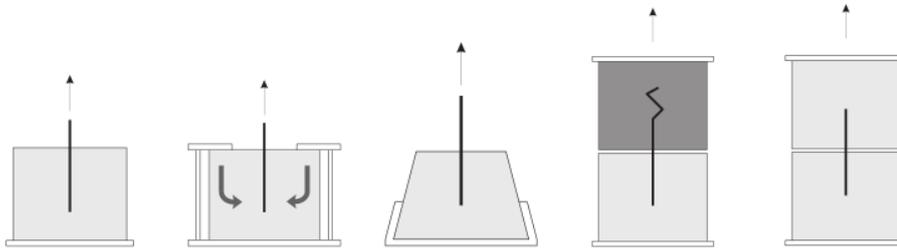


Figura 2.8: Tipos de configuraciones del ensayo a arrancamiento [Cunha (2010)].

2.2.2.2. Orientación de las fibras

Para obtener una mejora en las propiedades mecánicas del composite, tales como resistencia a tracción y tenacidad, además de emplear tipos de fibras que presentan un mejor comportamiento frente al arrancamiento, éstas deben estar adecuadamente alineadas con la dirección del esfuerzo para resultar suficientemente efectivas. En un plano de rotura, se puede discernir incluso fibras que cruzan el plano, pero que no resultan efectivas, es decir, que no aportan resistencia a la fractura.

La orientación de las fibras, por tanto, es uno de los aspectos clave en la mejora de las prestaciones del material compuesto. La alineación de las fibras con los esfuerzos de tracción permite el reparto de esfuerzos en la sección. Se debe hacer mención a los condicionantes, que pueden alterar dicha orientación, tales como el movimiento de la masa o los propios encofrados.

Analizando el caso de una fibra individual, en ausencia de efectos inerciales y condiciones de contorno, ésta puede girar libremente respecto a su centro de gravedad y adoptar cualquier posición en el espacio. Los extremos de las fibras conforman la superficie de una esfera con diámetro igual a la longitud de la fibra. Se supone que el extremo de la fibra puede ser cualquier punto de esa esfera con la misma probabilidad. En caso de introducir ciertas condiciones de contorno que impidan la libre rotación de la fibra, existirán orientaciones en las que la fibra tendrá imposibilitada su disposición. Esto ocurre, por ejemplo, en las proximidades de los encofrados que en la práctica real resultan indispensables.

En las cercanías de las superficies externas, cuando el centro de gravedad de la fibra se encuentra a distancias inferiores a la mitad de su longitud, esa superficie esférica se ve seccionada por el plano delimitador. La disposición de las fibras se incrementa en los ejes paralelos a ese plano en detrimento del eje normal. En el caso de elementos estrechos o cuando las fibras se ubican excesivamente cercanas al elemento de contorno condicionante, la fibra únicamente puede girar en un plano. Se forma por tanto un círculo con las posiciones de los extremos de la fibra, en lugar de la anteriormente expuesta esfera. La distribución tridimensional se ha reducido a una bidimensional. Y si se limitase una de las direcciones transversales con algún otro plano, la fibra únicamente podría orientarse en una dirección.

Este es el caso más simple y partiendo de él, se pueden obtener las proyecciones de las fibras en cualquiera de los ejes. Esa efectividad [Rao (1979)] del conjunto de fibras se suele denominar factor de orientación. El factor de

orientación indica el porcentaje de la proyección de las fibras en una dirección concreta, la cual, habitualmente, se adopta de acuerdo a los ejes principales de la pieza. Este parámetro, tal y como ha sido observado por diversos autores [Krenchel (1975)], permite calcular el número total de fibras en una sección. Es obvio que el factor de orientación en el caso unidireccional debe ser igual a la unidad, mientras que en el resto de los casos es necesaria la integración de las proyecciones de las fibras para cualquier ángulo de inclinación. Mientras que en el caso bidireccional todas las orientaciones tienen la misma probabilidad, en el caso tridimensional no ocurre lo mismo [Stroeven and Shah (1978)], puesto que el círculo que forman las fibras con igual inclinación respecto a uno de los ejes, aumenta a medida que aumenta el ángulo. Es decir, existe una mayor probabilidad de encontrar fibras con elevados ángulos respecto a un eje, en comparación con los mejor orientados respecto a ese eje. Integrando (Ecuaciones (2.2a) y (2.2b)) las superficies cilíndricas diferenciales que forman las fibras con igual ángulo respecto al eje estudiado, se logra el correspondiente factor de orientación respectivamente para dos y tres dimensiones.

$$2D \rightarrow \eta_{\theta} = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \frac{\frac{l_f}{2} \cos(\theta)}{\pi \frac{l_f}{2}} d\theta = \frac{2}{\pi} \quad (2.2a)$$

$$3D \rightarrow \eta_{\theta} = \int_0^{\pi/2} \frac{\frac{\pi \cdot l_f^2}{2} \sin(\theta) \cos(\theta)}{2\pi \left(\frac{l_f}{2}\right)^2} d\theta = \frac{1}{2} \quad (2.2b)$$

Resumiendo, el factor de orientación para los tres casos es el siguiente: 1 para 1D, $\pi/2$ para 2D y 0,5 para 3D. Se emplean parámetros adimensionales de forma que el valor obtenido sea independiente de la longitud de la fibra. Sin embargo, es de vital importancia destacar que las condiciones de contorno de una probeta no resultan representativas de un elemento estructural real, aún cuando al ser simple e intuitiva su determinación, es un factor reconocido por los investigadores. [Schölin (1988)] resume los diversos factores de orientación derivados por diferentes autores, destacando la diversidad de valores obtenidos en función de las hipótesis adoptadas.

Además de las condiciones de contorno introducidas por los encofrados, existen diversos aspectos que alteran la orientación de las fibras dentro de la masa. Por un lado, la vibración a que se somete la masa fresca para su compactación tiene importancia relevante [Edgington and Hannant (1972)] [Gettu et al (2005)]. El tipo de vibración, externa mediante mesas vibratoras o interna por medio de agujas, altera de manera diferente también la orientación inicial de las fibras. Para elementos prefabricados, el control en el vibrado puede realizarse de manera más controlada y repetitiva, que en elementos hormigonados in situ. En este caso, la pericia del operario es un factor a tener muy en cuenta.

Otra opción, que permite evitar la influencia del operario, prescinde del vibrado por medio de una dosificación optimizada que confiere unas propiedades autocompactantes al hormigón. Estos hormigones tienen la propiedad de compactarse bajo su propio peso. Resultan muy fluidos con una tensión de corte baja y elevada viscosidad por el gran aporte de finos que presenta. Sin embargo, se introducen otros condicionantes derivados de las propiedades en estado fresco de la masa. En posteriores apartados se profundiza en ambos aspectos.

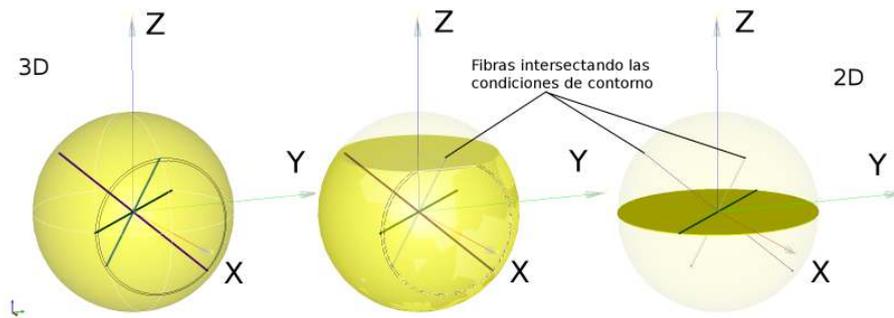


Figura 2.9: Limitación del giro de las fibras desde 3D a 2D.

El método más directo para determinar la orientación y distribución de las fibras dentro de la masa de hormigón consiste en extraer probetas testigo mediante corte. Del estudio de las caras cortadas, se pueden estimar los parámetros de estudio. Los métodos estereológicos ya se han comprobado con anterioridad en diversas investigaciones [Redon et al (1999)]. Posteriormente estos testigos se machacan hasta poder extraer todas y cada una de las fibras, pudiendo ayudarse de un imán (UNE-EN 14721). A continuación se procede a su pesado y a la determinación de la cuantía de acero por metro cúbico dispuesta.

Algunos autores destacan [Laranjeira et al (2011)] que el factor de orientación no es el más adecuado para determinar la respuesta estructural de diferentes fibras con ángulos de inclinación diversos, por lo que la dispersión en los resultados de los ensayos a rotura es elevada. Al mismo tiempo, propone un perfil de orientaciones para las fibras en función de muchos factores relacionados con todas las fases de producción, puesta en obra y la geometría del encofrado.

2.2.3. Modelos constitutivos

Aun cuando existen normas de ensayo para el material, las normativas de los países difieren en ciertos aspectos y no existe un compromiso en la adopción de una única ley constitutiva del material. Esto se debe a la multitud de parámetros, que afectan el comportamiento del material. Es primordial para poder diseñar estructuras de HRFA, la existencia de unas bases de cálculo que permitan calcular las propiedades mecánicas de los elementos.

Existen diversos criterios a la hora de establecer el comportamiento a tracción del material, pero entre todos, los más habituales resultan ser modelos continuos pero no diferenciables en todo el rango, diseñados a partir de los resultados de ensayos sobre el material empleando un procedimiento inverso. La Figura 2.10 refleja de forma resumida los modelos recogidos en diversos documentos técnicos e instrucciones. En la búsqueda por establecer métodos simples, que permiten conocer el comportamiento del material de manera fiable, los estudios a nivel microscópico, de acuerdo a la mecánica de la fractura, han cedido frente al empuje de estudios macroscópicos, a nivel del elemento. Un punto intermedio se encuentra en el estudio a nivel de mesoescala [van Mier and van Vliet (2002)], analizando el material a escala de partícula, que

| Diagram | Parameters | Test configuration | Ref. |
|---------|--|--|------------|
| | $\sigma_1 = f_{ctRd} = 0,33f_{R,3,d}$ $\epsilon_1 = \epsilon_u = [20\% \text{ bending}; 10\% \text{ tension}]$ | 3-point bending test UNE EN 14651 | EHE |
| | $\sigma_1 = f_{Flu} = f_{eq2} / 3$ $\epsilon_1 = \epsilon_u = [20\% \text{ softening}; 10\% \text{ hardening}]$ | 4-point bending test UNI 11039 | CNR-DT 204 |
| | $\sigma_1 = f_{eq,ctd,II} = f_{eq,ctk,II} \cdot \alpha_c^f \cdot \alpha_{sys} / \gamma_{ct}^f \leq f_{eq,ctd,I}$ $\epsilon_1 = \epsilon_u = 10\%$ | 4-point bending test NBN B 15-238 | DBV |
| | $\sigma_1 = f_{eq,ctd,I} = f_{eq,ctk,I} \cdot \alpha_c^f \cdot \alpha_{sys} / \gamma_{ct}^f$ $\sigma_2 = f_{eq,ctd,II} = f_{eq,ctk,II} \cdot \alpha_c^f \cdot \alpha_{sys} / \gamma_{ct}^f \leq f_{eq,ctd,I}$ $\epsilon_2 = \epsilon_u = 10\%$ | 4-point bending test NBN B 15-238 | DBV |
| | $\sigma_1 = f_{Fls} = 0,45f_{eq1}$ $\sigma_2 = f_{Flu} = k[f_{Fls} - (w_u / w_{i2})(f_{Fls} - 0,5f_{eq2} + 0,2f_{eq1})]$ $k = [0,7 \text{ pure tension}; 1 \text{ remaining cases}]$ $\epsilon_2 = \epsilon_u = [20\% \text{ softening}; 10\% \text{ hardening}]$ | 4-point bending test UNI 11039 | CNR-DT 204 |
| | $\sigma_1 = f_{ctd}^f = \alpha_c^f \cdot f_{ctk,fl} / \gamma_{ct}^f$ $\sigma_2 = f_{eq,ctd,I} = f_{eq,ctk,I} \cdot \alpha_c^f \cdot \alpha_{sys} / \gamma_{ct}^f$ $\sigma_3 = f_{eq,ctd,II} = f_{eq,ctk,II} \cdot \alpha_c^f \cdot \alpha_{sys} / \gamma_{ct}^f \leq f_{eq,ctd,I}$ $\epsilon_1 = \sigma_1 / E_{HRF}$ $\epsilon_2 = \epsilon_1 + 0,1\%$ $\epsilon_3 = \epsilon_u = 10\%$ | 4-point bending test NBN B 15-238 | DBV |
| | $\sigma_1 = 0,7 f_{ctm,fl} (1,6-d)$ $\sigma_2 = 0,45 \cdot K_h \cdot f_{R,1}$ $\sigma_3 = 0,37 \cdot K_h \cdot f_{R,4}$ $\epsilon_1 = \sigma_1 / E_{HRF}$ $\epsilon_2 = \epsilon_1 + 0,1\%$ $\epsilon_3 = \epsilon_u = 25\%$ | 3-point bending test RILEM TEST | RILEM |
| | $\sigma_1 = f_{ct,d} = 0,6 f_{ct,fl,d}$ $\sigma_2 = f_{ctR1,d} = 0,45f_{R,1,d}$ $\sigma_3 = f_{ctR3,d} = k_1(0,5f_{R,3,d} - 0,2 f_{R,1,d})$ $\epsilon_2 = 0,1 + 1000 \cdot f_{ct,d} / E_{c,0}$ $\epsilon_3 = 2,5 / l_{cs}$ (l_{cs} : critical length) $\epsilon_u = [20\% \text{ bending}; 10\% \text{ tension}]$ | 3-point bending test UNE EN 14651 | EHE |

* The constitutive model from the FIB Model Code (2007) is equivalent to the Italian Standard (CNR-DT-204).

Figura 2.10: Modelos constitutivos del HRFA [Blanco Álvarez et al (2010)].

en el caso del HRFA bien puede ser, en base al número y orientación de las fibras. Lo mismo ocurre con el análisis directo, basado en propiedades de los materiales que componen el hormigón en lugar de ensayos previos [Laranjeira (2011)]. Generalmente estos modelos representan hormigones reforzados con reducida cuantía de fibras, que originan un comportamiento de ablandamiento

en la zona post-pico. Esto se corresponde con materiales más dúctiles pero que no aportan mayor resistencia a tracción al material original. La tendencia actual de diseñar hormigones reforzados con fibras de altas prestaciones, requiere adecuar dichos modelos. A continuación se resumen los habituales modelos de diseño:

■ **Tension-deformación ($\sigma - \epsilon$):**

De acuerdo a lo establecido en la EHE-08 en su Anejo n°14 y la norma de ensayo UNE-EN 14651, se determina de acuerdo al Límite de Proporcionalidad (F_L) y las resistencias residuales ($f_{R,1}$ y $f_{R,3}$) correspondientes a las aberturas de fisura de 0.5 y 2.5 mm. Del primero de estos tres valores se obtiene la resistencia a flexotracción ($f_{ct,fl}$). Para poder considerar la contribución de las fibras en el cálculo estructural, se debe cumplir que las resistencias residuales a flexotracción, $f_{R,1,k}$ y $f_{R,3,k}$, superen el 40 % y el 20 % del límite de proporcionalidad, respectivamente. Establece la Instrucción, a su vez dos diagramas, uno rectangular y simplificado mientras que el otro es multilineal y más ajustado a la realidad (Figura 2.10). El primero únicamente emplea un parámetro para su definición, mientras que el segundo emplea mayor número de ellos a fin de ajustarse mejor al comportamiento del material.

La mayor diferencia entre diferentes leyes constitutivas del material, reside principalmente en la definición del ensayo de referencia (flexotracción a tres puntos [Barr et al (2003b)] o cuatro puntos [CNR-DT 200/2004 (2008)] [DBV-Stahlfaserbeton (2001)]) y la disparidad de criterios para determinar los datos característicos del modelo a partir de los diferentes datos y resultados de dichos ensayos (resistencias residuales o equivalentes, etc.). Todos ellos, sin embargo, establecen relaciones continuas pero no diferenciables en todo su rango. Los modelos que requieren de más puntos clave resultan más complejos, pero son más cercanos al comportamiento real del material.

■ **Tension-abertura de fisura ($\sigma - \omega$):**

Este método se basa en el modelo establecido por [Hillerborg et al (1976)] denominado Modelo de Fisura Ficticia (FCM). De acuerdo a esta teoría, los esfuerzos pueden ser transmitidos a través de la fisura por el engarce entre áridos y las propias fibras, que cosen la fisura, una vez se debilita ese engarce. Incrementos de carga originan una mayor abertura y profundidad de la fisura ampliando la zona de proceso estudiada.

Este modelo plantea igualmente una relación lineal de acuerdo a un diagrama tensión-deformación para la zona previa a la fractura de la matriz y el origen de la fisura. Posteriormente, la relación se establece para la denominada zona de cohesión, eficaz hasta una abertura de fisura crítica. Se entiende, que dicha longitud corresponderá con la que origine el arrancamiento o rotura de las fibras.

A partir de este modelo diversos estudios plantean las vías para diseñar los modelos. Uno de los principales radica en el modelo micromecánico establecido por [Li et al (1993)]. En éste se desarrolla un modelo semi-analítico que incluye entre sus factores la curva de pérdida de carga del hormigón, la contribución para transmitir la carga por parte de las fibras,

función de la tensión de rozamiento entre fibra y matriz y el pretensado que aportan las fibras hasta el completo despegue de la fibra respecto a la matriz.

Dada la complejidad de este modelo directo, se han ido estableciendo otras aproximaciones inversas [Stang et al (1995)] [Wolinski et al (1987)] [Roelfstra and Wittmann (1986)] que incorporan diversos grados de libertad al sistema. A mayor número de grados de libertad, más parámetros deben ser establecidos, pero al mismo tiempo, más realista resulta la modelización.

Como se aprecia en la Figura 2.10, las instrucciones de los países cercanos, salvo excepciones, se acogen al modelo tensión-deformación. Este modelo resulta interesante porque dentro del mismo diagrama se puede representar el comportamiento del material bien a tracción como a compresión. Al mismo tiempo, resulta equiparable respecto a las leyes constitutivas del resto de materiales estructurales. Sin embargo, el criterio para calcular los parámetros de tensión y elongación de los puntos clave del modelo, a partir de los resultados de los ensayos, resultan poco evidentes.

Por otro lado, la relación tensión-abertura fisura parece estar mas acorde con la naturaleza de un material como el HRFA, que se fractura pero que continua soportando esfuerzos. El modelo micromecánico expuesto además, resulta de gran interés desde el punto de vista científico. El comportamiento del material se estudia desde el punto de vista de la mecánica de la fractura, pero resulta por tanto, complicado de aplicar al diseño sistemático por parte de los proyectistas debido al elevado número de parámetros de difícil cuantificación. Las simplificaciones planteadas introducen un carácter práctico al modelo, pero se pierde información relevante respecto al comportamiento del material [Kooiman (2000)].

Resulta realmente complicado prever el comportamiento del material a partir de estos modelos. Muchas variables físicas influyen en sus características, como pueden ser la resistencia de los materiales, la longitud y diámetro de las fibras, pero además el amasado, transporte, puesta en obra, vibrado, tamaño del elemento, condiciones de contorno, duración de las cargas o incluso los diferentes coeficientes de seguridad aplicados originan diferencias en las expectativas.

A excepción de [Barragán (2002)], que introduce un ligero incremento de la capacidad portante, en cuanto a resistencias residuales se refiere, posterior a la caída de tensión tras la fisuración de la matriz, la mayoría de los modelos representan un decaimiento constante en la fase post-pico. En esta línea es interesante destacar los trabajos de [Lee and Barr (2004)], que establecen un modelo de cuatro exponenciales para caracterizar el material. El empleo de tres o seis variables para la generación de la ley constitutiva del material, aún no teniendo sentido físico alguno, permite representar un comportamiento de reblandecimiento constante o mejorado.

2.2.4. Control de calidad

El control de calidad de las estructuras realizadas con HRFA se presenta complicado dada la nula posibilidad de visualizar la distribución y orientación de las fibras dentro del elemento. Se han desarrollado multitud de métodos que

permitan estudiarlos de manera aproximada. Éstos difieren entre sí en función de la técnica aplicada y los parámetros a medir. Estos métodos se pueden clasificar como directos o indirectos y destructivos o no destructivos.

Dado que lo prioritario es garantizar la seguridad estructural, es habitual realizar ensayos a rotura que permitan determinar la resistencia del hormigón. La adición de fibras no parece aportar un incremento apreciable en la resistencia a compresión [Bencardino et al (2008)]. El ensayo a flexotracción en sus múltiples variantes (ensayo a tres puntos, ensayo a cuatro puntos, etc.) permite determinar las resistencias residuales que sirven de datos de entrada para caracterizar el comportamiento del material en función del modelo constitutivo adoptado. La dificultad de realizar esta caracterización sobre un elemento estructural de grandes dimensiones, sumado a probetas hormigonadas de forma paralela que no son representativas del elemento real, exigen desarrollar nuevas técnicas.

Estas técnicas lideran el esfuerzo por emplear métodos indirectos no destructivos, que permitan definir la distribución y orientación de las fibras a lo largo de la masa. Dado que la cuantía de fibras, en función de la orientación, es proporcional a la resistencia a tracción del material, se considera posible establecer la correspondiente correlación. Se analizan a continuación, algunos de los métodos adoptados para el control de calidad del material.

- Extracción de fibras

El método más directo de entre los aquí presentados, se basa en la extracción de las fibras de entre la masa para proceder a su pesado y estimación de la cuantía dispuesta [Soroushian and Lee (1990)] [Kooiman (2000)]. Este procedimiento se puede realizar sobre la masa fresca y en el hormigón endurecido de acuerdo a la norma UNE-EN 14721. Mediante lavado de la pasta en el primer caso, y machacando las probetas en el segundo, se consigue separar y extraer manualmente o con ayuda de un imán las fibras del hormigón. La densidad de fibras se obtiene de la división del peso de las fibras y el volumen de hormigón estudiado. La orientación resulta imposible de determinar de acuerdo a este método. De forma añadida el estudio de la masa fresca, impide analizar la variabilidad en la distribución de fibras motivada por el procedimiento de ejecución empleado.

- Métodos estereológicos

Los principios del método estereológico [Stroeven (2009)] establecen la posibilidad de determinar la densidad y orientación de las fibras dentro de la pieza de hormigón en base al estudio de secciones planas. Generalmente, estas secciones consisten en las caras generadas mediante el corte realizado sobre las probetas, aunque varios estudios emplean imágenes radiográficas [Stroeven and Shah (1978)] [Robins et al (2003)] [Vandewalle et al (2008)] realizadas al elemento. Es un método interesante que introduce el concepto de factor de orientación aplicado en posteriores estudios para relacionarlo con el comportamiento estructural del material. El empleo de fibras de pequeño diámetro y grandes cuantías para desarrollar hormigones de altas prestaciones, puede ralentizar el, ya de por sí, áspero procedimiento de ensayo. Para evitar dichas complicaciones se

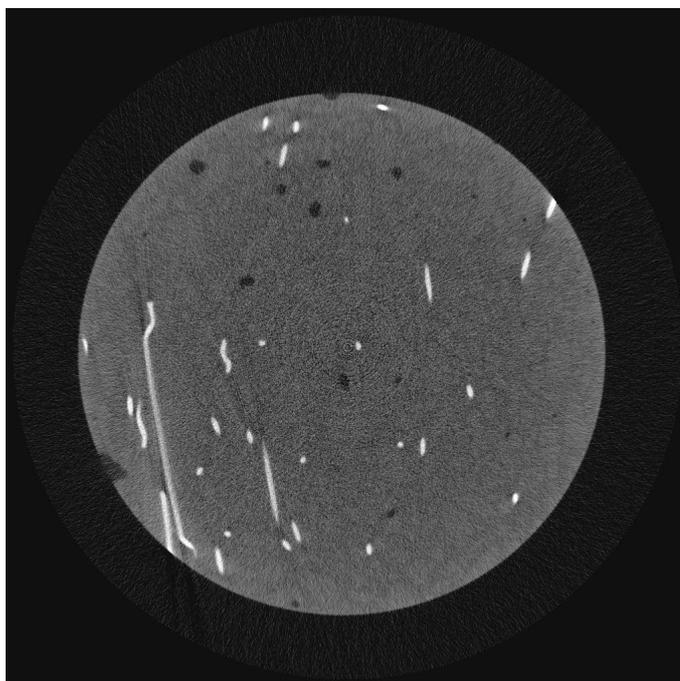


Figura 2.11: TAC sobre probetas de HRFA.

pueden emplear herramientas de análisis de imágenes digitales como los mencionados en [Mlekusch (1999)].

- Tomografía Axial Computerizada

Otra posible técnica consiste en la reconstrucción realizada en base a imágenes radiográficas, denominada Tomografía Axial Computerizada (TAC) [Stähli et al (2008)] [Farhat et al (2007)] y ampliamente empleado en estudios clínicos. El TAC se centra en el estudio de imágenes obtenidas repetidamente para secciones de reducido espesor a lo largo de la probeta. El post-procesado de dichas imágenes planas, permite la reconstrucción tridimensional del conjunto (Figura 2.11) con gran fiabilidad sobre el contenido de la muestra. Sin embargo, su elevado coste y no poder ser empleado en elementos de gran escala impide su uso como técnica de control.

- Métodos magnéticos

Los métodos inductivos propuestos en [Torrents et al (2012)] y [Ferrara et al (2012)] permiten el estudio de la densidad y orientación de las fibras en probetas cúbicas y elementos superficiales de HRFA. La técnica resulta sencilla y no requiere de complejas configuraciones, ni acoplamiento entre la aparatada y la pieza. El procedimiento consiste en hacer pasar un campo magnético a través del hormigón y medir la variación de la inductancia generada. A mayor variación, más elevada será la densidad de fibras ya que éstas alteran el campo magnético para el que el hormigón es "transparente".

- Espectroscopía de impedancia en corriente alterna (AC-IS)

La técnica AC-IS puede ser empleada en múltiples aspectos tales como el desarrollo de la hidratación de los componentes del hormigón, la estructura de poros, la fisuración o la difusividad de ion cloruro [Ozyurt et al (2006a)]. Pero su práctica también permite monitorizar la orientación de las fibras en elementos estructurales de HRFA [Ozyurt et al (2006b)] [Ferrara et al (2008)]. Parece una técnica prometedora, pero la configuración del ensayo debe ser ajustada para cada geometría de fibra y tamaño del elemento.

- Resistividad eléctrica

El estudio de la resistividad eléctrica ofrecida en varias direcciones, permite analizar la posible orientación de las fibras en elementos de HRFA [Lataste et al (2008)]. El contacto de los electrodos se mejora mediante el empleo de un electrolito, que permite estimular la intensidad eléctrica más correcta por parte de estos. Otros electrodos se encargan de recibir la señal, que se procesa para obtener los resultados. Como otras técnicas de reflexión, la sensibilidad disminuye considerablemente con el espesor del elemento.

- Línea de transmisión coaxial en circuito abierto

La reflectometría de ondas electromagnéticas de microondas en una línea de transmisión coaxial acabada en circuito abierto [Van Damme et al (2004)], permite analizar la onda reflejada por el material en base a una onda previamente emitida por el sensor coaxial abierto. Los sensores empleados en los estudios hasta la fecha, tienen limitada la penetración de la onda en función de sus propias dimensiones. Es por ello, que esta técnica únicamente aporta información superficial del elemento a caracterizar.

- Antenas de ondas guía

El empleo de antenas de ondas guía, permite analizar la alteración de la señal emitida al atravesar un medio como el HRFA [Roqueta et al (2010)]. Las propiedades dieléctricas del compuesto difieren en función de variables como la humedad, frecuencia del estudio y, sobre todo, cuantía de fibras. Estas últimas aportan una permitividad variable al medio de estudio. Aunque aún presenta sus limitaciones, parece una técnica interesante que permite mapear las estructuras en base a microondas transmitidas, a través del espesor del elemento con antenas emisora y receptora a cada lado. Resulta posible determinar zonas con diferentes densidades, pero carece de los suficientes datos para estimar su orientación.

Como resumen, el análisis de las propiedades eléctricas y magnéticas del material a caracterizar permiten el empleo de nuevos métodos de control. Evidentemente, algunos de estos métodos son aplicables o más adecuados cuando el refuerzo del hormigón se realiza por medio de fibras ferromagnéticas como son las metálicas. Esto se debe a que la respuesta frente a ondas o señales necesita cierto contraste, siendo más notoria esa diferencia entre fibras metálicas y hormigón. Todos ellos son ciertamente recientes dado el auge de las investigaciones en torno al HRF de manera genérica. Cabe destacar la irrupción de los métodos magnéticos, línea que se ha abierto desde dos equipos investigadores,

al menos en conocimiento del autor, distintos por caminos paralelos, pero no idénticos. Varios autores [Pujadas et al (2011)] han comprobado la idoneidad del método para determinar la cuantía y orientación de las fibras en probetas cúbicas de 150 mm de lado. Otros [Faifer et al (2011)] han desarrollado algo similar para determinar la orientación preferente de losas de pequeño espesor. La combinación de ambas líneas parece ser el camino a seguir para casos como el expuesto en la presente Tesis Doctoral, dado que se emplean superficies y espesores importantes.

2.3. Características del HAC

El Hormigón Autocompactante (HAC) fue desarrollado en Japón durante finales de la década de 1980 [Self-Compacting Concrete European Project Group (2005)]. Se trata de un hormigón, que presenta una gran fluidez y capacidad para llenar el encofrado y compactarse bajo su propio peso. Todo ello, sin que ocurra un indeseado bloqueo de la masa al atravesar las zonas armadas. Su origen radica en el interés de mejorar la durabilidad de las estructuras de hormigón, para lo cual se requería de mano de obra especializada que realizase una adecuada compactación [Okamura and Ouchi (2003)]. El primer prototipo de HAC fue diseñado en Japón en el año 1988 [Ozawa et al (1989)]. Su empleo es diferente en función del país. En Europa, se introdujo a través de los países del norte, como el primer puente construido por completo mediante el uso de HAC en Suecia, considerado como el primero fuera de Japón [Billberg (1999)]. En un inicio se denominó como Hormigón de Altas Prestaciones, hasta que estudios paralelos emplearon la misma designación para hormigones de alta durabilidad con reducidas relaciones agua/cemento [Gagne and Pigeon (1990)]. En la actualidad este tipo de hormigones es más conocido de acuerdo a sus propiedades de autocompactabilidad. El desarrollo de estos hormigones ha venido ligado a la investigación del sector químico, que ha profundizado en el campo de nuevos aditivos reductores de agua de alta actividad con idea de reducir la floculación de las partículas, dispersando el cemento.

Este tipo de hormigones debe su notoriedad debido a que cumple ciertos requisitos en estado fresco. El hormigón debe ser capaz de rellenar el encofrado sin ayuda externa y con un alto nivel de acabado, denominándose a esta característica capacidad de relleno. Al mismo tiempo, se le exige discurrir a través de la armadura de refuerzo dispuesta en el elemento estructural, sin que ocurra el bloqueo de los agregados de mayor tamaño, propiedad conocida como capacidad de paso. Y su tercera propiedad a cumplir se centra en su resistencia a la segregación, garantizando la homogeneidad de su composición durante el flujo como una vez detenido. De acuerdo a la vigente EHE dentro de su Anejo nº17, la tipificación de dichos hormigones es similar a la de los hormigones vibrados, denotando su mayor fluidez en el campo relativo a la consistencia (Ecuación 2.3a). De manera complementaria, es posible especificar el grado de las propiedades requeridas (Ecuación 2.3b). En este último caso, las clases se definen de acuerdo a las Tablas 2.1 a 2.3.

$$T - R/AC/TM/A \quad (2.3a)$$

$$T - R/(AC - E + AC - V + AC - RB)/TM/A \quad (2.3b)$$

| Clase | s/UNE 83.361 |
|-------|---|
| AC-E1 | $550 \text{ mm} \leq D_f \leq 650 \text{ mm}$ |
| AC-E2 | $650 \text{ mm} < D_f \leq 750 \text{ mm}$ |
| AC-E3 | $750 \text{ mm} < D_f \leq 850 \text{ mm}$ |

Tabla 2.1: Clases de escurrimiento.

| Clase | s/UNE 83.361 | s/UNE 83.364 |
|-------|--|---|
| AC-V1 | $2.5 \text{ s} \leq T_{50} \leq 8 \text{ s}$ | $10 \text{ s} \leq T_v \leq 20 \text{ s}$ |
| AC-V2 | $2 \text{ s} < T_{50} < 8 \text{ s}$ | $6 \text{ s} \leq T_v \leq 10 \text{ s}$ |
| AC-V3 | $T_{50} \leq 2 \text{ s}$ | $4 \text{ s} \leq T_v \leq 6 \text{ s}$ |

Tabla 2.2: Clases de viscosidad.

| Clase | Exigencia | s/UNE 83.362 | s/UNE 83.363 |
|--------|-----------------------|-----------------------------------|--------------|
| AC-RB1 | TM > 20 mm o | $D_{Jf} \geq d_f - 50 \text{ mm}$ | ≥ 0.80 |
| | 80 mm < paso < 100 mm | (anillo de 12 barras) | (2 barras) |
| AC-RB2 | TM \leq 20 mm o | $D_{Jf} \geq d_f - 50 \text{ mm}$ | ≥ 0.80 |
| | 60 mm < paso < 80 mm | (anillo de 20 barras) | (3 barras) |

Tabla 2.3: Clases de resistencia al bloqueo.

Esta nueva tecnología del hormigón, permite eliminar la fase de vibrado y mejorar la calidad del hormigón a costa de una dosificación más elaborada y compleja. Dichos beneficios pueden redundar incluso en aspectos económicos (reducción de mano de obra), temporales (reducción de plazos), medioambientales (reducción de ruidos en la obra) y relativos a la seguridad y salud laboral (síndrome del dedo blanco). Para contrarrestar la potencial segregación debido a la gran fluidez que se confiere a dichos hormigones, es necesario una gran cohesión de los componentes de la masa. Además de las ventajas mencionadas, desde el punto de vista estructural también adquiere gran interés dado que su microestructura se ve mejorada [Skarendahl (2003)].

A medida que el cemento se hidrata, las propiedades reológicas del HAC varían reduciendo su fluidez. Esta mayor fluidez inicial, origina unos mayores empujes en los encofrados. El HAC es considerado un material tixotrópico, que regenera su estructura en reposo, pero que un aporte de energía permite activar su capacidad de fluidez.

Las fibras constituyen un agregado más, pero con una relación de aspecto elevada que difiere respecto a la forma de los áridos. Añadir las fibras en la matriz de hormigón origina reducir de manera notoria la docilidad del mismo, dificultando su autocompactabilidad.

2.3.1. Métodos de diseño

Cada región ha desarrollado sus propios métodos de diseño, generalmente empíricos, para dosificar hormigones con propiedades de alta fluidez, pero cumpliendo los requisitos expuestos anteriormente. Como punto de partida es posible diseñar HAC con las materias primas habituales en los hormigones or-

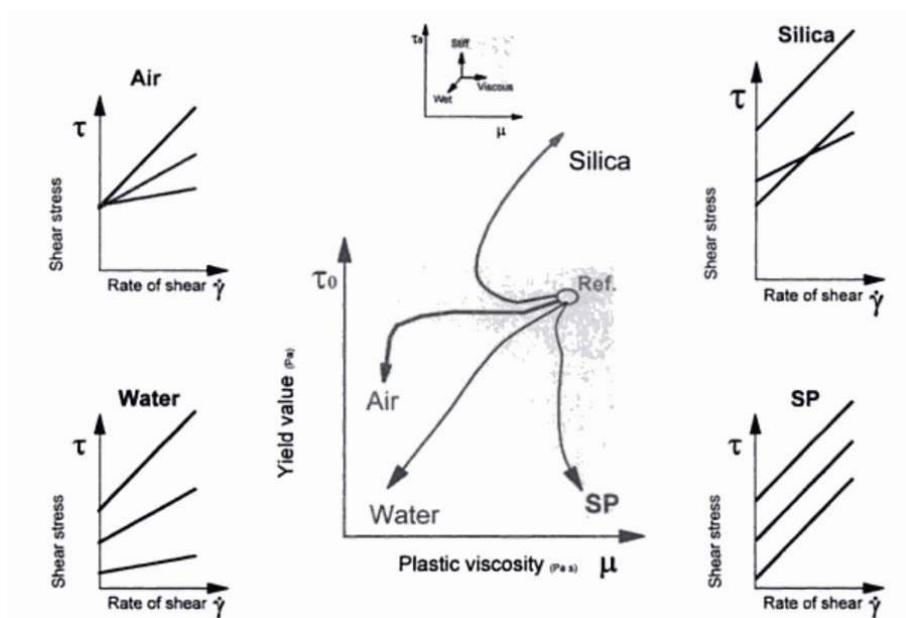


Figura 2.12: Influencia de varios de los componentes en el HAC [Wallevik (2003)].

dinarios. Si bien, por ejemplo, es preferible emplear áridos rodados en lugar de machacados, puesto que ofrecen menor resistencia al flujo. La base de todos ellos consiste en la optimización del esqueleto granular, a fin de reducir los espacios entre agregados de la matriz. Para ello, lo más habitual suele consistir en reducir el contenido de árido grueso y su tamaño. Al mismo tiempo, se requiere una gran cantidad de partículas finas, aportadas en forma de cemento, filler o adiciones como cenizas volantes, humo de sílice, etc. Los aditivos superplastificantes permiten reducir la demanda de agua de los finos, mientras que los aditivos moduladores de viscosidad permiten reducir dichas cantidades de finos a un intervalo entre $250\text{-}500 \text{ kg/m}^3$ [ACHE (2008)].

Es habitual, que el esqueleto granular formado por los áridos (arena y grava) se optimice por una parte y se combine con una pasta (agua, aditivos y finos) diseñada a tal efecto. Esta pasta es la encargada de lubricar los áridos, menos voluminosos éstos, para reducir la fricción entre ellos y posibilitar el movimiento global de la masa con notable fluidez. Los criterios de durabilidad y/o resistencia establecen relaciones agua/cemento máximas, por lo que la fluidez necesaria se conseguirá en base a los aditivos superplastificantes mencionados. Siendo cemento y aditivos los componentes más caros del hormigón, las opciones más económicas se centran en la reducción de su contenido porcentual.

De acuerdo a [Pettersson et al (1996)], primeramente se estima el contenido mínimo de pasta para rellenar los huecos de una cierta granulometría e incluso cubrir la superficie de los áridos. A continuación, se define la composición de dicha pasta, empleando un viscosímetro de pastas para ajustar el contenido de aditivos y posteriormente, contrastar los resultados sobre hormigones mediante ensayos ingenieriles.

Este método parte del trabajo realizado por [Okamura and Ouchi (2003)]

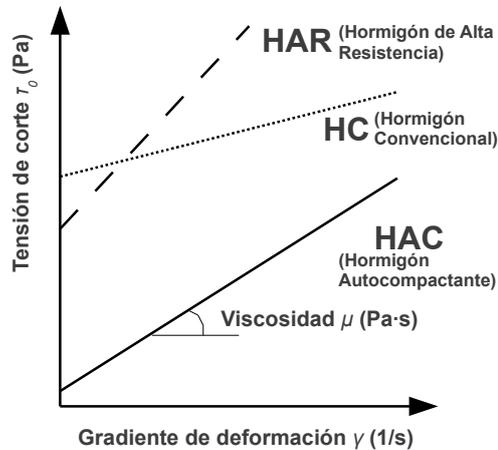


Figura 2.13: Comparativa de la reología de diversos hormigones [Wallevik (2003)].

como pioneros del HAC. El método racional propuesto establece desde el inicio la cantidad de árido grueso (50% del volumen sólido total) y fino (40% del volumen del mortero). Para garantizar las propiedades requeridas se realizan ensayos sobre la pasta a fin de determinar la cantidad de superplastificante.

Existen otros métodos como el de [Domone et al (1999)] o [Gomes et al (2001)] que mediante diversos procedimientos permiten diseñar HAC de manera más o menos eficiente. Recientemente, y en vista de las ventajas que aporta el HACRFA, se han publicado estudios que enfocan su investigación en el diseño de la dosificación de los mismos [Ferrara et al (2007)] en base a un modelo reológico de la pasta [Bui et al (2002)].

2.3.2. Reología del HAC

Una vez establecidos los aspectos básicos en la dosificación de estos hormigones, resultan evidentes varias características de su reología. Tal y como muestra la Figura 2.13, la tensión de corte o umbral del hormigón autocompactante es mucho más reducida que en los hormigones convencionales a fin de permitir su movilidad. Al mismo tiempo, y en base a la superior cantidad de finos empleada, la viscosidad aumenta para aportar cohesión a la masa y evitar la segregación.

La tensión de corte alcanza varias decenas como máximo pero puede resultar incluso nula. Se debe destacar que ambos parámetros resultan casi excluyentes, es decir, para tensiones de corte elevadas ($\tau_0 \approx 60$ Pa) la viscosidad es muy reducida ($\mu \approx 15$ Pa·s), mientras que para viscosidades elevadas ($\mu \approx 120$ Pa·s), la tensión de corte es nula o casi nula (Figura 2.14). Los factores clave para garantizar la estabilidad del hormigón evitando su segregación son disponer de una alta tensión de corte, una alta viscosidad, la tixotropía del material, el efecto *lattice* o una reducida habilidad para migrar a zonas de deformación tangencial [Wallevik (2003)]. Una sobredosis de los indispensables aditivos superplastificantes, puede acarrear la segregación de la masa.

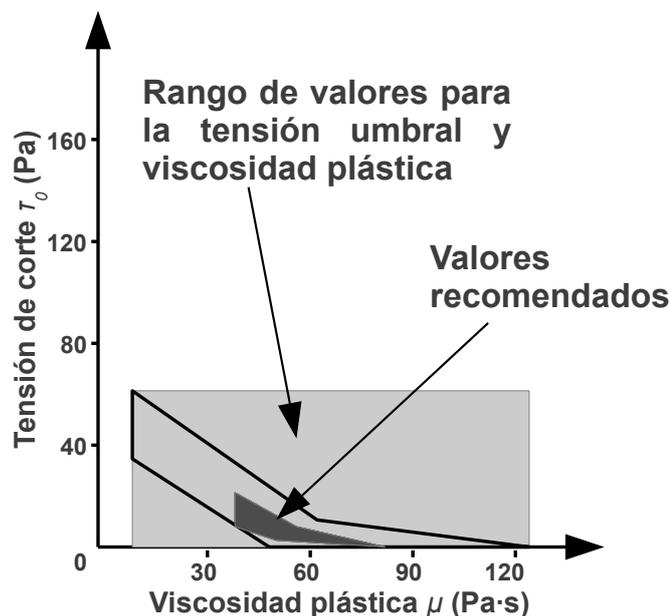


Figura 2.14: Rango de valores idóneos para el HAC [Wallevik (2003)].

Es habitual emplear reómetros que permiten analizar la totalidad de la reología del hormigón a diferencia de lo que ocurre con los viscosímetros. Sin embargo, razones económicas y prácticas inducen a emplear ensayos simples (escurrimiento, embudo en V, etc.) que aportan estimaciones sobre los parámetros requeridos. Ante los detractores del empleo de ensayos ingenieriles para la determinación de dichos valores, es preciso mencionar que dichos instrumentos no aportan un valor exacto, ya que los resultados difieren entre ellos [Ferraris and deLarrard (2001)]. Aún así, los rangos de valores de hormigones estudiados con diferentes reómetros se mantienen [Roussel (2007b)]. Entre los reómetros más habituales se pueden mencionar el BML [Wallevik and Gjorv (1990)] y el BTRHEOM [de Larrard et al (1998)]. El primero emplea una geometría de dos cilindros coaxiales y el segundo se basa en la disposición de dos platos paralelos.

2.3.3. Requisitos en estado fresco

Los aspectos claves a cumplir por los hormigones autocompactantes en estado fresco son la capacidad de paso, la capacidad de relleno y la resistencia a la segregación. El hormigón debe ser capaz de fluir a través del armado dispuesto y rellenar todo el encofrado sin perder la uniformidad de la matriz.

A diferencia del hormigón convencional, el hormigón autocompactante presenta una mayor cantidad de finos y menor cuantía de árido grueso de acuerdo a la Figura 2.15. Esos finos pueden ser aportados como cemento en mayor proporción, filler mineral, cenizas volantes, etc. creando una pasta de mortero. Para que dicha pasta posea la deformabilidad requerida, es necesario el uso de

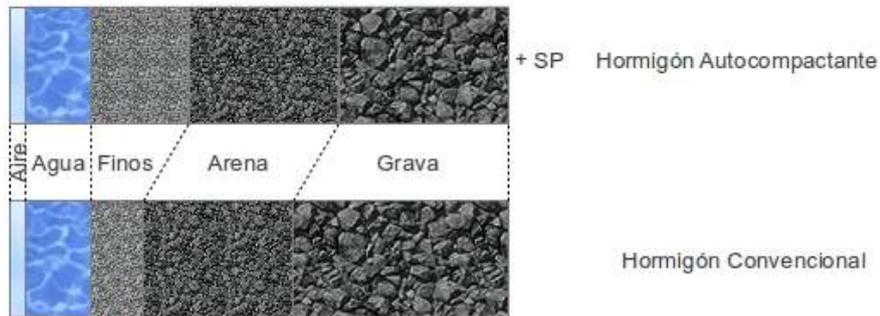


Figura 2.15: Dosificación de HAC y Hormigón convencional.



(a) Escurrimiento



(b) Anillo Japonés

Figura 2.16: Ensayos en estado fresco del HAC.

superplastificantes, que modifiquen la viscosidad de la masa en estado fresco. La adición de fibras, sin embargo, origina una notable reducción en la docilidad del hormigón, reduciendo su autocompactabilidad.

La caracterización de sus propiedades se realiza mediante diversos métodos de ensayo. En lo que se refiere a su normalización e inclusión en las normas UNE, se contemplan el ensayo de escurrimiento (UNE 83.361), el escurrimiento con el anillo Japonés (UNE 83.362) (Figura 2.16), la caja en L (UNE 83.363) y el embudo en V (UNE 83.364). Además de estos ensayos, existen otros múltiples (caja en U, tubo en U, ensayo de la columna, ensayo Orimet, caja de relleno, estabilidad con tamiz, ensayo de control al 100%, etc) ampliamente recogidos en estudios varios [Bartos (1993)] [Yurugi and Sakai (1998)].

El ensayo de escurrimiento resulta el más común, debido a que para su ejecución se emplea el cono de Abrams. Se trata de reproducir el ensayo de consistencia habitual en hormigones ordinarios, pero midiendo en este caso el tiempo que transcurre hasta que el hormigón forma una circunferencia de 500 mm de diámetro (T_{50}) y el diámetro final cuando se detiene su flujo (D_f) (Tabla 2.1), en lugar de cuantificar el asiento puesto que éste resulta muy elevado. Este procedimiento posibilita detectar posibles segregaciones de la masa además de evaluar su fluidez. Repitiendo el ensayo e interponiendo el anillo Japonés en el discurrir del hormigón, permite además analizar su capacidad de paso (Tabla

2.2). La capacidad de paso o resistencia al bloqueo en diversas circunstancias se estudia de manera complementaria mediante los ensayos de embudo en V y la caja en L.

2.4. Dinámica de fluidos computacional

En el caso que atañe a la presente Tesis Doctoral se recurre a la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) para resolver el movimiento del HAC. Existen diferentes técnicas, que se centran en el estudio de un fluido, de partículas discretas o de partículas suspendidas en un medio [Gram and Silfwerbrand (2011)]; todas ellas tienen sus pros y sus contras, que se mencionan a continuación.

■ Fluido Homogéneo

La simulación realizada con un único fluido se basa en la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes en cuanto a masa, momento y energía se refiere, mediante el empleo de métodos de resolución numérica. Como resultado se obtienen los campos de velocidad, presión y temperatura. Los habituales parámetros a introducir consisten en la densidad, viscosidad, calor específico y conductividad del fluido. Los métodos de discretización contemplan el Método de Volumen Finito, el Método de Elementos Finitos y el Método de Diferencias Finitas [Wendt (2009)]. Esta línea se ha empleado profusamente para el estudio de fundición [Tie et al (2006)] [Lewis et al (1997)], de plásticos [Luoma and Voller (2000)], etc.

Respecto al hormigón, dada su matriz heterogénea, las investigaciones han sido más complejas. [Tanigawa and Mori (1986)] fueron los primeros en simular el flujo del hormigón mediante Métodos de Elementos Viscoplasticos Finitos (VFEM) y, posteriormente, el Método de Elementos Viscoplasticos Divididos (DVEM) para flujo bidimensional. La superficie libre se corresponde con la deformación de la malla en el primer caso y con el desplazamiento de marcadores virtuales en el segundo. Recientemente, [Thrane (2007)] ha simulado el hormigonado de un muro con un considerable volumen de hormigón, modelizando un único fluido con comportamiento Bingham. El resultado real del ensayo se muestra en la Figura 2.17 con las indicaciones recogidas del análisis realizado sobre el mismo. Es habitual el empleo de la técnica VOF (Volume of Fluid) [Hirt and Nichols (1981)] unido a una malla indeformable para realizar el estudio de dos fases como pueden ser el hormigón y el aire, que se encuentra en el encofrado antes del hormigonado.

■ Partículas Discretas

Desarrollados en un inicio para el estudio de materiales granulares secos (silos, alimentación, etc.) [Vu-Quoc et al (2000)] [Fortin et al (2005)], su empleo ha traspasado las fronteras para modelizar el hormigón. En cuanto al HAC se refiere, su comportamiento difiere del correspondiente a un material granular debido al incremento de áridos finos en la fase de dosificación en detrimento del árido grueso. Quizás resulte más adecuada esta aproximación en hormigones convencionales donde el comportamiento está dominado por la mayor cuantía de partículas granulares. Aún así, varios estudios apuntan a su adecuación para simular el flujo del HAC.

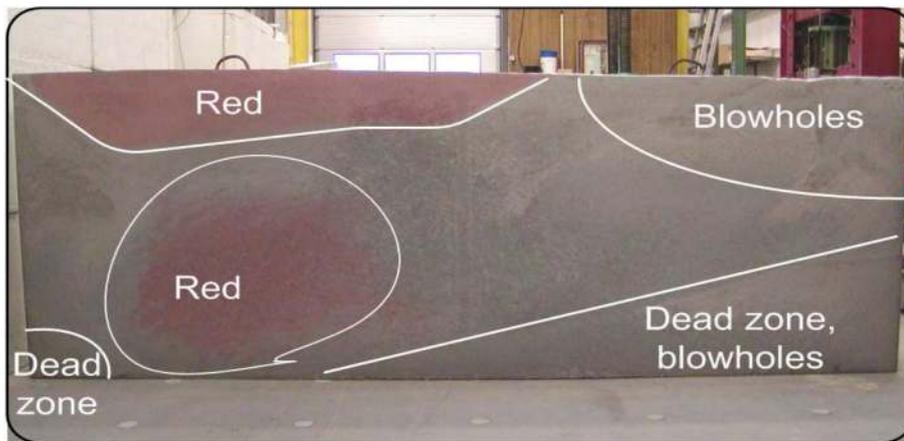


Figura 2.17: Hormigonado de muro de HAC [Thrane (2007)].

Posteriores desarrollos derivaron en el Método de Elementos Distintos (DEM) o discretos, donde la fase del hormigón se divide en pasta de mortero y árido grueso como elemento diferenciado [Chu and Machida (1998)]. El método DEM, estudia la trayectoria de las partículas de manera independiente. En el caso de entrar en colisión entre ellas, se determinan las fuerzas de contacto para determinar la desviación de su trazado original. Aunque resulta adecuado para grandes deformaciones, no existen ligazón entre las partículas. [Noor and Uomoto (1999)] han simulado los ensayos característicos para determinar las propiedades en estado fresco del HAC descritos en el Apartado 2.3.3 a partir de los trabajos realizados por [Chu et al (1997)]. El mortero se discriminó para partículas menores de 7.5 mm, formando el resto la fracción gruesa del modelo. Posteriormente se han realizado más estudios por [Petersson and Hakami (2001)] y [Petersson (2003)].

La Dinámica de Partículas Disipativa (DPD) simula la dinámica y reología de los fluidos en base a una técnica de simulación mesoscópica [Hoogerbrugge and Koelman (1992)], que también se ha empleado para simular el fluido y los agregados por separado [Martys and Ferraris (2002)]. [Satoh and Majima (2005)] han intentado relacionar valores teóricos de viscosidad con los resultados obtenidos mediante el empleo de este método. Otros estudios del método y su aplicación con el HAC se recogen en [Ferraris and deLarrard (2001)] y [Ferraris et al (2001)].

- Partículas Suspendidas en un medio

Dado que el comportamiento real del HAC se asemeja más a áridos de reducido tamaño dentro en una pasta de mortero, otra alternativa de estudio reside en la simulación de partículas en suspensión dentro de un fluido viscoso. En esta línea, [Mori and Tanigawa (1992)] se basan en el Método de Elementos Viscoplasticos en Suspensión (VSEM) para simular en flujo del hormigón, donde los agregados se modelizan como partículas esféricas suspendidas en la fase mortero. De igual forma [Moresi et al (2003)] modifican los ampliamente conocidos Métodos de Elementos Finitos (FEM),

integrando partículas Lagrangianas para poder simular grandes deformaciones (FEM-LIP) de forma genérica en geomateriales viscoelásticos. [Dufour and Pijaudier-Cabot (2005)] se han basado en este método para simular diferentes tipos de hormigones (ordinario, autocompactante y de alta resistencia) mediante el modelo Bingham y en base a la integración de una partículas Lagrangianas dentro de una malla euleriana. Para ello reproducen los ensayos de escurrimiento y caja en L. Por otro lado [Laure et al (2007)] determinan con una descripción euleriana junto con una modificación del método LSM, diferencias en la orientación de las fibras en el transcurso del ensayo de escurrimiento, para fluidos newtonianos y modelizados con el modelo Herschell-Bulkley. [Švec et al (2012)] adoptan otra vía en la que en lugar de resolver las ecuaciones de Navier-Stokes, se opta por implementar el modelo Lattice-Boltzman (LBM). Para ello se emplea una modificación del Método del Límite Inmerso (IBM) en lugar de los métodos VOF y LSM, aplicados al ensayo de escurrimiento. Kulasegaram and Karihaloo (2012) desarrollan también la técnica numérica de Hidrodinámica de Partículas Suaves (SPH) para posibles simulaciones del HRF, en base a partículas Lagrangianas.

Por lo general, dichos métodos han sido utilizados y contrastados con los habituales ensayos de laboratorio del HAC [Roussel (2006)] [Roussel and Coussot (2005)] y ejemplos de literatura. Los métodos que emplean simulaciones con fluidos simples requieren menos gasto computacional, por lo que su resolución es más rápida. La modelización de partículas discretas parece estar acorde con el análisis más detallado a nivel de mesoescala [Gram and Silfwerbrand (2011)]. Por contra, resulta complicada debido a que los parámetros empleados carecen de significado físico. La suspensión de partículas suspendidas en un fluido parece la solución más realista y la que mejor refleja la naturaleza del material, aunque requiere aún de mayor desarrollo [Roussel (2007a)].

2.4.1. Fluidos no Newtonianos

Los fluidos no-Newtonianos se diferencian de los que si lo son, porque presentan un valor de tensión crítico bajo el cual no existe movimiento del fluido. Estos materiales también son llamados materiales viscoplásticos. Las ecuaciones de conservación de masa, momento y energía son las que rigen el movimiento de la masa incompresible bajo flujo laminar. Los modelos Bingham y Herschell Bulkley son los más habitualmente empleados para su simulación. Las Ecuaciones (2.4a) y (2.4b) muestran el comportamiento tensión-deformación mediante leyes discontinuas.

$$[Bingham] \rightarrow \tau = \tau_0 + \mu \cdot \gamma \quad (2.4a)$$

$$[Herschell - Bulkley] \rightarrow \tau = \tau_0 + K \cdot \gamma^n \quad (2.4b)$$

Ambos modelos son ampliamente empleados para caracterizar el hormigón. El modelo Bingham se caracteriza por emplear la viscosidad y la tensión umbral como parámetros de entrada. Los parámetros K y n del modelo Herschell-Bulkley por contra, no tienen significado físico y se deben determinar de forma experimental. El sentido físico de los datos necesarios, origina habitualmente

un mayor empleo del modelo Bingham en el caso del hormigón. Muchos estudios han intentado establecer unas ecuaciones para determinar la tensión umbral de un HAC a partir de ensayo de escurrimiento, caja en L, caja LCPC [Roussel (2007b)] y diversas simulaciones computacionales. De las ecuaciones de [Zerbino et al (2009)] y [Sedran and de Larrard (1999)], Ecuaciones (2.5a) y (2.5b) respectivamente, se deduce que para D_f elevados en el ensayo de escurrimiento, la tensión umbral del modelo Bingham resulta negativa, lo cual resulta físicamente imposible. Se entiende que dicho modelo subestima el valor de la tensión tangencial, pero el modelo Herschell-Bulkley sin embargo, en caso de ser dilatante parece sobrestimar la tensión de corte [Feys et al (2007)]. Se aprecia la linealidad del modelo Bingham frente al Herschell-Bulkley cuyo parámetro exponencial (n) indica que se trata de un fluido dilatante cuando $n > 1$ y pseudoplástico cuando $n < 1$. En caso de ser $n = 1$, el modelo se reduce al modelo Bingham. Los fluidos dilatantes presentan un incremento de la viscosidad a mayores valores de la tensión tangencial, mientras que los pseudoplásticos se comportan de manera inversa. Numerosos autores han observado un comportamiento dilatante en el HAC [Heirman et al (2009)] [Feys et al (2009)]. A mayor viscosidad, el hormigón tiende a fluir de manera más lenta, mientras que a mayor tensión umbral, el movimiento de la masa es más limitado. La diferencia entre hormigones convencionales y hormigones autocompactantes radica en la diferencia de estos parámetros. La fluidez del HAC se debe a una menor tensión umbral del material. Al mismo tiempo, el mayor empleo de finos en la dosificación origina una masa mucho más viscosa. Varios estudios como los de [Zerbino et al (2009)], [Sedran and de Larrard (1999)] y [Kokado et al (1997)] establecen fórmulas para estimar la tensión de corte a partir del diámetro final en el ensayo de escurrimiento, según las siguientes fórmulas:

$$\tau_0 = 0,46 \cdot (649 - D_f) \quad (2.5a)$$

$$\tau_0 = (\rho + g/11740) \cdot (808 - D_f) \quad (2.5b)$$

$$\tau_0 = \frac{225 \cdot \rho \cdot g \cdot Vol^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot D_f^5} \quad (2.5c)$$

Ciertos estudios aportan modificaciones en ambos modelos para sobrellevar los problemas que ambos métodos presentan. Por un lado, [Papanastasiou (1986)] introduce un parámetro exponencial (m), con dimensiones de tiempo, que controla el crecimiento exponencial de la tensión y evita la discontinuidad de los modelos. A mayor valor del parámetro m , más se asemejará el modelo original. [Feys et al (2007)] modifican el modelo Bingham introduciendo un elemento de segundo orden, de forma que también puede ser visto como un desarrollo en serie de Taylor de segundo orden. [de Larrard et al (1998)] reducen las incógnitas del modelo Herschell-Bulkley de tres a dos, relacionando los parámetros K y n del modelo. Estos resultados se han obtenido del estudio de hormigones ensayados con diferentes reómetros.

2.5. Aplicaciones estructurales

Dentro de las aplicaciones del HRFA la mayoría se centra en su empleo como elemento de solado en pavimentos industriales y sostenimiento de túneles.

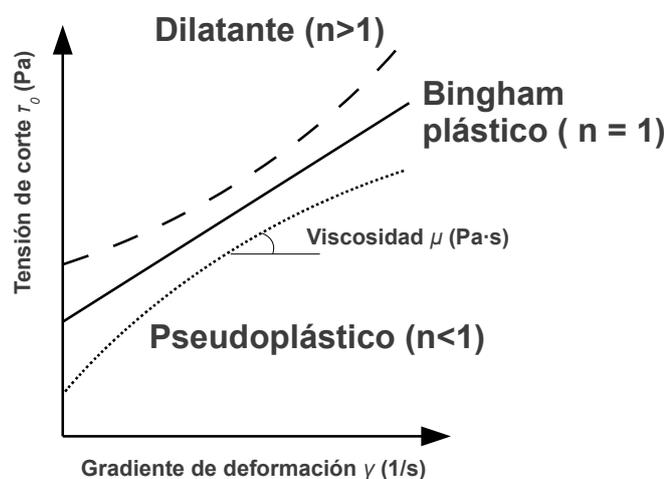


Figura 2.18: Modelos de fluidos no-newtonianos.

A parte de estos campos, pocas son las obras en aliviaderos de presas, hornos refractarios, etc., que se pueden encontrar en la literatura [ACHE (1999)]. Recientemente sin embargo, gracias al auge de las investigaciones realizadas con hormigones reforzados con fibras, cabe mencionar una obra de notable calado en el ámbito de la edificación. La primera edificación en España en la que se han empleado losas macizas de HRFA para los forjados, lo ha realizado la ingeniería LKS para su sede central en Arrasate (Gipuzkoa) y se encuentra ampliamente detallado en [Maturana (2013)].

En lo que se refiere al HAC, su empleo ha sido más extendido aunque se trate de un material más joven. Ello se debe a que para su refuerzo se emplean armaduras tradicionales y su comportamiento en estado endurecido no se ve excesivamente alterado, y en caso contrario siempre de forma positiva. Aún cuando su dosificación puede resultar complicada, su empleo genera elevados beneficios en lo que respecta a su puesta en obra (estado fresco). Es un material ampliamente empleado en la edificación, pero sobre todo en la obra civil con múltiples ejemplos [ACHE (2008)].

El HACRFA es una material que combina las características de ambas tecnologías y todavía más reciente que el mencionado en el párrafo precedente. Las pocas referencias encontradas por el autor en lo que a su utilización se refiere fuera del ámbito de laboratorio a escala pequeña de probeta, tratan de piezas pretensadas para entibación o dovelas para el sostenimiento de túneles [Grünwald (2004)] o la rehabilitación de forjados [Klein et al (2011)]. La presente investigación por tanto, pretende llenar dicho hueco en el conocimiento del HACRFA.

2.5.1. Fabricación y puesta en obra

No existen grandes estudios sobre la extrapolación de los resultados de laboratorio a la realidad de la obra. Y menos, en cuanto al hormigón autocompactante reforzado con fibras se refiere. En realidad, las dosificaciones empleadas

difieren entre los diversos países. Mientras que en Japón, Suecia y Holanda se emplean dosificaciones con escasa tensión de corte pero elevada viscosidad, debido al elevado contenido en pasta, otros países, como por ejemplo Dinamarca, proceden de manera inversa [Wallevik (2003)].

Existen diversas técnicas de amasado escalonado que mejoran las propiedades del hormigón. Los procedimientos expuestos consisten en amasar el hormigón en dos o tres fases. En el primer caso, se amasa un mortero para añadir posteriormente el árido grueso, mientras que en el segundo se obtiene una pasta de cemento, a la que posteriormente se añade la arena para obtener un mortero y finalmente se mezcla con el árido grueso. Aunque la técnica permite cierto ahorro de cemento, no existen referencias respecto al beneficio económico que aporta [Saeed (1995)].

A la salida del camión hormigonera la tasa de corte es muy elevada, aproximadamente 10 rad/s. Para dicho valor la tensión de corte no influye notablemente en el movimiento de la masa. Cuando la tasa es reducida sin embargo (aprox. 0.2 rad/s), la tensión de corte impide el movimiento además de contribuir en la estabilidad frente a la segregación. Cuando la tensión de corte es inferior a 10 Pa, puede considerarse despreciable [Wallevik (2003)]. Se entiende, por tanto, que los hormigones bombeados presentan una fluidez superior de la esperada debido a la energía aportada por el pistón de la bomba. A medida que disminuye la velocidad de la masa, disminuye también la segunda invariante del tensor deformación. Esto incrementa la influencia del valor de la tensión de corte en la reología del hormigón, aumentando su resistencia frente al deslizamiento.

Durante el transporte del hormigón hasta la obra, la reología de la masa se ve afectada. De forma contraria a lo que ocurre con el hormigón convencional, los hormigones aditivados reducen su trabajabilidad de forma más acusada, si se mantiene en movimiento [Torales-Carbonari et al (2003)].

2.6. Conclusiones finales

A lo largo del presente capítulo se ha realizado un estudio de los orígenes del HRFA y del HAC, así como de su posterior desarrollo gracias a múltiples investigaciones y su actual uso en el sector. En lo que respecta a la adición de fibras de acero como refuerzo de la frágil matriz de hormigón, cabe destacar que mecánicamente se ha demostrado que el material compuesto resultante es muy capaz de trabajar bajo grandes sollicitaciones, demostrando unas prestaciones acordes a cualquier tipo de uso. Para ello se ha diversificado el simple apelativo de HRFA hasta términos como Altas Prestaciones que denotan su marcado carácter estructural. A pesar de ello, es de recalcar que pocas han sido las pruebas o ensayos realizados sobre elementos de gran envergadura.

Sin embargo, resulta imposible disponer las innumerables fibras de manera predeterminada dentro de la masa de hormigón y visualizar a simple vista su disposición y distribución una vez fraguado el hormigón. Incluso llegan a alterar las propiedades en estado fresco del hormigón causando, en el peor de los casos, defectuosas puestas en obra. Es por ello que las actuales líneas de investigación se centran en esos dos puntos críticos; a saber, la predicción y el posterior control de la orientación de las fibras.

Las nuevas técnicas de control aportan un nuevo enfoque del material y

posibilitan la contrastación de hipótesis y resultados fuera del laboratorio y en piezas de mayor envergadura. No cabe duda, que deben desarrollarse hasta alcanzar la madurez suficiente para emplearlos de manera sistemática.

Sumando las diferencias encontradas entre el comportamiento resistente de probetas moldeadas y elementos de mayor escala y los contrapuestos criterios a la hora de establecer una ley constitutiva para el material, parece interesante la vía abierta por [Laranjeira et al (2010)] mediante un procedimiento directo o incluso la relacionada con los resultados de alguno de los novedosos métodos de control en ese sentido.

Las propiedades autocompactantes del hormigón por otro lado, se potencian de manera más tardía pero con una aplicabilidad mucho más ilustrativa y una introducción en el mercado más directa. Las ventajas que aportan este tipo de hormigones se traducen por lo general en una reducción de la mano de obra y tiempos de ejecución necesarios. No obstante, también presentan cierta complejidad en su formulación, lo que unido a un mayor costo debido al uso de mayor cantidad de finos, cemento en general, y aditivos químicos, repercute negativamente en su uso cotidiano.

La sinergia entre el HRFA y HAC resulta interesante debido a la posibilidad de aunar los beneficios de ambas tecnologías. Las dificultades inherentes a cada una de ellas no se incrementan notablemente debido a esta unión. Además la fluidez que se le exige al HAC permite forzar, en cierta medida, la orientación de las fibras, por lo que un estudio de la reología del material y una simulación de su puesta en obra, pueden permitir resolver de antemano dicha incógnita. Además del conocimiento que aporta de cara a efectuar el diseño resistente del material, se puede establecer una mejor orientación allá donde más se requiera de acuerdo al cálculo estructural del elemento.

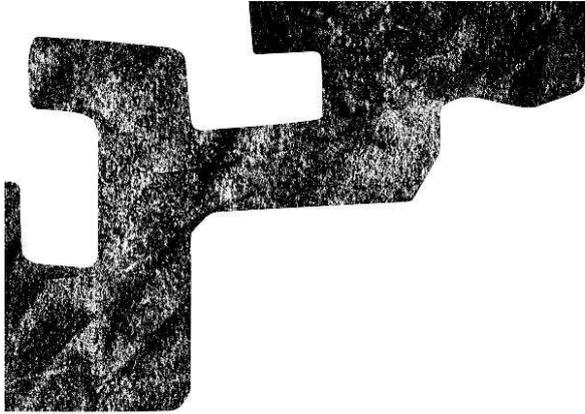
La Tesis, por tanto, tiene como objetivo demostrar la idoneidad en aplicaciones cotidianas del refuerzo de fibras para elementos de gran responsabilidad estructural, para lo que se propone su uso en depósitos de contención circulares. Se pretende demostrar el potencial de las herramientas computacionales para la predicción de la orientación de las fibras, la fiabilidad de los métodos de control de calidad sobre la estructura y probetas, al mismo tiempo que se contrasta la capacidad portante del material propuesto con los esfuerzos a los que estaría solicitado.

En este línea, se propone el estudio de un muro de hormigón realizado con la combinación de ambas tecnologías mencionadas, formando el HACRFA, de acuerdo a las condiciones propias de una puesta en obra real. Esta experiencia puede dar lugar a sentar las bases de cómo proceder en futuras realizaciones. Como paso previo, se establece una metodología de dosificación acorde a los requerimientos, en estado fresco y endurecido, de la estructura planteada y el suministro de materia prima próximo. Posteriormente, se realiza una exhaustiva campaña de ensayos no destructivos sobre el muro y las 380 probetas extraídas mediante corte del mismo. Estos ensayos se complementan con una serie de ensayos destructivos, permitiendo caracterizar cuantitativamente las propiedades mecánicas del material y realizar una correlación cualitativa con los diversos métodos de control empleados.

En espera de determinar diversos niveles de resistencia en las probetas ubicadas de manera distinta dentro del muro, se pondría en relieve la influencia del movimiento de la fluida masa en la orientación adoptada por las fibras. La simulación mediante las técnica de CFD sirve de base para cotejar los cam-

pos de velocidades y los valores de resistencia alcanzados para las diferentes posiciones.

Finalmente se realiza una recopilación de aplicaciones similares para el elemento estructural escogido como base de la presente Tesis Doctoral. Se realiza una somera comparación en lo que a aspectos económicos, de plazos de ejecución y sostenibilidad se refiere entre un depósito tradicional y la propuesta presentada en esta investigación para demostrar su idoneidad.



PARTE **III**

**Campaña experimental en
laboratorio**

CAPÍTULO 3

Selección del HACRFA

3.1. Introducción

Aun cuando existen fibras de diversos materiales (vidrio, polipropileno, etc.), las fibras empleadas en el presente estudio son de acero, considerándose más apropiadas para la responsabilidad estructural planteada. Los siguientes apartados presentan la metodología empleada para la elección del tipo de fibra entre varias de ellas y la formulación del hormigón, integrando las fibras y las propiedades autocompactantes requeridas.

3.2. Elección del tipo de fibra

Como ya se ha mostrado en el Apartado 2.2.1, existe en el mercado gran variedad de fibras que pueden considerarse estructurales. Cada tipo de fibra puede requerir una dosificación diferente, que forme hormigones con propiedades reológicas y resistentes muy diversas. Dado que el fin de la presente investigación no es realizar un estudio paramétrico de todas las combinaciones posibles de fibras y hormigones, se ha optado por analizar únicamente dos tipos de fibras en dos longitudes diferentes. Estos dos tipos de fibras han sido seleccionados en base a experiencias previas [Maturana (2013)] [Cunha et al (2010)] [Robins et al (2002)], que han aportado cierto conocimiento que permite abordar el estudio con ventaja.

Se han escogido por tanto, fibras de extremos conformados y fibras onduladas con longitudes de 50 y 60 mm en ambos casos. Las fibras han sido suministradas por ArcelorMittal, cuyas designaciones y propiedades se resumen en la Tabla 3.1.

Como se puede apreciar en los modelos tridimensionales mostrados en las Figuras 3.1a y 3.1b, los mecanismos de anclaje mecánico de las fibras respecto a la matriz difieren sensiblemente. Mientras que las fibras HE, disponen del extremo conformado que es el que se encarga básicamente de fijar la fibra en el hormigón, las fibras Tabix presentan ondulaciones en mayor número que realizan dicha función.

En las fibras tipo HE, las dimensiones del extremo conformado no varían entre las dos longitudes ensayadas. Se presupone que una longitud mayor úni-

| Designación | HE 1/50 | HE+ 1/60 | Tabix 1/50 | Tabix+ 1/60 |
|------------------------------|----------------------|----------|------------|-------------|
| Geometría | Extremos Conformados | | Ondulada | |
| Longitud (mm) | 50 | 60 | 50 | 60 |
| Diámetro (mm) | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| Longitud de onda (mm) | N/A | N/A | 8 | 8 |
| Amplitud de onda (mm) | N/A | N/A | 0.40-0.65 | 0.40-0.65 |
| Longitud de gancho (mm) | 1-4 | 1-4 | N/A | N/A |
| Profundidad de gancho (mm) | 1.80 | 1.80 | N/A | N/A |
| Relación de aspecto | 50 | 60 | 50 | 60 |
| Resistencia a tracción (MPa) | 1100 | 1450 | 1100 | 1450 |
| Número de fibras por kg | 3100 | 2600 | 3100 | 2500 |
| Longitud embebida (mm) | 1.25 | 1.50 | 1.25 | 1.50 |

Tabla 3.1: Características de las fibras empleadas.

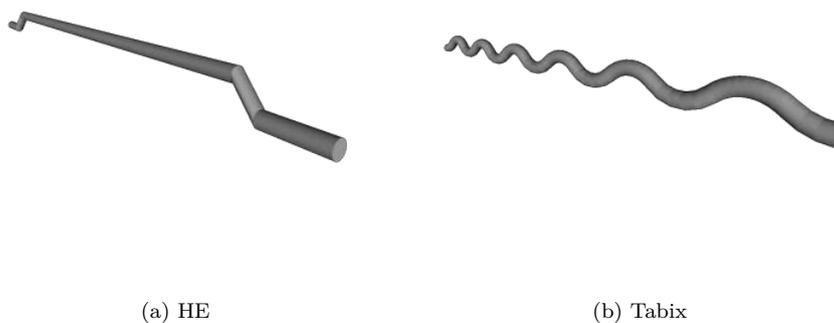


Figura 3.1: Modelo tridimensional de las fibras ensayadas.

camente presentará una mejora debido al mecanismo de adherencia. En el caso de las Tabix, la longitud de onda tampoco se modifica. Para este tipo de fibra, a mayor longitud de la fibra aumenta el esfuerzo a tracción soportado, dado que se incrementa la longitud de adhesión, pero también se dispone de más ondulaciones para su anclaje.

La elección del tipo de fibra más idóneo para la aplicación propuesta se fundamentará en base a los resultados obtenidos en una serie de ensayos a

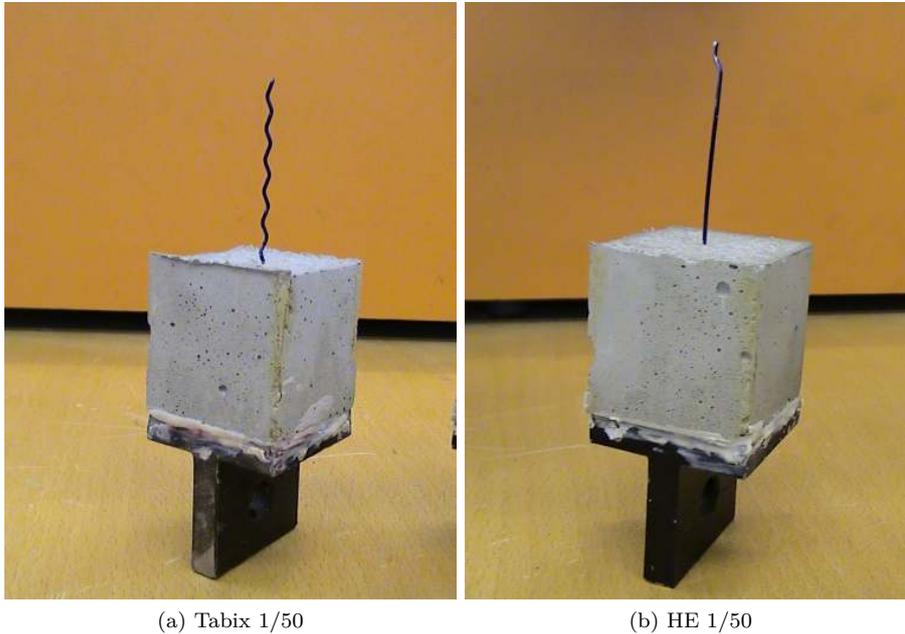


Figura 3.2: Fibras embebidas en mortero y útiles de amarre.

arrancamiento. Se debe hacer constar, sin embargo, que el presente ensayo permite determinar cual es la fibra más acorde a las condiciones de uso previstas, pero no es representativo del HACRFA. Es decir, los resultados obtenidos no son adecuados para el diseño del material compuesto, que debe ser analizado en su conjunto.

3.2.1. Configuración y procedimiento

Existen diversas configuraciones para el ensayo a arrancamiento de las fibras [Cunha (2010)]. En los ensayos que se describen a continuación, se ha optado por embeber las fibras en mortero y pegar éste a unos útiles a fijar en la máquina de ensayo, tal y como se muestra en la Figura 3.2. El extremo libre de la fibra se aprieta con una mordaza y se realiza el ensayo tirando de ella. Todas las fibras se alinean paralelamente a la dirección de la carga.

Dado que tras la generación de una fisura en el hormigón las fibras tienden a deslizar por el extremo menos embebido, se entiende que como máximo esta longitud será la mitad de la longitud de la fibra. En las zonas más solicitadas del material la fisura se origina en la sección más débil. Todo ello depende de una combinación de diversas variables, como son el número de fibras, posición de las fibras (zona traccionada/comprimida), resistencia de la matriz, resistencia de las fibras, longitud embebida de las fibras, etc.

A lo largo de la fisura, la longitud de las fibras en el extremo menos embebido será como máximo la mitad de la longitud de la fibra como ya se ha comentado. Pero como mínimo su límite estaría en una longitud embebida nula. Por ese motivo, los ensayos se han realizado con una longitud embebida media, el cuarto de la longitud de la fibra, evitando en cierta medida la posición más favorable.



Figura 3.3: Máquina de ensayo empleada para el arrancamiento de las fibras.

Se plantean entonces, 10 ensayos de arrancamiento para cada tipo de fibra como campaña experimental. Para un correcto posicionamiento dentro del mortero, las fibras han sido suspendidas de unas planchas de cartón-pluma. Los ensayos se han realizado en una máquina LLOYD M5K (Figura 3.3) con capacidad de 30 KN. Se ha incorporado una célula de carga HBM de 5 KN, para aportar mayor precisión en las medidas. La carga fue aplicada mediante un control por desplazamiento a una velocidad de 0.5 mm/min hasta el valor de carga máxima y a 4 mm/min posteriormente, hasta la total extracción de la fibra.

3.2.2. Resultados de arrancamiento

El comportamiento de cada tipo de fibra presenta una alta dispersión. La curva carga-desplazamiento puede ser fácilmente afectada debido a ligeros cambios en la inclinación y la longitud embebida de la fibra. Aún así, varios de los aspectos mencionados en el apartado precedente se confirman en vista de los valores obtenidos.

Estudios previos [May (2008)] constatan que las fibras onduladas presentan

mayores capacidades de transmisión de carga en cuanto a longitudes elevadas se refiere, respecto a los resultados aportados por las fibras de extremos conformados.

Sin embargo, para longitudes reducidas como las ensayadas en el presente estudio, ratifican que las diferencias se reducen notablemente. Ello se debe, como ya se ha comentado, a que varía la componente mecánica del comportamiento de arrancamiento de manera diferente en cada tipo de fibra. Mientras que las fibras onduladas requieren de mayores longitudes para desarrollar toda su capacidad, es decir, mayor número de ondas embebidas, las fibras con los extremos conformados básicamente necesitan tener embebido el gancho para su correcto anclaje y que mayores longitudes no aportan un incremento sustancial de la capacidad portante, tal y como ya se menciona en [Cunha et al (2010)].

Otro aspecto a destacar es que las fibras se enderezan sujetas a una deformación plástica que se produce al hacer pasar las fibras por el conducto recto de la matriz. En el caso de las fibras con extremos conformados, es el gancho lo único que se endereza, mientras que las fibras onduladas adoptan una alineación recta para cada una de las ondas embebidas. Esto no es lo más apropiado para la aplicación propuesta, ya que el riesgo de filtraciones del contenido hacia el exterior, se puede ver acrecentado.

En la Figura 3.4 se resumen la totalidad de los ensayos de arrancamientos realizados. Los resultados se agrupan por tipo y longitud de fibra (líneas discontinuas) y se representa, así mismo, la media de los resultados (líneas continuas) para cada una de las tipologías ensayadas. En cuanto a la resistencia del acero de cada tipo de fibra, las cargas bajo las que se produce el deslizamiento de la fibra son notablemente menores a las que producirían su rotura. Es por ello, que se prefiere el empleo de acero de bajo contenido en carbono.

Por lo tanto, y en concordancia con todo lo anteriormente expuesto, se ha optado por emplear las fibras de extremos conformados de longitud más reducida, cuya denominación se corresponde con HE 1/50, de acuerdo a su fabricante.

3.3. Formulación del hormigón

El hormigón autocompactante reforzado con fibras de acero se ha dosificado en función de las prestaciones necesarias para la aplicación de depósito circular de contención mencionada con anterioridad. En el pésimo supuesto donde dicha estructuras de retención se destine al ámbito de las infraestructuras de saneamiento donde el ambiente resulta agresivo para el material, las exigencias de durabilidad juegan un papel muy importante en el establecimiento de requisitos básicos como dato de entrada.

Al mismo tiempo, dado que se pretende demostrar su viabilidad en una situación real de mercado, existen ciertos condicionantes que deben ser tomados en cuenta desde el inicio. Estos se centran en determinar una ubicación hipotética del proyecto, debido a que las plantas de suministro de hormigón de cada localización geográfica emplea materias primas de características, en algunos casos, realmente dispares.

Por dicho motivo, la formulación del hormigón se ha establecido en base a una estrecha relación con la empresa Financiera y Minera (FyM), del grupo Italcementi. Se ha determinado que la obra se ejecutará en la zona de influencia

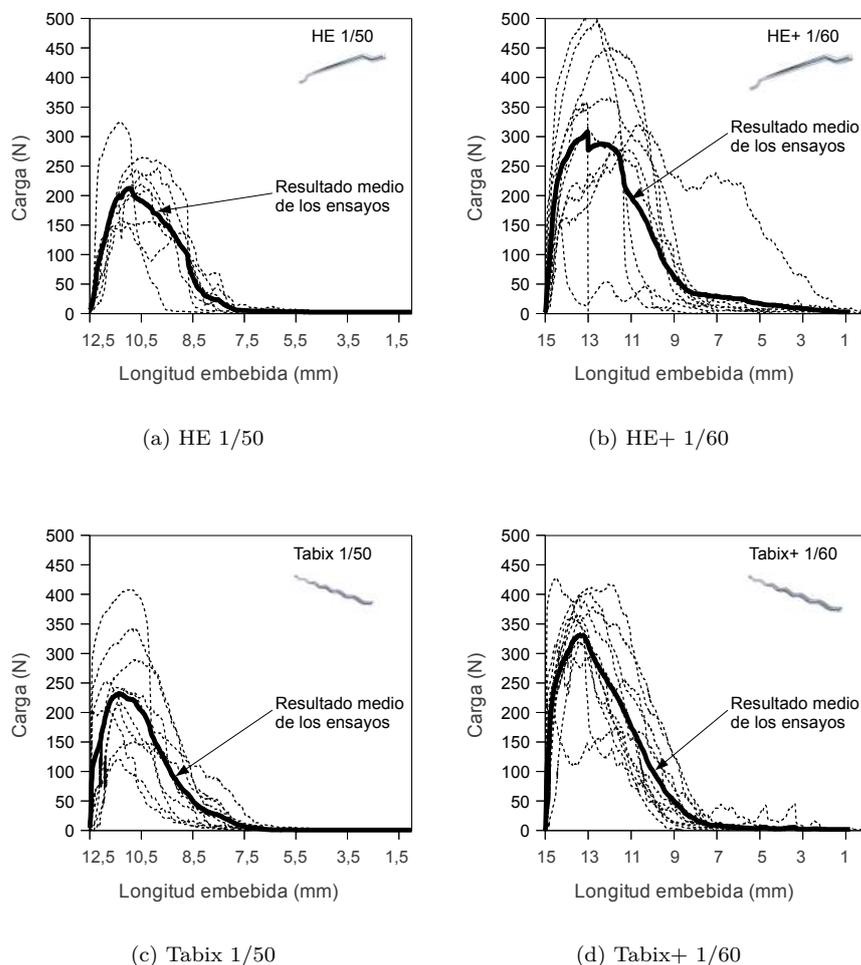


Figura 3.4: Curvas carga-desplazamiento para los diversos tipos de fibras

de su planta de Kukularra situada en Erandio (Bizkaia). De este modo, los áridos a emplear serán los habituales utilizados en la planta y su fabricación se realizará en base a los procedimientos ordinarios establecidos en su sistema de gestión. Se dispone, por tanto de áridos calizos procedentes de machaqueo con un tamaño 0/4 para la arena y 4/11 para la gravilla. El cemento se corresponde con un CEM II mixto con adiciones de escoria siderúrgica y filler calizo, una resistencia a compresión característica de 42.5 MPa y altas resistencias iniciales (CEM II/A-M(S-L) 42.5R). Las fibras se corresponden con las designadas como HE 1/50 (escogidas de acuerdo a lo expuesto en el Apartado 3.2) suministradas por la empresa ArcelorMittal.

Tal y como denota [García (2004)], aún existiendo diversos métodos de dosificación, éstos no son generalizables y las empresas del sector han establecido sus propias metodologías para obtener mejoras desde el punto de vista competitivo. Como se apreciará a continuación el procedimiento difiere de los definidos

| Tamiz | Arena 0/4 | Grava 4/11 | Combinada |
|-------|-----------|------------|-----------|
| 31.5 | 100.00 | 100.00 | 100.0 |
| 25 | 100.00 | 100.00 | 100.0 |
| 22.4 | 100.00 | 100.00 | 100.0 |
| 20 | 100.00 | 100.00 | 100.0 |
| 16 | 100.00 | 100.00 | 100.0 |
| 14 | 100.00 | 100.00 | 100.0 |
| 12. | 100.00 | 93.50 | 97.5 |
| 10 | 100.00 | 52.60 | 81.5 |
| 8 | 100.00 | 19.70 | 68.7 |
| 4 | 100.00 | 5.10 | 63.0 |
| 2 | 66.10 | 2.20 | 41.2 |
| 1 | 42.30 | 2.00 | 26.6 |
| 0.5 | 27.90 | 1.50 | 17.6 |
| 0.25 | 19.70 | 1.50 | 12.6 |
| 0.125 | 14.80 | 1.50 | 9.6 |
| 0.063 | 11.40 | 1.70 | 7.6 |

Tabla 3.2: Granulometrias de los áridos.

en el Apartado 2.3, en tanto que lo primero que se hace, a diferencia de otros métodos, es establecer la composición de la pasta para proceder a continuación al establecimiento de la cantidad de árido grueso y porcentaje de aditivos.

3.3.1. Determinación de la pasta

De acuerdo a la experiencia recogida a lo largo de los años por la empresa, se estima que para los áridos que se manejan en el entorno, cada metro cúbico de hormigón autocompactante debe contener alrededor de 1000 kilogramos de pasta. Esta pasta esta compuesta de cemento, agua y la fracción de arena que atraviesa el tamiz de abertura igual a 1 milímetro.

Como consecuencia de la aplicación planteada, se debe dosificar un hormigón acorde a un ambiente correspondiente a clases específicas de exposición Q_b o Q_c , en función del grado de agresividad. La Instrucción de Hormigón Estructural (en su Tabla 37.3.2.a), establece para ambos casos, un contenido mínimo en cemento de 350 kg/m^3 y una máxima relación agua/cemento más restrictiva en el segundo caso, siendo éste un valor de 0.45. Las granulometrías de los áridos (Tabla 3.2) muestran que la arena aporta un 42.3% de su peso a la pasta.

Aceptando que la parte de arena oscila entre 1000 y 1500 kg en función de las prestaciones requeridas para el hormigón final, se opta por una dosificación de 1100 kg de arena, de los cuales unos 465 kg formarán parte de la pasta. Para aproximarse a los 1000 kg de pasta mencionados inicialmente, se requiere iterar con la cantidad de cemento y agua, sin superar los límites establecidos de contenido mínimo de cemento y máxima relación agua/cemento. De esta manera se establecen las cuantías mostradas en la Tabla 3.3. Con dichos valores se puede estimar un peso de pasta de aproximadamente 1070 kilogramos, con una cantidad de arena dentro de los márgenes marcados.

Otras recomendaciones [ACHE (2008)] indican que es necesario un conte-

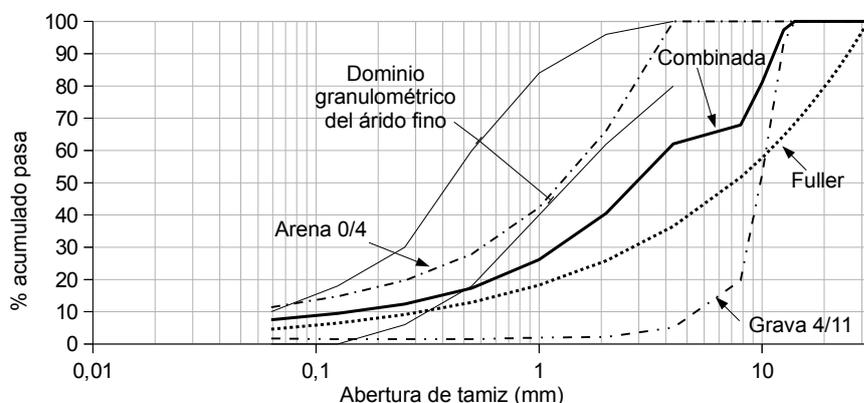


Figura 3.5: Parábola de Fuller y curva combinada.

nido total de finos cercano a los $450\text{-}600\text{ kg/m}^3$, lo cual se cumple también en este caso con alrededor de 590 kg/m^3 . La granulometría de la misma cumple los requisitos establecidos en la normativa respecto a los límites superiores e inferiores, por lo que no resulta necesario mezclarlo con arena de corrección, por lo general, de origen silíceo y tamaño 0/1.

3.3.2. Optimización del esqueleto granular

Debido a que se ha establecido por diseño el empleo de 50 kilos de fibras por cada metro cúbico de hormigón, se considera como un agregado más a tener en cuenta en la búsqueda del esqueleto granular más compacto a fin de obtener un hormigón de adecuadas prestaciones (resistencia y durabilidad). Como dato de partida añadido, se dispone de la cantidad de arena determinada en el apartado anterior, la cual deberá ajustarse para diferentes cuantías de árido grueso con el fin de obtener el mínimo porcentaje de huecos. Estas proporciones de áridos se realizan ajustándose en la medida de lo posible a una parábola de Fuller (Figura 3.5).

Para ello se emplea la norma ASTM C29/C29M donde se establece el procedimiento a seguir, de manera que se mezclan los agregados en seco, se rellena un recipiente de peso y volumen conocidos con la mezcla, se compacta y a continuación se procede a su pesaje. La mayor compactación corresponderá con la proporción que muestre la mayor densidad, o lo que es equivalente, un menor volumen de huecos, tal y como se muestra en la Figura 3.6.

En realidad, en este paso se debe lidiar con un agregado como son las fibras, de forma esbelta en base a su relación de aspecto, que altera la disposición de los áridos de su entorno. Cabe destacar que realmente no se está obteniendo la relación arena/grava más apropiada desde el punto de vista de la compactación. Dicho valor óptimo correspondería a una mayor relación de grava respecto a la arena, puesto que a mayor tamaño de árido grueso, existen más agregados de tamaño intermedio que optimiza el empaquetamiento [García (2004)]. Esta divergencia es consecuencia de las prestaciones de autocompactabilidad requeridas al hormigón, que establecen un contenido mayor de lo habitual de arena,

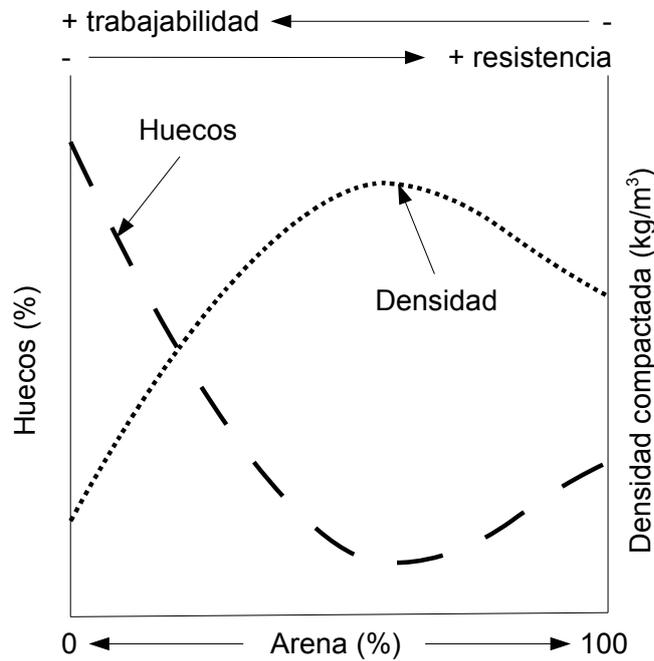


Figura 3.6: Compacidad, resistencia y trabajabilidad en función del porcentaje de arena.

al mismo tiempo que limita el tamaño máximo de árido. Esta tendencia origina un aumento de la trabajabilidad de la masa fresca en detrimento de la resistencia, con lo que se debe limitar ese contenido de arena para no reducir drásticamente las propiedades mecánicas de la masa endurecida. Además, debido al empleo de caliza machacada como agregados, la proporción de arena será superior en comparación con la requerida por áridos redondeados, debido al engarce y rozamiento que originan una reducción de la docilidad de la masa.

Alejarse del mínimo contenido de pasta posible para ciertos áridos, acarrea un aumento del coste de producción y medioambiental, puesto que se incrementa el empleo de cemento, aunque puede ser compensado con el empleo de otros finos. Sin embargo, la aplicación propuesta ya establecía de antemano, unos elevados contenidos en cemento.

3.3.3. Determinación de aditivos

La determinación de los aditivos, se realiza de manera empírica en base a los habituales ensayos de caracterización de los hormigones autocompactantes, empleándose para este caso concreto, el ensayo de escurrimiento y el embudo en V. En esta fase se añaden a la masa dos aditivos, uno polifuncional y otro superplastificante, que ejerce la labor de reductor de agua de alta actividad. La combinación de ambos permite optimizar la solución final.

La baja relación agua/cemento unida al elevado contenido mínimo en cemento, establecido por la normativa en base a la agresividad del ambiente de la aplicación considerada 0.50 a 0.45 y 325 a 350 kg/m³, respectivamente para

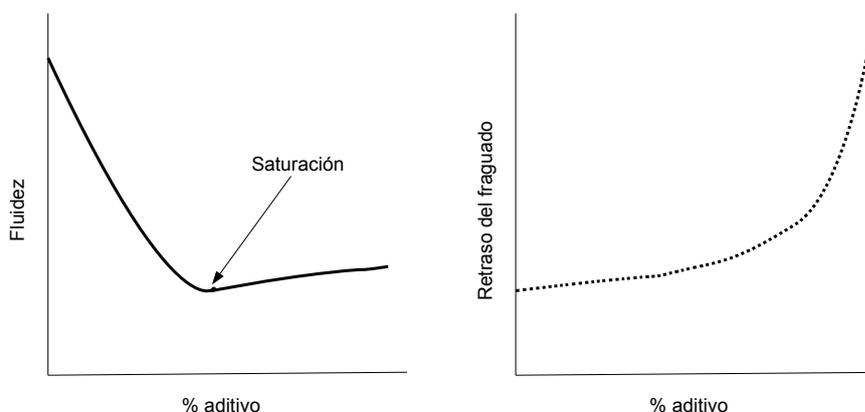


Figura 3.7: Saturación y retraso del fraguado por sobredosis de aditivo.

ambientes Q_a a Q_c , origina que la matriz original tienda a presentar un asiento reducido de acuerdo a una consistencia seca. La labor principal del aditivo superplastificante con base policarboxílica, se centra en la dispersión de las partículas de cemento para aumentar la fluidez de la masa partiendo de una reducida relación agua/cemento, de forma que se obtenga un diámetro de escurrimiento dentro de las especificaciones de la autocompactabilidad (véase la Tabla 2.1).

La elevada dispersión del cemento origina su pronta hidratación, lo que unido a la viscosidad que presenta la masa, puede originar un inicio de fraguado relativamente prematuro que impida la correcta ejecución del elemento. Con motivo de compensar dicho efecto negativo se complementa con un aditivo polifuncional, mucho más barato que el anterior, que además ejerce de aireante y retardante del fraguado. El introducir inclusiones de aire, permite mejorar la reología de la masa y contrarrestar posibles segregaciones principalmente de las fibras, que son los agregados más esbeltos. Las proporciones de ambos tipos de aditivo, dependen también de la estación, calurosa o fría, en la que se realiza la amasada, puesto que puede originarse un retraso excesivo en el fraguado, resultando no aceptable.

Los resultados de los ensayos realizados establecen que las propiedades óptimas se consiguen con el empleo de una combinación de aditivo polifuncional y superplastificante en unas proporciones aproximadas de 0.93 % y 1.12 % spc, respectivamente (Tabla 3.3). Al mismo tiempo, se garantiza una adecuada resistencia y durabilidad gracias a que permite emplear una reducida cantidad de agua de amasado. La proporción de aditivo polifuncional se encuentra cerca de su límite superior, de forma que trabaje como superplastificante-aireante pero sin provocar intensos retrasos ni oclusiones de aire importantes. Un excesivo aporte de aditivos no aumenta infinitamente la fluidez del hormigón, puesto que existe un punto de saturación a partir del cual se mantiene constante y puede generar un no deseado retardo (Figura 3.7). Por su parte conviene controlar el porcentaje de superplastificante debido a su coste, ya que una sobredosis puede acarrear la segregación de los agregados. El porcentaje de aire del hormigón, por su parte, se limita a un 2 %.



Figura 3.8: Insuficiente escurrimiento por falta de aditivo superplastificante.

| Componente | Cemento II 42.5R | Arena 0/4 | Grava 4/11 | Fibras HE 1/50 | Agua | Aditivos | |
|------------|---------------------|--------------|---------------|-------------------|------|------------|---------|
| Kg/m^3 | 430 | 1100 | 725 | 50 | 175 | Poli. 4.00 | SP 4.80 |
| | | | | | | | |

Tabla 3.3: Dosificación teórica.

Tal y como muestra la secuencia de Figuras 3.8a a 3.8c, se comprueba que la insuficiente dosificación de aditivo superplastificante imposibilita una adecuada dispersión de las partículas de cemento, imposibilitando alcanzar las condiciones de autocompactabilidad. En esta prueba preliminar, la masa de hormigón no alcanza la línea de diámetro 500 mm, aun cuando el tiempo transcurrido es muy superior al máximo establecido en la norma. Los tiempos de medición son muy cortos y su precisión depende de la reacción de las personas encargadas de su control, introduciendo cierta incertidumbre en la medida. Para reducirlo en la mejor manera posible, se ha optado por determinar los valores, de T_{50} por ejemplo, por medio de la edición de vídeos grabados durante el ensayo.

3.3.4. Procedimiento de mezcla

El procedimiento de mezcla empleado comienza con la mezcla en la amasadora de la arena y la grava. Con posterioridad se incorpora el cemento y se continua amasando en seco. Cuando la distribución resulte homogénea, se adicionan $3/4$ partes del agua de amasado y se prosigue con el mezclado. Se aportan los aditivos con la parte restante de agua y se amasa unos minutos para que los aditivos hagan efecto. Finalmente, se añaden las fibras y se persiste en el amasado para la completa y correcta distribución de las mismas en la matriz de hormigón.

3.3.5. Validación de resultados

Aún cuando el hormigón se bloquea y requiere de cierto tiempo para atravesar la boca en el ensayo del embudo en V, el incremento de presión ejercida por la masa acumulada acaba empujando al hormigón. Sin embargo, existen ejemplos [Nemegeer (1999)] donde se prueba que incrementando las aberturas al doble de la longitud de la fibra, se reduce notablemente la probabilidad de bloqueo. La abertura del embudo presenta unas dimensiones de 65 ± 1 y 75 ± 1



Figura 3.9: Esgurrimento de la amasada en laboratorio.

mm, cuando el diámetro de la manguera de bombeo será de 140 mm, duplicando la salida del embudo y casi triplicando la longitud de la fibra.

La Figura 3.9 muestra la secuencia de imágenes correspondientes con el inicio del ensayo de escurrimento, el tiempo en el que se alcanza el diámetro de 500 mm (T_{50}) y el diámetro final obtenido (D_f) para la dosificación teórica diseñada en el laboratorio. El tiempo que requiere la masa para superar la circunferencia correspondiente a T_{50} , es ligeramente superior a la permitida por la normativa, pero dado que se prevén ligeros ajustes para su implementación a un volumen mayor, se acepta como satisfactorio el comportamiento mostrado.

Por otro lado, una resistencia elevada no es primordial en este caso, por lo que las posibles reducciones de la resistencia a compresión, por el empleo de grandes relaciones arena/grava, no son importantes, al mismo tiempo que el ya de por sí elevado contenido en cemento proporcionará una resistencia suficiente al hormigón. Se han establecido como datos de partida un contenido mínimo en cemento de entre 325 y 350 kg/m^3 y una relación agua cemento máxima de 0.50 a 0.45, en función de una clase específica de exposición a ambiente químico agresivo (Q_a , Q_b o Q_c) debido a la posibilidad de contener aguas residuales, por ejemplo, en la aplicación del depósito cilíndrico propuesto. Ello da lugar, generalmente, a la obtención de resistencias a compresión cercanas a 30 o 35 MPa. Se diseña, por tanto, un hormigón de resistencia moderada, partiendo de la base que los hormigones autocompactantes tienden a presentar, debido a su dosificación y además de lo expresado en relación con el ambiente al que estará expuesta la estructura, resistencias superiores a los límites inferiores permitidos por la normativa.

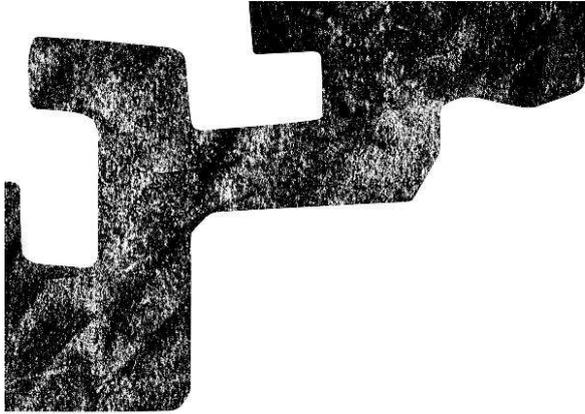
3.4. Consideraciones finales

Las fibras analizadas se encuentran entre los tipos más habituales empleados en el ámbito de la construcción. Ambas presentan similares resistencias frente al arrancamiento en cuanto a longitudes embebidas reducidas se refiere. Asimismo, se aprecia con claridad el estiramiento de las fibras una vez extraídas de la matriz de hormigón. Aún cuando hay disponibles en el mercado fibras con altos límites elásticos, se opta por emplear fibras de acero bajos en carbono puesto que el mecanismo de arrancamiento prevalece frente al de rotura para la aplicación estudiada. Independientemente de la forma, la relación de aspecto es uno de los parámetros que influye en mayor manera la dosificación y la posibilidad de formarse erizos de fibras durante el amasado. El rango de relaciones

de aspecto para los tipos de fibras más habituales, oscila entre 38 y 80, en función de su longitud y diámetro. La fibra empleada se encuentra en la mitad de dicho rango. Por tanto, se considera más adecuado emplear fibras más cortas y numerosas por unidad de volumen, que contribuyan de manera más eficiente al control de fisuración y a resistencia a tracción de manera simultánea.

En cuanto a la dosificación, las fibras reducen la trabajabilidad de la masa, pero al tratarse de un hormigón autocompactante, esto se puede ver contrarrestado con el empleo adecuado de aditivos superplastificantes. Es por tanto, que la dificultad de dosificar un HAC no se ve incrementada, aunque la inclusión de un agregado, las fibras, de forma tan esbelta debe tenerse en consideración. Al igual que los áridos de forma laminar o acicular que presentan bajos coeficientes de formas o elevados índices de lajas, las fibras demasiado esbeltas requieren de mayor cantidad de cemento y pueden originar un amasado incorrecto y afectar negativamente a las propiedades del hormigón endurecido. Hasta el momento, es inevitable comprobar la dosificación mediante ensayos normalizados, de forma que se asegure un adecuado comportamiento reológico del material, puesto que es difícil de predecirlo.

Cabe destacar, que se debe ser consciente de la diferencia entre la labor realizada en el laboratorio y la realizada en planta. Los condicionantes de uno y otro ámbito, originan cierta disparidad en los resultados obtenidos. Estos y otros aspectos se analizarán en el Apartado 4.



PARTE **IV**

Campaña experimental a escala real

CAPÍTULO 4

Ejecución del elemento estructural

4.1. Introducción

La relevancia del presente estudio radica en el análisis y experimentación de una estructura a escala real. Pocas experiencias de tal envergadura se pueden encontrar en la literatura. En este apartado se resumen las consideraciones de la propia puesta en obra. El estudio comprende la construcción de un tramo de muro recto de 3 metros de altura, 6 metros de longitud y 0.15 metros de espesor. Posteriores estudios pueden, por tanto, tener en cuenta la experiencia aportada en el presente capítulo para futuras ejecuciones.

4.2. Extrapolación a la fabricación en planta

Existe relativamente poca investigación respecto a las variables que introduce el proceso de producción a escala industrial [Aïtcin and Mehta (1990)]. La mayoría de los estudios se centran en las propiedades mecánicas del material mezclado en el ambiente controlado de laboratorio.

El cemento, las adiciones minerales y los aditivos químicos son productos industrializados que generalmente presentan reducidas variaciones. Los agregados, árido fino y grueso, son los componentes del hormigón que mayor control requieren. La variación de sus características difiere en gran medida en función de la ubicación geográfica, más concretamente según la cantera donde se han obtenido. La mayor cantidad de finos y menor proporción de agua, origina en los hormigones autocompactantes una masa con mayor tixotropía, la cual requiere de mayor energía para homogeneizarse en comparación con un hormigón convencional [Toralles-Carbonari et al (2003)].

El hormigón se ha fabricado en planta de hormigón preparado, dispuesta de equipos convencionales de almacenamiento, pesaje y dosificación. Se emplea una amasadora fija de 3 m^3 de capacidad a la que se aportan los áridos, el cemento, el agua y aditivos y las fibras en el orden descrito, controlado en todo momento de forma automatizada. Dado que se han fabricado 4 m^3 de

material, éste se ha amasado en dos tandas, vertidas sucesivamente al camión hormigonera. El tiempo de amasado se incrementa respecto al de un hormigón convencional, debido primero a la mayor cantidad de finos y a la necesidad de garantizar la actuación dispersante del superplastificante. La potencia a ejercer por el par motor es un buen indicador de la fluidez del hormigón. Por otra parte, la adición de fibras requiere aumentar también dicho tiempo para conseguir una distribución homogénea del refuerzo.

4.2.1. Control de humedad

El control de humedad es un punto clave en la óptima dosificación de hormigones con propiedades autocompactantes. Además del volumen de agua aportado a la masa, es imprescindible conocer el grado de humedad de los áridos y su capacidad de absorción.

La relación agua/cemento en hormigones autocompactantes es, por necesidad, limitada. Resulta imprescindible, por tanto, controlar todo aporte o absorción de agua por parte de los componentes y más concretamente, por los áridos. Para ello, resulta indispensable disponer de equipos de medida adecuados para los materiales almacenados en los diversos silos de la planta.

La dosificación empleada en la ejecución del muro presenta una relación agua /cemento baja ($a/c = 0.41$), pero ligeras variaciones de la humedad pueden trastocar dicho valor.

4.2.2. Procedimiento y ciclos de amasado

El procedimiento de mezcla se corresponde con el seguido durante los ensayos de laboratorio, de forma que primeramente se realiza una mezcla en seco para, posteriormente, ir añadiendo el agua y los aditivos. A excepción de la adición de fibras, que se ha realizado de forma manual vertiéndolas directamente en la amasadora, todo el proceso está automatizado y es monitorizado desde la central de mandos de la planta. Se ha descartado la adición de las fibras sobre el camión hormigonera porque no se obtendría información valiosa, como el valor del par ejercido por el motor del eje de la amasadora, que permita determinar si los aditivos han ejercido su función y han modificado la reología de la masa.

Dado que se han solicitado 4 m^3 de HACRFA y la amasadora dispone únicamente de un volumen de 3 m^3 , se han realizado dos ciclos de amasado de 2 m^3 cada uno de ellos, vertiéndolos consecutivamente en la hormigonera. Esto permite corregir, entre uno y otro ciclo, posibles desviaciones detectadas durante la monitorización del proceso.

Se ha optado por mantener el habitual procedimiento de amasado establecido en la planta. Se ha descartado, por tanto, emplear cualquier tipo de amasado escalonado, como los descritos en el Apartado 2.5.1, que permitan mejorar las propiedades de la masa.

El hormigón finalmente dosificado presenta propiedades autocompactantes, con una fluidez elevada. El mayor rendimiento de la amasadora de la planta, junto con la necesidad de variar la dosificación por motivos de producción han otorgado una reología diferente a la masa. El continuo consumo de materiales, acarrea el suministro de nuevos áridos cuyas propiedades se ven generalmente modificadas. Cada semana se realizan en la planta ensayos para estimar el

| Componente | Cemento II 42.5R | Arena 0/4 | Grava 4/11 | Fibras HE 1/50 | Agua | Aditivos Poli. SP | |
|------------|---------------------|--------------|---------------|-------------------|------|----------------------|------|
| Kg/m^3 | 434 | 1141 | 626 | 50 | 178 | 4.43 | 5.02 |

Tabla 4.1: Dosificación real.

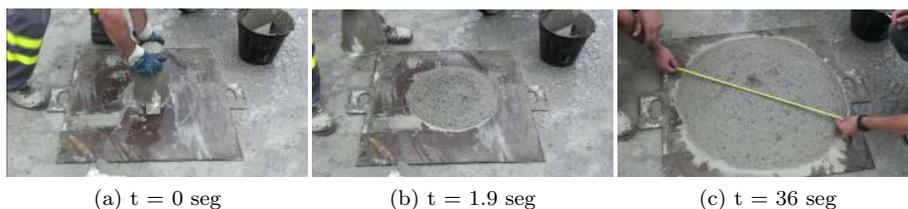


Figura 4.1: Escurrimiento de la amasada definitiva.

equivalente de arena y análisis granulométricos para determinarlas. A fin de obtener una mayor compacidad, compatible con las propiedades autocompactantes, se ha alterado la dosificación inicial establecida en el laboratorio (Tabla 3.3).

En la Tabla 4.1 se resume la dosificación finalmente empleada en la amasada y vertida en el muro.

El diámetro final obtenido alcanza 765 mm, mientras que se requieren 1.9 segundos para alcanzar un diámetro de 500 mm. La ausencia de un sensor en la tolva de los agregados no ha permitido medir su humedad de manera exacta. El hormigón autocompactante es muy sensible a las variaciones de humedad. Un mayor contenido de humedad en los áridos ha podido ocasionar dicha variación.

Las Figuras 4.1a a 4.1c muestran la secuencia de escurrimiento del hormigón autocompactante reforzado con fibras de acero. Las imágenes muestran el inicio del ensayo, el instante donde se alcanza el diámetro de 500 mm y el diámetro máximo alcanzado una vez finalizado el ensayo.

4.3. Preparación del muro

La preparación del muro se simplifica en varios aspectos, mientras que surgen al mismo tiempo algunas complicaciones. La ausencia de la fase de ferrallado permite reducir considerablemente el tiempo de preparación. Teniendo en cuenta que el refuerzo del muro consiste únicamente en fibras de acero que se pueden mezclar en la propia planta (como ha sido el caso) el trabajo a pie de obra se ve notablemente reducido. Se evita, por tanto, el montaje, solapado y atado de las convencionales barras corrugadas, así como la colocación de separadores para asegurar los recubrimientos.

La estabilidad del muro en la fase de ejecución contempla dos aspectos. El primero, relativo al estado fresco del hormigón, se menciona en el Apartado 4.3.1. El segundo hace referencia al estado endurecido del hormigón; es decir, una vez desencofrado el muro. Las ventajas perseguidas en el diseño planteado, eliminan el tradicional refuerzo mediante barras de acero corrugadas. Por tanto, no se requiere de una armadura en espera sobresaliendo de la cimentación para

solaparse con la armadura del muro. El ahorro de tiempo y trabajo relacionado con la no disposición de una armadura corrugada que conecte el muro con su cimentación, repercute en un ligero incremento del valor absoluto de los esfuerzos flectores a los que se somete el cuerpo del muro. Dada la forma cilíndrica que conforma la aplicación propuesta, por su geometría originará principalmente esfuerzos de tracción en su sección cuyo valor superara con creces los derivados de la flexión, con lo cual dicho incremento no será determinante. Ello origina una pérdida de rigidez en la base del muro en su unión con la cimentación. Con aras a garantizar la estabilidad del muro, su desplazamiento se puede evitar mediante una llave de cortante en la unión, mientras que el giro se debe evitar con elementos provisionales.

Mientras que el conjunto de la aplicación propuesta, el depósito de contención cilíndrico, es estable, se deben prever los apeos necesarios para cada tramo de muro individual entre juntas. Más si cabe, como ocurre en el caso de estudio planteado, cuando el espesor del muro es reducido respecto a sus otras dos dimensiones. Este elemento no se ha unido a ninguna cimentación ni dispuesto llaves de cortante, realizándose a cubierto dentro de una nave industrial. Además, con motivo de extraer probetas para posteriores ensayos normalizados, se ha obviado el radio de curvatura del muro, ejecutando un tramo recto de 6 metros de longitud, 3 metros de altura y 0.15 metros de espesor.

Las dimensiones se han establecido en función de un compromiso entre la exigencia de cumplimiento de los requisitos y su posterior manipulación y corte. Se ha optado por una longitud suficiente que puede dar idea de la posible segregación por la distancia recorrida. La altura se ha considerado suficiente para estudiar el movimiento vertical de la masa y el espesor viene limitado por las normas de ensayo consideradas (Apartado 4.5.1). No se ha considerado interesante incrementar en exceso la altura, debido a que ello originaría la necesidad de soportar un mayor empuje del hormigón fresco y, por consiguiente, el empleo de encofrados especiales.

La ejecución y corte del muro se ha realizado en el interior de un pabellón industrial (Figura 4.2), lo que ha permitido aislarlo, en cierta manera, de las condiciones climáticas exteriores. Al mismo tiempo, no se han producido empujes de viento que pudieran contribuir en la inestabilidad del encofrado y el muro.

4.3.1. Encofrado

Teniendo en cuenta que el hormigón dosificado tiene propiedades autocompactantes, se deben tener en cuenta varios factores que pueden alterar la ejecución y la solución final. Por un lado, el mejor acabado que tienden a presentar los hormigones autocompactantes depende en gran medida de la calidad de los encofrados empleados. Por otro lado, se deben sellar adecuadamente las juntas entre los paneles de encofrado, puesto que la extrema fluidez de dichos hormigones puede originar filtraciones hacia el exterior. Un cordón de poliuretano puede resultar suficiente. En el caso analizado, dada la reducida altura del muro (3 metros), no ha sido necesario emplear encofrados o apuntalamientos especiales para soportar el empuje.

Por el mismo motivo, el encofrado y demás accesorios (sargentos, puntales, etc.) deben estar diseñados para soportar el mayor empuje que ejerce este tipo de hormigón, tal y como recoge [Khayat and Omran (2007)]. Un error en este



Figura 4.2: Vista del encofrado y las juntas selladas.

sentido puede acarrear serios accidentes durante la ejecución.

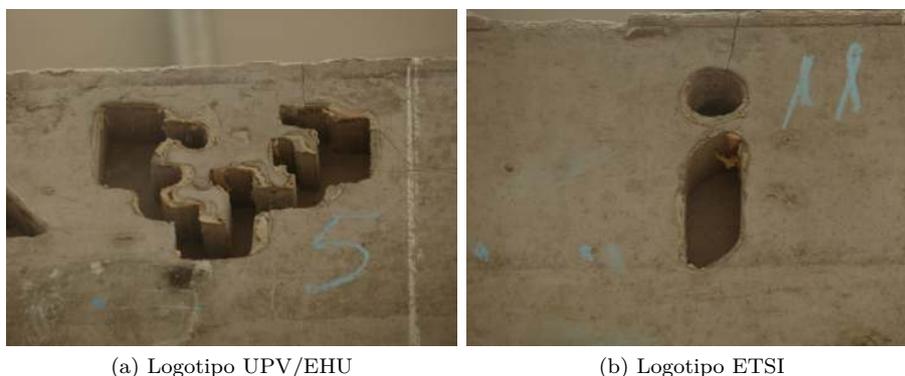
4.3.2. Procedimiento de hormigonado

El proceso de hormigonado también se ve facilitado en parte. La ausencia de armadura convencional, separadores, etc, permite hormigonar desde el punto deseado y mover el mismo por el interior del encofrado sin impedimentos. Aunando ambas tecnologías, se evita al mismo tiempo la necesidad de vibrado de la masa de hormigón. Con ello se reducen los ruidos y molestias originados por la obra para los trabajadores.

En el caso concreto del muro analizado, éste se ha bombeado de manera continua desde su esquina inferior izquierda. El hormigón recorre la totalidad de la longitud del muro, de un extremo al otro, y rellenando el encofrado al mismo tiempo de abajo a arriba. La operación de vertido se reduce a 8 minutos. No es necesario ningún tipo de vibrado.

Se pretende con esta disposición, forzar la orientación de las fibras en dirección longitudinal, originando una anisotropía en el material en favor de dicho eje. Ese planteamiento es coherente con los esfuerzos de diseño en depósitos circulares de contención. En ellos, el esfuerzo principal es una tracción perimetral debido al empuje del contenido.

Se descarta la opción lógica de hormigonar el muro desde su punto central, puesto que el estudio también se encamina hacia el análisis de la posible segregación dinámica de las fibras dentro del hormigón, en función de la mayor longitud a recorrer por la masa. De esta manera, se pretende determinar la máxima longitud de hormigonado aceptable para el material. Dicho límite vendrá



(a) Logotipo UPV/EHU

(b) Logotipo ETSI

Figura 4.3: Fisuras por retracción en zona superior de muro.

marcado por la localización de probetas alejadas del punto de vertido carente de refuerzo o presente pero de manera insuficiente. También hubiera sido más correcto elevar el punto de vertido al tiempo que el nivel de hormigón asciende. De igual manera, durante la investigación se ha intentado conocer la influencia del movimiento de la masa, en este caso en dirección vertical, en la orientación horizontal requerida para el refuerzo.

4.3.3. Proceso de curado

El diseño de la dosificación del hormigón autocompactante reforzado con fibras de acero y el procedimiento de puesta en obra origina, sobre todo, una determinada orientación y, por tanto, la resistencia del material. Queda claro que cada elemento estructural debe tener su estudio pormenorizado debido a ello. En el caso planteado se propone como aplicación del muro estudiado, su integración en un depósito circular de contención.

Con idea de buscar los límites de dicha aplicación, se ha decidido renunciar a cualquier proceso de curado. Su supresión puede originar una fisuración inicial por retracción que puede resultar perjudicial y afectar negativamente los estados límites últimos (ELU) y de servicio (ELS), estando en este estudio del lado de la seguridad ambos.

Su ausencia puede originar unas retracciones térmicas que reduzcan la resistencia del material, al fisurarse la matriz antes incluso de entrar en carga. De igual manera, el requerimiento de impermeabilidad exigido a esta aplicación en caso de contener líquidos, puede verse igualmente disminuido.

Las mencionadas propiedades se verifican cuantitativamente en posteriores Capítulos (Apartados 5.7 y 6.6). Previamente sin embargo, se realiza una observación cualitativa de manera visual en el Apartado 4.4.1.

4.4. Ensayos sobre el elemento estructural

Los métodos de control habituales en el hormigón reforzado con fibras, están diseñados para probetas y elementos a escala reducida. Se entiende necesario el desarrollo de varias técnicas, que se mencionarán a lo largo de la presente tesis doctoral, para su implementación a nivel de estructura o escala real.



Figura 4.4: Vista del muro tras su desencofrado.

De todas maneras, se realizan varios ensayos, cualitativos, sobre el propio muro como son un análisis visual y la medición de impulsos ultrasónicos.

4.4.1. Análisis Visual

Tras el desencofrado, se ha llevado a cabo un riguroso análisis de la superficie del muro. Se pretende por un lado, determinar si existen indicios de una posible fisuración por la ausencia del curado. Por otro, se estudia el acabado final de las superficies de hormigón con vistas a su posible empleo en aplicaciones reales (presencia de fibras al exterior, coqueras, etc.)

La Figura 4.4 muestra el muro tras su desencofrado. En ella se aprecian las diferencias de acabado debidas a la deficiente calidad de varios paneles de encofrado. A simple vista aún así, no se vislumbran defectos reseñables como los antes ya mencionados. La ausencia de fibras en la superficie y lo reducido de las coqueras, permiten aseverar un correcto comportamiento localizado y en el conjunto del elemento estructural.

Cabe destacar, sin embargo, un par de hechos acaecidos durante el proceso de puesta en obra. Por un lado, la estudiada dosificación del hormigón se ha visto alterada al mezclarse con el agua de cebado que incorporaba la tolva del equipo de bombeo. Ello origina una ligera segregación, que provoca el bombeo inicial de una lechada de cemento. Esta lechada flota sobre el hormigón descansando en la cabeza del muro. La carencia de refuerzo expreso en forma de armadura en barra en dicha zona unido a la elevada cuantía de cemento y la ausencia de curado, provocan fisuras de retracción térmica repartidas por la cabeza del muro. Los efectos más notorios se centran en las posiciones de los



Figura 4.5: Forma moldeada por la presión de bombeo en el extremo de la manguera.

logotipos insertados dentro del encofrado, como refleja la Figura 4.3. Se observa una ligera fisuración en la parte superior del muro, originada por la ausencia de refuerzo, debido a la segregación de fibras ocurrida en su zona superior, y la debilitación de la sección debido a los logotipos impresos. Recuérdese además, que el hormigonado se ha realizado desde la parte inferior del muro. Unido a ello, la zona superior es la más propensa a una pérdida de agua por evaporación, con lo que el efecto resulta más acusado. Sin embargo, dado que la base del muro, al estar articulada no se encuentra coaccionada frente a su acortamiento por retracción, ésta se produce de manera libre sin generar tensiones adicionales ni fisuras por dicho motivo. Su comportamiento, se asemeja por tanto al de un elemento prefabricado, adoptando ciertas de sus ventajas. Por otro lado, la presión del bombeo parece ser algo elevada, debido a los surcos que quedan grabados en la cara del hormigón, tal y como se aprecia en la Figura 4.5.

4.4.2. Impulsos ultrasónicos

Tras la primera inspección visual, se procede a determinar la velocidad de propagación de impulsos de ondas longitudinales de ultrasonidos en el hormigón endurecido de acuerdo a la norma UNE-EN 12504. Debido a las dimensiones del elemento de estudio, se decide disponer los palpadores en la misma cara del muro, realizando una transmisión indirecta o superficial.

Aunque la colocación de transmisión indirecta es la menos sensible y apropiada para la estimación de la compacidad del propio hormigón, en este caso lo que se pretende analizar es si el refuerzo de fibras influye notablemente en

dicha medida, de tal forma que se pueda apreciar una diferencia de refuerzo en las dos direcciones principales del elemento superficial (longitud y altura). Así mismo, dicha disposición suele resultar interesante en la detección de fisuras en la matriz de hormigón.

Los valores numéricos y conclusiones de los resultados obtenidos se resumen en el Apartado 5.2.2.

4.5. Selección de probetas y ensayos

En el siguiente apartado se justifican las dimensiones adoptadas para el muro en función de los ensayos previstos. La determinación de unas dimensiones básicas para las probetas origina, en consecuencia, la modulación del muro.

4.5.1. Ensayos a realizar

Inicialmente se había previsto una campaña de ensayos ambiciosa, la cual ha debido ser modificada en función de varios aspectos. Se enumeran a continuación los ensayos efectuados sobre las probetas y se menciona su correspondiente normativa de aplicación:

- UNE 83507:2004 Hormigón con fibras. Rotura por compresión.
- UNE 83511:2005 Hormigón con fibras. Determinación de la resistencia a cortante.
- UNE-EN 14651:2007+A1 Método de ensayo para hormigón con fibras metálicas. Determinación de la resistencia a la tracción por flexión (límite de proporcionalidad (LOP), resistencia residual).
- UNE-EN 14721:2006+A1 Métodos de ensayo para hormigón con fibras metálicas. Determinación del contenido en fibras en el hormigón fresco y en el endurecido.
- UNE-EN 12390-8:2009 Ensayos de hormigón endurecido. Parte 8: Profundidad de penetración de agua bajo presión.
- UNE-EN 12504-4:2006 Ensayos de hormigón en estructuras. Parte 4: Determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos.

4.5.2. Tamaño de probetas

Tal y como se ha mencionado anteriormente, el espesor del muro se ha limitado a 150 milímetros con motivo de establecer un denominador común para los ensayos planteados. Todos los ensayos normalizados permiten el empleo de probetas de 150 mm. El tamaño de las probetas se corresponde, por tanto, con las dimensiones establecidas en la normativa para los diversos ensayos que se pretenden realizar.

Debido a la modulación del espesor del muro a 150 milímetros, las otras dos dimensiones (longitud y altura) deberán ser proporcionales a la misma. Se establecen dos medidas de probetas, que puedan servir indistintamente para más de un tipo de ensayo. Por una lado, se realizarán los cortes necesarios para extraer probetas cúbicas de 150 mm de lado y, por otro, se obtendrán mediante

corte probetas prismáticas con 600 mm de largo y sección transversal cuadrada de 150 mm de lado.

4.5.3. Esquema de corte del muro

Durante el diseño del esquema de corte se ha pretendido obtener una adecuada representación del conjunto de la estructura. Se han establecido columnas uniformes de probetas cúbicas y prismáticas para facilitar la fase de corte. Debido a los resultados del análisis mediante impulsos ultrasónicos (Apartado 5.2.2), se ha preferido concentrar en parte las columnas de probetas cúbicas a la derecha de la zona central.

Una mayor densidad de probetas cúbicas representa un mayor número de caras de corte y posibilidad de emplear los métodos magnéticos en ellas. Con esta actuación se pretende determinar de manera más fehaciente la densidad y orientación de las fibras para contrastarlo con los resultados dispares obtenidos mediante el método de ultrasonidos.

El esquema de corte planteado, por tanto, se refleja en la Figura 4.6. De ella se extrae la información relativa al número de probetas. De las 240 probetas cúbicas que se obtienen, las dos columnas extremas y sus adyacentes se prevén inadecuadas para muchos ensayos debido a la presencia de la junta de estanqueidad. Con lo cual restan 180 probetas cúbicas para los ensayos previstos. En lo que se refiere a las probetas prismáticas, se ubican en la zona de vertido, la zona central y la zona final. En total se obtienen 140 probetas a lo largo y alto del muro.

Para dicha labor, se ha procedido a tumbar el muro hasta la posición horizontal. Con el fin de evitar esfuerzos sobre la estructura, se ha dispuesto un entramado de perfiles metálicos en ambas caras del muro, rígidamente unidos entre sí a través de los mismos orificios empleados para sujetar los paneles de encofrado (Figura 4.4). El vuelco de la estructura se ha realizado por medio de una grúa autopropulsada, que ha sujetado la parte superior del entramado, haciéndolo descender de manera suave y controlada (Figura 4.7).

Una vez dispuesto el muro en posición horizontal, se ha procedido a desmontar el entramado metálico superior. Para ejecutar el corte y extracción de las probetas de acuerdo al esquema planteado, se ha empleado un sistema de corte mural equipado con un disco de diamante. Los carriles de sujeción se han unido firmemente al entramado inferior, tal y como se muestra en la Figura 4.8. Mediante este procedimiento se ha dividido el muro en 6 partes, cortando posteriormente las hiladas correspondientes en cada uno, en la dirección paralela al eje longitudinal del muro. El corte lateral entre probetas se ha realizado finalmente por medio de una cortadora de disco, por su mayor facilidad y economía.

4.6. Consideraciones finales

Como primera conclusión cabe destacar la notable diferencia entre la ejecución de una estructura real en las condiciones habituales de la obra y el trabajo en el ambiente controlado del laboratorio. La intervención de muchos agentes dificulta, e impide a veces, la correcta comunicación en muchos de los casos, entre ellos. Adquiere por tanto, mayor interés la experiencia recogida en

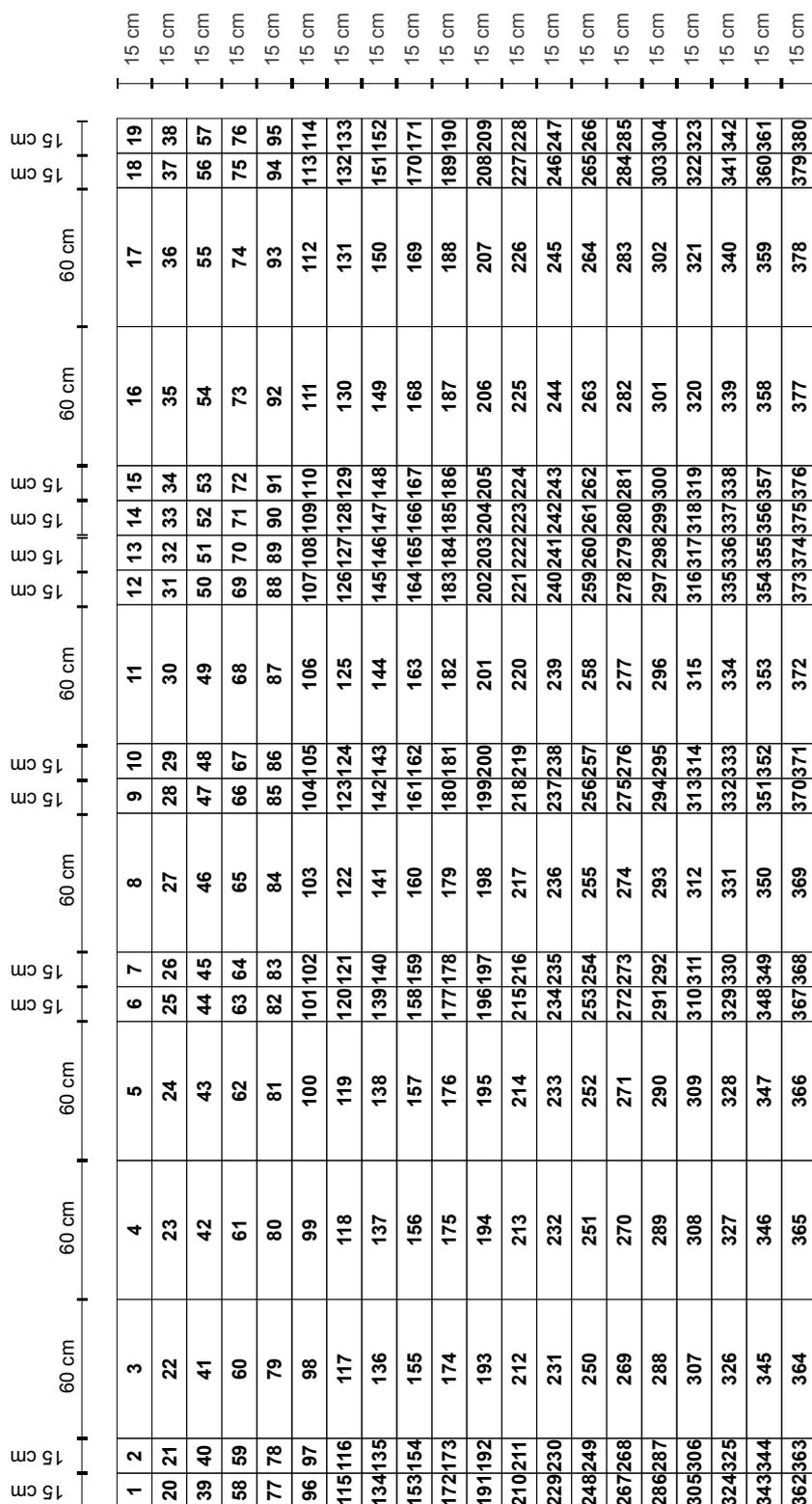


Figura 4.6: Esquema de corte del muro y distribución de probetas.



Figura 4.7: Vuelco de la estructura mediante grúa.



(a) Sistema de corte mural

(b) División del muro

Figura 4.8: Procedimiento de corte del muro.

el presente estudio a fin de evitar los mismos errores en futuras investigaciones o realizaciones.

La rapidez de ejecución se ve claramente aumentada, debido a las ausencias de las fases de armado y vibrado sobre todo. La disposición de encofrados más estancos y elementos de sujeción provisionales no altera en absoluto la reducción en tiempos de la solución. El coste también se ve reducido al eliminar dichas fases, aunque no de manera tan notoria debido al incremento del precio de los materiales. Las fibras permiten reducir la cuantía de acero por metro cúbico, debido a su mejor comportamiento en el control de la fisuración,

pero por contra, su precio hoy en día es ligeramente superior al de las barras corrugadas. Al mismo tiempo, las exigencias de autocompactabilidad, obligan al empleo de una mayor cantidad de cemento o finos y los correspondientes aditivos superfluidificantes, que encarecen el hormigón.

Desde el punto de vista meramente visual, la ejecución del muro parece correcta. A excepción de las zonas con mal acabado debido a la escasa calidad de los encofrados empleados, existen otras muchas zonas con acabados buenos y en ningún caso se aprecian fibras que asomen al exterior. Aunque no supone un problema desde el punto de vista estructural, la posible oxidación de las mismas alteraría la estética del conjunto.

Se comprobará en el desarrollo de los ensayos realizados, que el método de impulsos ultrasónicos no es el adecuado para determinar la orientación y/o distribución de las fibras. Los valores aportados no indican claramente la orientación prevista en las hipótesis iniciales y contrastada en posteriores capítulos (Cap. 5 y 6).

CAPÍTULO 5

Ensayos no destructivos (END)

5.1. Introducción

Los Ensayos No Destructivos (END) se basan en técnicas para evaluar las propiedades o composición de los materiales, sin originar alteraciones en la muestra. Resulta indispensable el desarrollo de los mismos para su aplicación en elementos estructurales reales. Debido a todos los condicionantes que pueden alterar la solución final y que difieren entre los estudios de laboratorio y los realizados a pie de obra, es necesario poder contrastar fehacientemente la idoneidad, desde el punto de vista resistente y funcional, de la propia estructura.

La campaña experimental llevada a cabo parte del interés mencionado anteriormente. Se prima, por tanto, la búsqueda de métodos que permitan determinar de una manera directa o indirecta la disposición del refuerzo y, por ende, el comportamiento frente a estados límites últimos y de servicio.

A continuación se describen y recogen los resultados de varios de dichos métodos como son los impulsos ultrasónicos, los métodos estereológicos, la tomografía axial computerizada, los métodos magnéticos y por último, la determinación de la permeabilidad del hormigón.

Cabe destacar que entre todos ellos, la determinación de los impulsos ultrasónicos es el único no destructivo realmente, puesto que se realiza sobre el propio muro una vez desencofrado. El resto de ellos se aplica sobre probetas, que aun no siendo destruidas en el desarrollo del ensayo, se han extraído mediante corte de dicho muro.

5.2. Velocidad de impulsos ultrasónicos

Mediante el empleo de un generador de impulsos eléctricos, se emiten gracias a un palpador emisor una serie de impulsos de vibraciones longitudinales que en contacto con la superficie de hormigón, atraviesan éste y son recibidos por un segundo palpador, que los convierte en señales eléctricas midiendo a

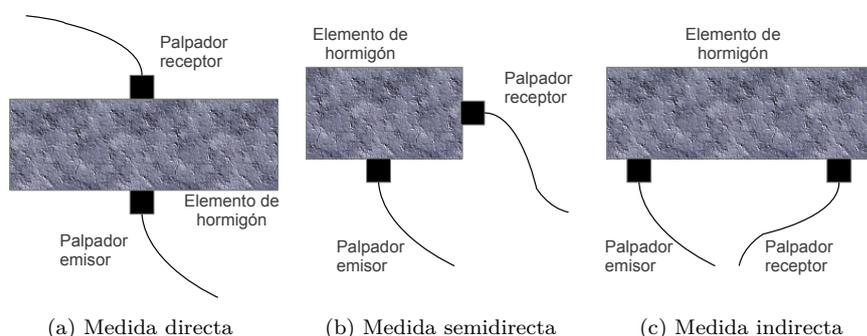


Figura 5.1: Colocación de palpadores.

continuación el tiempo transcurrido en su recorrido.

El posicionamiento de los palpadores se puede realizar de manera directa, semi-directa e indirecta o superficial. La diferencia radica en el recorrido que debe realizar el impulso, pudiendo ser este rectilíneo al disponer los palpadores en caras opuestas del elemento a medir, curvo si se disponen en caras adyacentes o superficial si lo están en la misma cara (Figura 5.1).

El objetivo de este análisis consiste en determinar si es posible detectar, para dos de los ejes principales del muro (longitudinal y vertical), diferencias en la orientación de las fibras, que serán posteriormente contrastadas con el resto de ensayos a realizar. El fundamento de tal hipótesis, radica en la posible mejor conductividad del material en las direcciones donde existe una mayor orientación de fibras. Este hecho podría abrir una nueva vía para el control de calidad de las obras *in situ*. Evidentemente, dicha suposición resulta válida para elementos estructurales como el estudiado, donde las dos direcciones estudiadas presentan dimensiones mucho mayores que a la relativa al tercer eje, espesor, y puedan considerarse elementos placa o lámina donde el refuerzo mediante fibras en la dirección más reducida pueda considerarse relativamente despreciable.

5.2.1. Procedimiento del ensayo

Para la medición de la velocidad de los impulsos ultrasónicos, se ha dividido la totalidad del muro mediante una cuadrícula numerada de 30 x 30 cm, tal y como se aprecia en la Figura 5.2. Dentro de cada cuadro, se han dispuesto 5 puntos de medida. En el primer punto, correspondiente con el centro del cuadrado, se coloca el emisor para las medidas realizadas desde esa posición respecto a los cuadrados adyacentes, bien sea ésta en dirección vertical u horizontal. Los otros 4 puntos marcados, circundan al primero, dispuestos a la derecha, izquierda, arriba y abajo, a una distancia de 5 cm. Estos puntos, junto con el central, sirven para posicionar el receptor final y realizar la medición.

Tal y como se recomienda en la norma correspondiente (UNE-EN 12504-4), para la transmisión indirecta se han realizado una serie de medidas colocando los palpadores a distancias variables. Ello posibilita eliminar la incertidumbre introducida por el tamaño del emisor y receptor, en lo que a la longitud exacta de la trayectoria se refiere.

El procedimiento empleado, por tanto, establece la medición de una señal



Figura 5.2: Puntos de medida y recepción de la onda ultrasónica.

emitida desde el punto central de un cuadrado, y recibida en tres puntos de un cuadro adyacente, alineados con el primero, siendo estos otro punto central y dos puntos equidistantes 5 cm a ambos lados del mismo. Estos tres puntos formarán una línea vertical en caso de que la medición se realice entre dos cuadrados contiguos en la misma vertical, uno encima del otro, y estarán alineados horizontalmente en los casos en los que la medida se realice entre dos cuadrados contiguos a lo largo del eje longitudinal, uno al lado del otro.

La tangente de la línea de regresión que mejor se ajuste a los resultados (tiempo y distancia) recogidos, deberá adoptarse como la velocidad de la zona analizada. En caso de obtenerse un parámetro de ajuste (R^2) bajo, puede ser debido a una discontinuidad en forma de fisura o coquera.

Por lo tanto, por cada punto a analizar se han realizado 6 mediciones, disponiendo el palpador emisor en el punto central de uno de los cuadrados y a continuación el palpador receptor en los puntos distantes a 250 mm, 300 mm y 350 mm del primero en uno de los cuadrados adyacentes. La secuencia se ha repetido dos veces para completar el total de las 6 mediciones especificadas.

La emisión de la señal siempre se ha realizado de izquierda a derecha o de arriba a abajo respecto al alzado principal del muro. De este modo, el impulso se excita desde uno de los puntos centrales y se recibe sucesivamente en el conjunto de 5 puntos del cuadrado contiguo para cada una de las mediciones; en el punto izquierdo, en el central y en el derecho en caso de estudio horizontal y en el punto superior, en el central y en el inferior para análisis en vertical.

Como se indicará en el siguiente apartado, la técnica no permite obtener datos aclaratorios de la orientación y distribución del refuerzo de fibras en el muro. Debido al mayor interés por continuar con el procedimiento de corte del muro, no se ha considerado necesario chequear la totalidad de la estructura,

por lo que el estudio se ha localizado en varias hiladas y columnas del elemento. Las zonas de análisis se han repartido de manera distribuida a lo largo y alto del muro, con el fin de obtener medidas lo más representativas posibles.

5.2.2. Resultados de las mediciones

En las Figuras 5.3 y 5.4 se muestran los resultados de velocidad de propagación de impulsos ultrasónicos, estimados en base a la tangente del ángulo que forma respecto a la vertical la línea de regresión, que mejor se ajuste al binomio de valores tiempo-distancia.

Se debe hacer notar que la metodología propuesta en la norma correspondiente, no resulta adecuada, dado que en muchos de los puntos analizados aporta valores excesivamente elevados. Ello se debe a que varias de las mediciones realizadas estiman tiempos similares para cualquiera de las seis mediciones efectuadas por cada punto, independientemente de la longitud de la trayectoria que deba seguir la señal e independiente también, del valor de la propia medición efectuada.

En esta situación, la pendiente de la línea de regresión es muy reducida, lo cual conlleva un elevado valor de velocidad que no se corresponde con el tiempo medido en el equipo de ultrasonidos, pudiendo resultar independiente de éste. Parece más correcto establecer dicha velocidad de propagación en base a la media aritmética determinada entre los seis valores medidos en función de la distancia. Todos los valores y la diferencia entre lo indicado en la norma y la propuesta efectuada se recogen en el Anejo A.

La conclusión más directa de esta fase, y que se ha podido ir apreciando durante su realización, es la dispersión y discrepancia de las lecturas efectuadas. Dado que era previsible una ligera segregación de fibras en la cabeza del muro, el método debería haber aportado diferentes valores de velocidad entre la parte superior y la inferior del muro, hecho que no se ha visto reflejado. En cambio, zonas donde se esperaba una mayor alineación de fibras de acuerdo a alguno de los ejes, han aportado como resultado tiempos de transición elevados.

5.3. Métodos estereológicos

La estereología se basa en el análisis de secciones planas, como pueden ser las caras de corte de las probetas en el caso estudiado, para formar un conjunto tridimensional en base a ellas. En la presente tesis doctoral, se pretende conocer la cuantía de fibras dispuesta en cada probeta por medio del número de fibras seccionadas, que se localizan en las caras de corte.

Como dato de partida, es indispensable conocer el factor de orientación definido en el Apartado 2.2.2.2. También es posible recorrer el camino inverso, y en función de la densidad de fibras conocida y el factor de orientación, determinar el número de fibras en una sección, como se ha realizado en Dupont and Vandewalle (2005).

Dado que resulta casi imposible en una estructura de tamaño real que la densidad de refuerzo sea idéntica, en este estudio se procederá por la primera vía contando las fibras que se aprecian en los cortes.

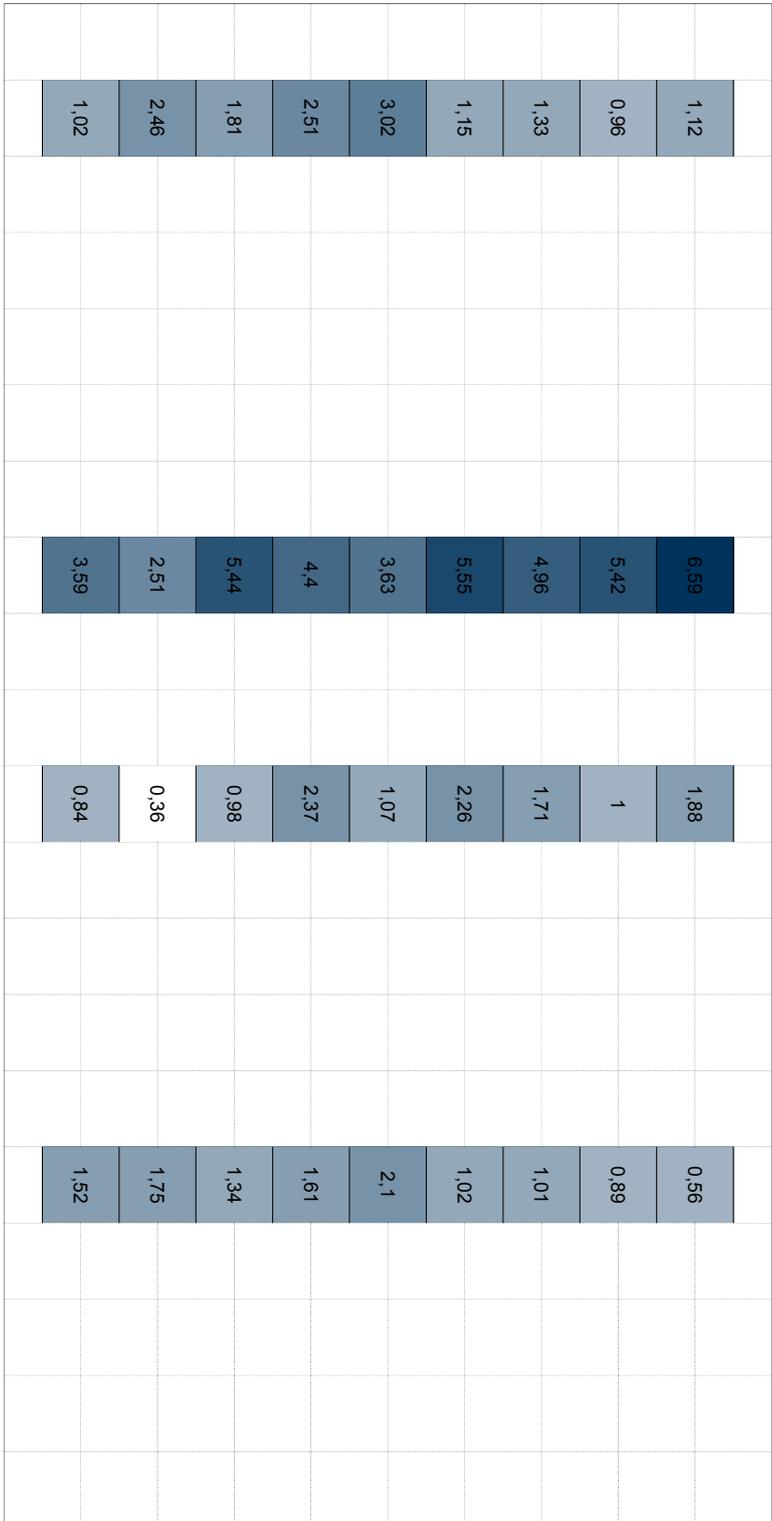
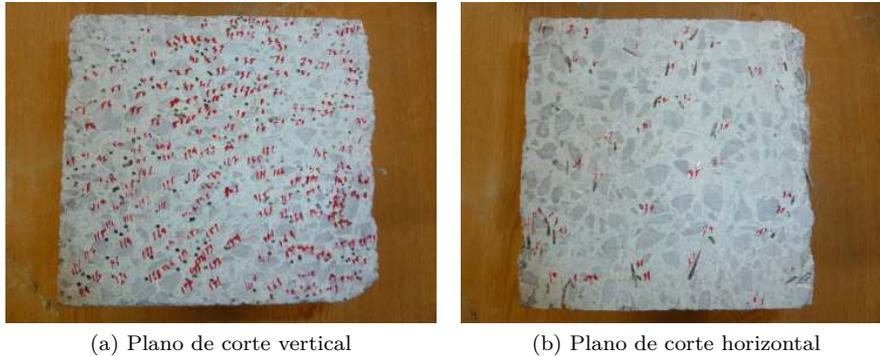


Figura 5.4: Velocidad de propagación de impulsos ultrasónicos por zonas (dirección vertical).



(a) Plano de corte vertical

(b) Plano de corte horizontal

Figura 5.5: Fibras seccionadas en planos de corte ortogonales.

5.3.1. Análisis de las caras de corte

Tras el corte de las 380 probetas, son múltiples las secciones donde se pueden contar las fibras cortadas. Se ha optado por analizar las probetas cúbicas, puesto que su geometría con lados similares los hace más idóneos para tal fin. De entre ellas, se ha seleccionado una columna central del muro, que puede resultar representativa de los movimientos de la masa.

De acuerdo a los ejes principales del muro, el hormigón se ha bombeado desde la esquina inferior izquierda recorriendo en sentido longitudinal o eje X la totalidad del encofrado. El eje Y se corresponde con la dirección transversal, mientras que el eje Z coincide con la vertical. Se ha establecido un procedimiento según el cual, se han numerado las fibras seccionadas en las caras derecha, (X positivos), y superior, (Z positivos), de cada una de las 17 probetas, de acuerdo a como se muestra en la Figura 5.5. En la misma se han introducido los datos de los ensayos magnéticos descritos posteriormente para identificar la densidad de fibras que alberga cada una de las probetas. A partir de dichos valores se pretende calcular el factor de orientación correspondiente.

5.3.2. Estimación del factor de orientación

La orientación de las fibras en una situación real de obra, difiere notablemente del estudio controlado de laboratorio en escala pequeña, donde las posibilidades de segregación y las direcciones de movimiento de la masa están limitadas en cierta medida. Por consiguiente, se entiende que el factor de orientación no sea único para la totalidad del muro, a diferencia de lo que ocurre con una probeta. Al mismo tiempo, dado que la distribución de las fibras se ha visto alterada, se muestran en la Tabla 5.1 las densidades de cada una de las probetas junto con el resto de los valores.

De los datos aportados en la Tabla 5.1, se concluye que el factor de orientación definido para la dirección longitudinal es de 0.69, con un coeficiente de variación del 11%. Estos resultados son concordantes con los datos aportados en la literatura [Dupont and Vandewalle (2005)] para orientaciones bidireccionales. Los valores obtenidos son incluso mayores puesto que de acuerdo a las hipótesis iniciales, se forzaría una orientación predeterminada en dirección X, o longitudinal del muro.

| Nº Probeta | Nº fibras en corte | | Densidad (Kg/m ³) | Factor de orientación | |
|------------|--------------------|------------|----------------------------------|-----------------------|------|
| | vertical | horizontal | | X | Z |
| 66 | 11 | 27 | 6 | 0.53 | 1.30 |
| 85 | 45 | 53 | 22 | 0.61 | 0.72 |
| 104 | 91 | 35 | 41 | 0.63 | 0.24 |
| 123 | 123 | 87 | 54 | 0.69 | 0.49 |
| 142 | 138 | 63 | 63 | 0.63 | 0.29 |
| 161 | 167 | 47 | 66 | 0.75 | 0.21 |
| 180 | 146 | 66 | 63 | 0.64 | 0.29 |
| 199 | 150 | 96 | 53 | 0.81 | 0.52 |
| 218 | 113 | 68 | 52 | 0.62 | 0.37 |
| 237 | 90 | 67 | 41 | 0.63 | 0.47 |
| 256 | 126 | 93 | 48 | 0.72 | 0.53 |
| 275 | 135 | 48 | 48 | 0.79 | 0.28 |
| 294 | 198 | 74 | 70 | 0.79 | 0.30 |
| 313 | 197 | 54 | 76 | 0.73 | 0.20 |
| 332 | 169 | 44 | 63 | 0.74 | 0.19 |
| 351 | 192 | 41 | 74 | 0.72 | 0.15 |
| 370 | 215 | N/A | 78 | 0.76 | N/A |

Tabla 5.1: Estimación del factor de orientación.

La dirección vertical presenta, en general, un factor más reducido debido a un campo de velocidades menos intenso en dicha dirección. Cabe destacar que en la zona media-alta de la columna estudiada, ese campo ha sido más intenso y, por tanto, las fibras se han alineado también en la dirección Z. Aún no siendo una orientación totalmente unidireccional, en la zona inferior las fibras se reparten mayoritariamente en la dirección longitudinal y a partes iguales en el resto de direcciones. En la zona superior, parece ser que la dirección vertical ha adquirido mayor relevancia en detrimento de la longitudinal, aunque ésta sigue siendo predominante.

Posteriores análisis mediante métodos magnéticos (Apartado 5.4) y dinámica de fluidos computacional (Capítulo 2.2.2.2) tratarán de corroborar los resultados mostrados en este apartado.

5.4. Métodos magnéticos

Recientemente han irrumpido con fuerza diversas técnicas no destructivas, en cuanto pueden aplicarse directamente al muro, para elementos de pequeño tamaño, precisando de la obtención de probetas en las aplicaciones reales, como las recogidas en el Apartado 2.2.4. De entre todas ellas la más interesante ha resultado ser el método magnético empleado en el presente estudio.

El fundamento del ensayo consiste en generar un campo magnético donde poder introducir las probetas de HACRFA y cuantificar la variación del mismo. Concretamente la variable de medida es la inductancia (L) del campo.

Se entiende que materiales ferromagnéticos, como lo son las fibras de acero, interpuestos en el campo magnético puede alterarlo. El hormigón u otros tipos de refuerzos, fibras poliméricas por ejemplo, resultan indiferentes a éste método.

| N° Bobina | Lado (mm) | Altura (mm) | Diámetro cable (mm) | Tipo cable | N° vueltas | Inductancia (H) |
|-----------|-----------|-------------|---------------------|---------------|------------|-----------------|
| 1 | 170 | 150 | 0,30 | Cobre desnudo | 8800 | 12.3 |
| 2 | 170 | 150 | 0,30 | Cobre desnudo | 8800 | 13.4 |
| 3 | 170 | 150 | 0,30 | Cobre desnudo | 6600 | 8.16 |

Tabla 5.2: Características del marco y del bobinado.

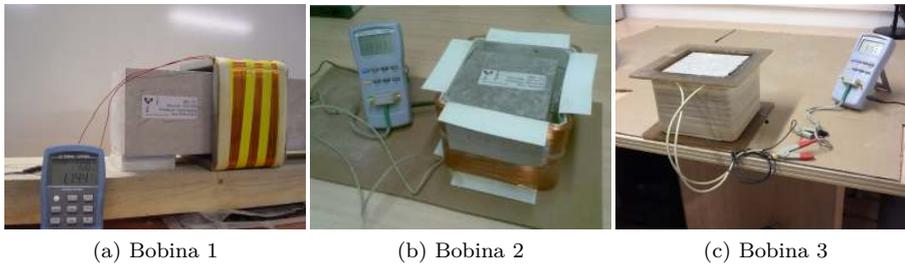


Figura 5.6: Bobinas utilizadas durante el estudio.

5.4.1. Configuración del ensayo

El estudio de las propiedades magnéticas del HACRFA se ha realizado mediante el empleo de tres bobinas que generan campos magnéticos diferentes. Se han construido mediante el bobinado de cable de cobre desnudo en diferentes longitudes sobre un marco. La Tabla 5.2 resume las dimensiones de los marcos y las características del cable bobinado.

Aunque las Bobinas 1 y 2 disponen de idénticas características, el proceso de fabricación de la Bobina 2 ha sido algo más rudimentario, para determinar si ello afecta en gran medida a los resultados obtenidos. La longitud del cable también se ha variado en la Bobina 3, con el fin de cuantificar si existe alguna relación entre las medidas obtenidas bajo campos de diferentes intensidades. La Figura 5.6 muestra las tres bobinas durante la realización de los ensayos.

Al mismo tiempo, los aparatos de medida empleados difieren también en cuanto a precisión se refiere. Para la medición de la Bobina 1 se han empleado un analizador de impedancia AGILENT U1732A, mientras que los valores de las Bobinas 2 y 3 se han obtenido por medio de un puente LCR 2821A.

Dichas mediciones se han realizado sobre la casi totalidad del muro, incluyendo 195 probetas cúbicas y 97 probetas prismáticas, tal y como se muestra en la Figura 5.9.

5.4.2. Análisis de las probetas cúbicas

Tal y como se ha descrito en el apartado precedente, en las probetas cúbicas se han realizado medidas por cada eje principal de la misma. La Figuras 5.10 a 5.13 muestran mediante un código de colores los diferentes porcentajes de

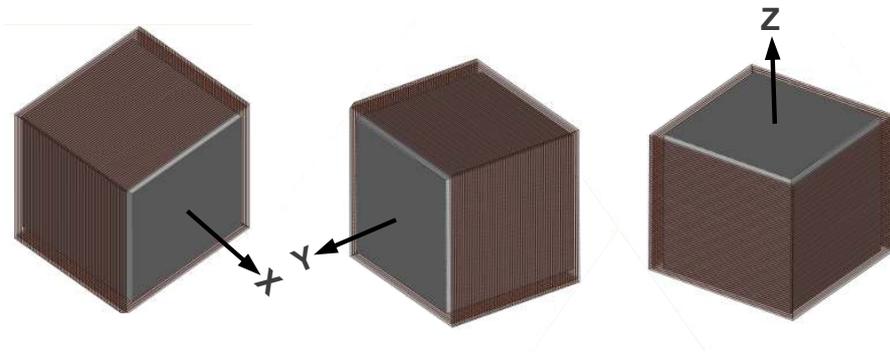


Figura 5.7: Procedimiento de medición en probetas cúbicas.

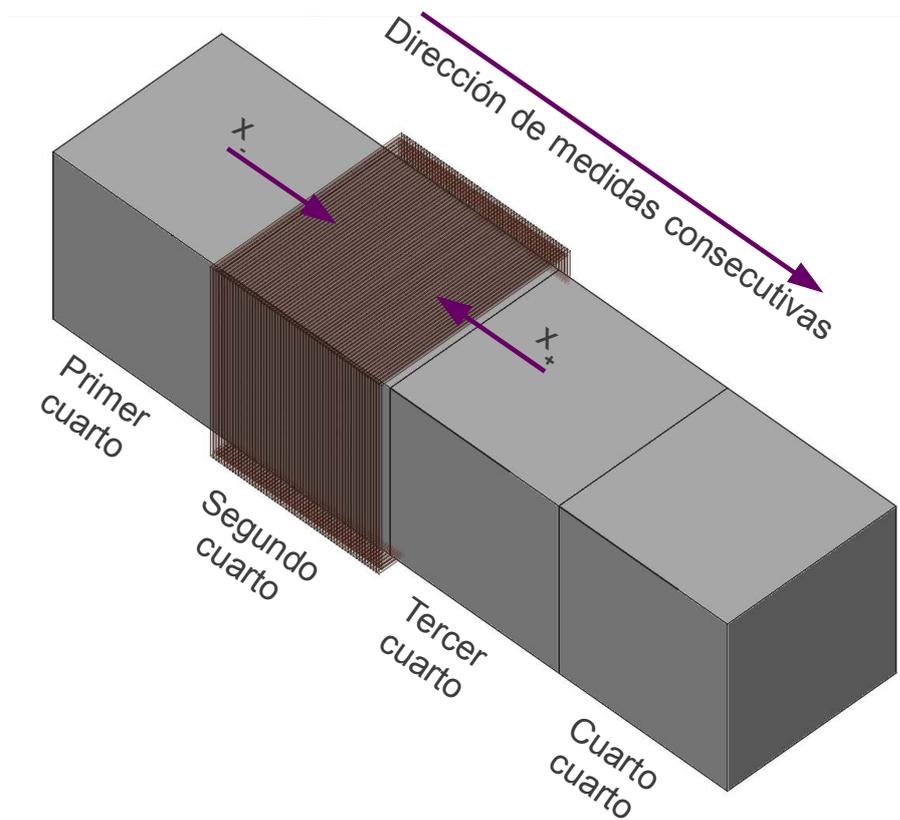


Figura 5.8: Procedimiento de medición en probetas prismáticas.

orientación para cada uno de los ejes, así como el valor medio de dichas medidas. Los valores numéricos de dichas mediciones se recogen en el Anejo B.1.

Se aprecia claramente que la orientación preferente coincide con la dirección longitudinal, eje X, debido al movimiento del flujo de la masa. En ciertos puntos

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 |
| 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 |
| 39 | 40 | 41 | 42 | 43 | 44 | 45 | 46 | 47 | 48 | 49 | 50 | 51 | 52 | 53 | 54 | 55 | 56 | 57 |
| 58 | 59 | 60 | 61 | 62 | 63 | 64 | 65 | 66 | 67 | 68 | 69 | 70 | 71 | 72 | 73 | 74 | 75 | 76 |
| 77 | 78 | 79 | 80 | 81 | 82 | 83 | 84 | 85 | 86 | 87 | 88 | 89 | 90 | 91 | 92 | 93 | 94 | 95 |
| 96 | 97 | 98 | 99 | 100 | 101 | 102 | 103 | 104 | 105 | 106 | 107 | 108 | 109 | 110 | 111 | 112 | 113 | 114 |
| 115 | 116 | 117 | 118 | 119 | 120 | 121 | 122 | 123 | 124 | 125 | 126 | 127 | 128 | 129 | 130 | 131 | 132 | 133 |
| 134 | 135 | 136 | 137 | 138 | 139 | 140 | 141 | 142 | 143 | 144 | 145 | 146 | 147 | 148 | 149 | 150 | 151 | 152 |
| 153 | 154 | 155 | 156 | 157 | 158 | 159 | 160 | 161 | 162 | 163 | 164 | 165 | 166 | 167 | 168 | 169 | 170 | 171 |
| 172 | 173 | 174 | 175 | 176 | 177 | 178 | 179 | 180 | 181 | 182 | 183 | 184 | 185 | 186 | 187 | 188 | 189 | 190 |
| 191 | 192 | 193 | 194 | 195 | 196 | 197 | 198 | 199 | 200 | 201 | 202 | 203 | 204 | 205 | 206 | 207 | 208 | 209 |
| 210 | 211 | 212 | 213 | 214 | 215 | 216 | 217 | 218 | 219 | 220 | 221 | 222 | 223 | 224 | 225 | 226 | 227 | 228 |
| 229 | 230 | 231 | 232 | 233 | 234 | 235 | 236 | 237 | 238 | 239 | 240 | 241 | 242 | 243 | 244 | 245 | 246 | 247 |
| 248 | 249 | 250 | 251 | 252 | 253 | 254 | 255 | 256 | 257 | 258 | 259 | 260 | 261 | 262 | 263 | 264 | 265 | 266 |
| 267 | 268 | 269 | 270 | 271 | 272 | 273 | 274 | 275 | 276 | 277 | 278 | 279 | 280 | 281 | 282 | 283 | 284 | 285 |
| 286 | 287 | 288 | 289 | 290 | 291 | 292 | 293 | 294 | 295 | 296 | 297 | 298 | 299 | 300 | 301 | 302 | 303 | 304 |
| 305 | 306 | 307 | 308 | 309 | 310 | 311 | 312 | 313 | 314 | 315 | 316 | 317 | 318 | 319 | 320 | 321 | 322 | 323 |
| 324 | 325 | 326 | 327 | 328 | 329 | 330 | 331 | 332 | 333 | 334 | 335 | 336 | 337 | 338 | 339 | 340 | 341 | 342 |
| 343 | 344 | 345 | 346 | 347 | 348 | 349 | 350 | 351 | 352 | 353 | 354 | 355 | 356 | 357 | 358 | 359 | 360 | 361 |
| 362 | 363 | 364 | 365 | 366 | 367 | 368 | 369 | 370 | 371 | 372 | 373 | 374 | 375 | 376 | 377 | 378 | 379 | 380 |

Figura 5.9: Probetas sobre las que se ha aplicado el método magnético (en negro).

la componente vertical del desplazamiento ha originado una mayor alineación de las fibras con el eje Z.

Indistintamente de la posición analizada, la dirección transversal, o eje Y, es la que menor variación de inductancia presenta, lo que resulta lógico debido a lo reducido del espesor del muro y los efectos pared que introducen los encofrados.

En vista de los valores mostrados, todas las hipótesis de partida resultan confirmadas. El bombeo del muro desde uno de los extremos obliga a las fibras a orientarse a lo largo del muro. Al no haber ido elevando la manguera durante el proceso de hormigonado, se originan también movimientos verticales que localizadamente pueden alterar la orientación deseada. Estos se concentran en mayor medida a los lados del tubo de hormigonado, sobre todo a la izquierda del mismo, debido al espacio reducido que se dispone entre el extremo del muro y la posición del tubo en el interior, y que fuerza a la masa en dirección vertical únicamente.

Las condiciones de obra han condicionado notablemente la ejecución del muro. Lo beneficioso del hormigonado mediante bombeo de la masa fresca, se ha visto contrarrestado por la segregación originada en la parte superior del muro. El agua de cebado albergada en la tolva de la bomba, al no mezclarse de manera homogénea con el HACRFA, ha creado una lechada de mortero más ligera, que ha flotado hacia la cabeza del muro. Esa es la razón por la que las probetas superiores del muro no alteran en ninguna de sus disposiciones el campo magnético en cuya influencia se han dispuesto.

Con motivo de determinar la posibilidad de establecer unos patrones de calibración mediante unas medidas controladas en laboratorio con equipos altamente precisos y poder relacionarlos con mediciones realizadas con bobinas y equipos diferentes a pie de obra, se han repetido las mediciones con las Bobinas 2 y 3.

Debido a que varias de las probetas han sido sometidas a ensayos de rotura, no ha sido posible repetir la totalidad de las medidas, pero el número de probetas empleado sigue siendo representativo del conjunto del muro. Las

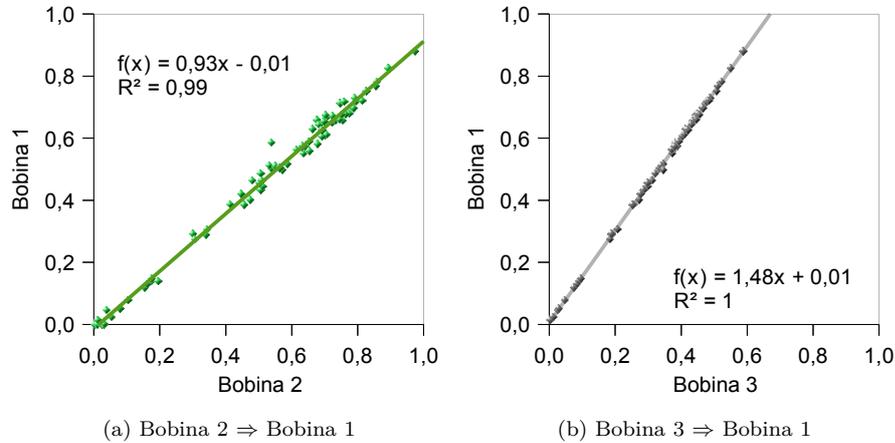


Figura 5.14: Correlación entre medidas mediante diversas bobinas.

Figuras 5.14a y 5.14b demuestran que existe una proporcionalidad entre todas las medidas realizadas. Los valores numéricos de dichas mediciones se recogen en el Anejo B.1.

Los factores de calibración obtenidos, son de 0.93 y 1.48 para transformar los valores de las bobinas 2 y 3 a valores de la bobina 1. Estos coeficientes resultan similares a la relación entre inductancias de las bobinas que se quieren comparar. La diferencia entre la relación y los factores calculados, introduce un error aceptable, de 1.9% y 1.6% respectivamente.

5.4.3. Análisis de las probetas prismáticas

Al mismo tiempo, se ha aplicado el método magnético a las probetas prismáticas. Debido al tamaño de la probeta y la configuración de la bobina, únicamente es posible realizar su medición a lo largo de la dirección longitudinal o eje X.

Se pretende con este procedimiento, relacionar las propiedades magnéticas y resistentes del material, obtenidas éstas últimas mediante el ensayo a flexotracción (Apartado 6.6) de las probetas. Esta proposición no busca sustituir el ensayo a flexotracción aceptado por la amplia mayoría de los comités técnicos, el cual es más apropiado, si se dispone de una probeta que ensayar y cuantificar de manera directa, el límite proporcional y las resistencias residuales.

Sin embargo, la obtención de una ecuación que relacione ambas propiedades puede ser beneficiosa para el desarrollo de los métodos magnéticos de cara a su aplicación a pie de obra, donde no se dispone de probetas sino de elementos estructurales de escala real. Esta propuesta está en línea con los estudios realizados hasta la fecha por [Orbe et al (2012)].

Se realizan por tanto, seis mediciones por cada probeta; una en cada cuarto de la misma y otras dos de manera exterior; es decir, junto a la probeta pero estando ésta fuera del marco. Esto permitirá disponer de medidas adicionales que sirvan para determinar la influencia, o variación de la inductancia del



Figura 5.15: Medición de las probetas prismáticas.

campo magnético, de las fibras albergadas en el tramo de probeta adyacente y exterior a la bobina.

Esto quiere decir que la medida inicial se debe corregir mediante un factor de corrección a fin de descartar esa interferencia y obtener el valor real aportado por las fibras del cuarto de probeta estudiado. Esos factores de conversión se obtendrán de manera experimental y analítica. La vía experimental requiere cortar las probetas prismáticas en cuatro probetas cúbicas y proceder a su medida como tales, de acuerdo al procedimiento seguido en 5.4.1.

$$\begin{pmatrix} H_{x0-,prism} \\ H_{x1,prism} \\ H_{x2,prism} \\ H_{x3,prism} \\ H_{x4,prism} \\ H_{x0+,prism} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & x_+ & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & x_+ & 0 & 0 & 0 \\ 0 & x_- & 1 & x_+ & 0 & 0 \\ 0 & 0 & x_- & 1 & x_+ & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x_- & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_- & 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} H_{x0-,cub} \\ H_{x1,cub} \\ H_{x2,cub} \\ H_{x3,cub} \\ H_{x4,cub} \\ H_{x0+,cub} \end{pmatrix} \quad (5.1)$$

La alternativa analítica resuelve la ecuación matricial mostrada en la Ecuación 5.1. Se parte de los valores medidos sobre la probeta prismática e iterativamente se procede a determinar unos factores de corrección válidos para todas las ecuaciones. Ante posibles diferencias de fabricación de la bobina, se opta por establecer dos factores de corrección diferentes: uno, para la influencia de las fibras anteriores a la bobina y, otro, para las posteriores.

La Tabla B.2 del Anejo B.1 muestra los valores de las mediciones de la variación de la inductancia para 48 probetas prismáticas, para los cubos cortados de 7 de aquellas y los estimados por el procedimiento analítico. Se establecen a su vez los factores de corrección a tener en cuenta. Dichos factores se presentan en la Figura 5.16 y se observa que ambas vías son válidas. Los valores obtenidos

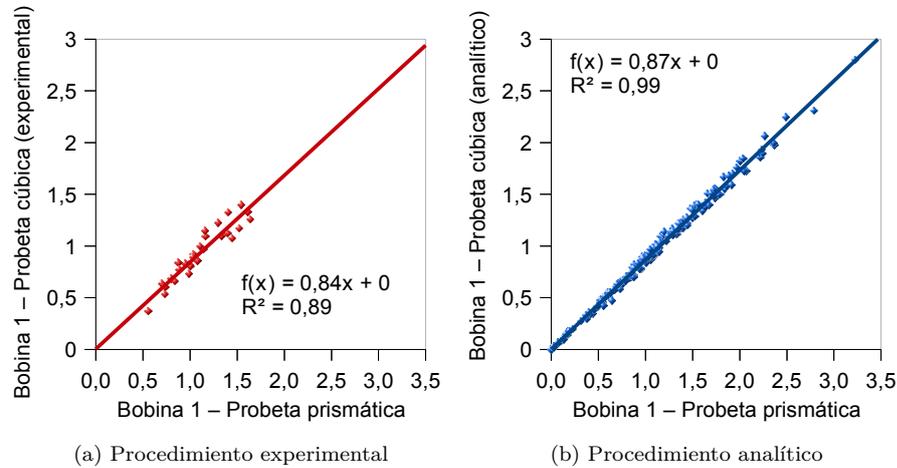


Figura 5.16: Correlación entre medidas sobre probetas prismáticas y cúbicas.

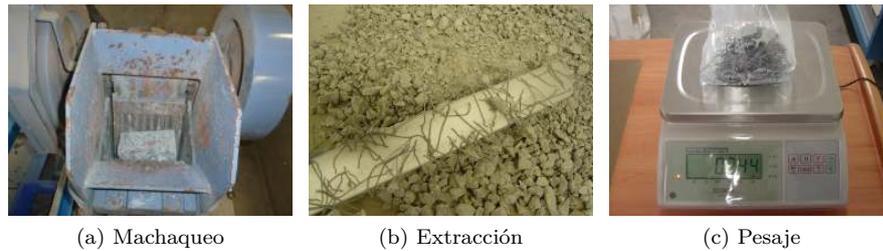


Figura 5.17: Machaqueo, extracción y pesaje de las fibras de las probetas.

en ambos casos son muy similares entre sí. Incluso el método analítico parece más preciso, pero ello se puede deber a la eventual pérdida de masa de acero durante el corte de las probetas, previo a su posterior medición como elementos cúbicos.

Se concluye que los valores medidos sobre probetas prismáticas deben de reducirse entre un 13 y un 17% para contrarrestar el efecto sumatorio de las fibras adyacentes a la zona de estudio.

5.4.4. Estimación de la densidad de fibras

Las diferencias en los valores de variación de inductancia medidos en las diversas posiciones a lo largo y alto del muro, han permitido cuantificar una curva de calibración que permita relacionar el valor medio de la variación con la densidad (en kg/m^3) de refuerzo de fibras. Para ello, se han seleccionado diferentes probetas y se han machacado hasta poder separar las fibras de acero de la matriz de hormigón. Dicha extracción se ha realizado mediante la ayuda de un imán y posteriormente se ha pesado el acero que albergaba cada una de las probetas (Figura 5.17).

La Figura 5.18 muestra los valores de densidad de fibras respecto a la va-

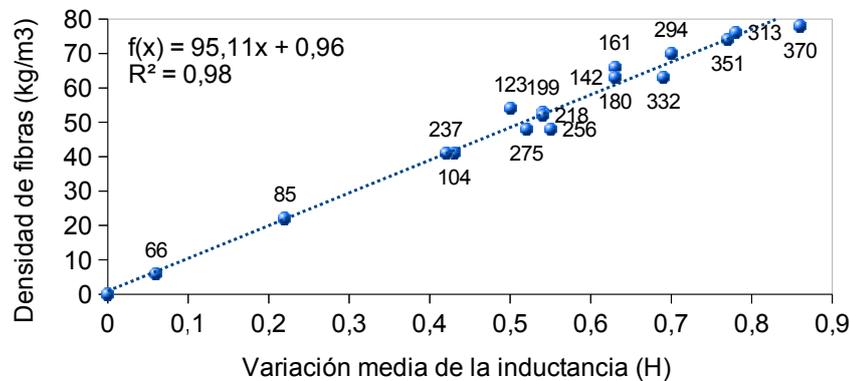


Figura 5.18: Relación entre los valores de variación medios de la inductancia y la densidad de fibras.

riación media de la inductancia medida con la Bobina 1. Se aprecia que la relación entre ambos parámetros es lineal, con un coeficiente de determinación (R^2) cercano a la unidad, lo que corrobora lo ajustado de la ecuación obtenida.

Con las relaciones mostradas en apartados anteriores (Apartado 5.4.2), es posible determinar la densidad de fibras en base a la fórmula calculada. Con los datos aportados es posible detectar un variación de 1 kg/m^3 de refuerzo mediante fibras, en base a la variación media de la inductancia de 0.01 H.

5.4.5. Estimación del factor de orientación

Al igual que la densidad de fibras, parece posible estimar el factor de orientación que presentan en base a los porcentajes de variación de inductancia medidos. En el Apartado 2.2.2.2 se establecen los principios de lo que dicho factor representa y su valor para los casos típicos de orientación unidimensional, bidimensional y tridimensional.

El procedimiento que se ha seguido, consiste en determinar cual es el porcentaje de variación de inductancia para cada uno de los tres ejes principales estudiados en las probetas cúbicas mediante el método magnético y corregir dicho valor en base a una curva de carácter potencial. Esta corrección se realiza para tener en cuenta en las medidas, las diferentes situaciones dimensionales (1D, 2D y 3D) que se puedan dar en el elemento. Es decir, la suma de los factores obtenidos de los porcentajes, debe ser igual a 1 en el caso más simple, donde las fibras únicamente pueden tener una dirección, igual a 1,272 cuando las fibras se pueden alinear de acuerdo a un plano y 1,5 para el caso donde la orientación puede ser espacial. La Figura 5.19 se confecciona en base a los datos de los casos singulares antes descritos.

Comparando los resultados recogidos en el Apartado 5.3.2, se obtienen unos valores muy aproximados. Las desviaciones estándar son muy ajustadas para los ejes X e Y, mientras que en el eje vertical, el eje Z, resultan algo más elevadas. Idéntica situación se constata cuando se analizan los ratios respecto al valor estimado en base a métodos estereológicos como bien se aprecia en la

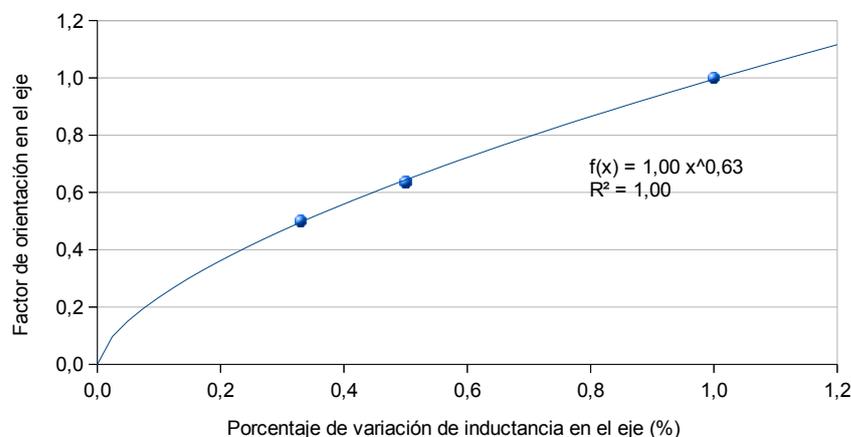


Figura 5.19: Curva de corrección del factor de orientación.

| N° Probeta | Var. inductancia (%) | | | Factores de orientación | | | Ratio est/mag | |
|----------------|----------------------|-------|-------|-------------------------|-------|-------|---------------|-------|
| | eje X | eje Y | eje Z | eje X | eje Y | eje Z | eje X | eje Z |
| 66 | 50 | 18 | 33 | 0.64 | 0.34 | 0.49 | 0.83 | 2.64 |
| 85 | 45 | 16 | 39 | 0.61 | 0.31 | 0.55 | 1.01 | 1.31 |
| 104 | 56 | 16 | 27 | 0.69 | 0.32 | 0.44 | 0.91 | 0.55 |
| 123 | 55 | 18 | 27 | 0.68 | 0.34 | 0.44 | 1.01 | 1.11 |
| 142 | 54 | 19 | 27 | 0.68 | 0.35 | 0.43 | 0.93 | 0.67 |
| 161 | 66 | 14 | 20 | 0.77 | 0.30 | 0.36 | 0.98 | 0.59 |
| 180 | 67 | 13 | 21 | 0.77 | 0.27 | 0.37 | 0.83 | 0.78 |
| 199 | 49 | 13 | 39 | 0.63 | 0.27 | 0.55 | 1.27 | 0.94 |
| 218 | 56 | 14 | 29 | 0.70 | 0.29 | 0.46 | 0.89 | 0.81 |
| 237 | 51 | 12 | 37 | 0.65 | 0.27 | 0.54 | 0.97 | 0.87 |
| 256 | 48 | 13 | 39 | 0.63 | 0.28 | 0.55 | 1.15 | 0.96 |
| 275 | 64 | 14 | 22 | 0.75 | 0.29 | 0.38 | 1.04 | 0.73 |
| 294 | 67 | 18 | 15 | 0.77 | 0.34 | 0.30 | 1.02 | 0.97 |
| 313 | 64 | 18 | 18 | 0.75 | 0.34 | 0.34 | 0.97 | 0.59 |
| 332 | 69 | 19 | 12 | 0.79 | 0.35 | 0.27 | 0.94 | 0.73 |
| 351 | 68 | 21 | 11 | 0.78 | 0.37 | 0.25 | 0.91 | 0.61 |
| 370 | 70 | 20 | 10 | 0.80 | 0.36 | 0.23 | 0.95 | N/A |
| Media | | | | 0.71 | 0.32 | 0.41 | 0.98 | 0.93 |
| Desv. Est. (%) | | | | 9.16 | 10.75 | 26.21 | 11.21 | 53.98 |

Tabla 5.3: Estimación del factor de orientación en base a métodos magnéticos.

Tabla 5.3.

Las discrepancias entre ambas aproximaciones pueden tener su origen en cómo se fundamentan los datos de partida. Mientras que los métodos estereológicos analizan las fibras que asoman a la superficie, el método magnético, y más si cabe con la configuración actual, aporta un mayor peso a la cuantía de fibras en el interior de la probeta. Sin embargo, no cabe duda, que en la realidad

el factor de orientación no puede ser un valor constante a lo largo de todo el muro y que depende del volumen analizado, por lo que siempre existirán ligeras discrepancias. Aún así, los valores son próximos y se ajustan a las previsiones establecidas desde un inicio respecto a la orientación de las fibras.

De acuerdo a los valores de la tabla, se demuestra que la orientación preferencial coincide con el eje longitudinal del muro, presentando una menor cuantía en dirección vertical y, sobre todo, transversal. De tal manera, que el factor de orientación medio para la columna de probetas estudiada, que se localiza sobre la mitad del muro, presenta una clara tendencia hacia la orientación unidimensional. El ángulo que formaría la orientación media será más reducido para el eje X en comparación con los otros dos. Estos ángulos se pueden estimar de acuerdo a la Ecuación (5.2). Introduciendo el porcentaje de variación de la inductancia para cada eje ($\Delta L_{i, \%}$), se obtiene el ángulo de orientación medio para dicho eje ($\theta_{i,m}$).

$$\theta_{i,m} = \arccos\left(\sqrt{\frac{\Delta L_{i, \%}}{100}}\right) \cdot \frac{180}{\pi} \quad (5.2)$$

Existen estudios [Laranjeira (2011)] que relacionan el ángulo de orientación medio con el factor de orientación ($\eta_{i,\theta}$) de acuerdo a la Ecuación (5.3), pero se ha constatado que dichos factores resultan superiores a los reales. Para un caso netamente tridimensional donde las fibras no tienen ningún tipo de restricción para posicionarse en cualquier ángulo en el espacio, la orientación media debería ser idéntica para los tres ejes principales e igual a 54.736° . Aplicando la aproximación propuesta por [Laranjeira et al (2010)], se obtendría un factor de 0.577, resultando superior al establecido para el caso tridimensional.

$$\eta_{i,\theta} = \cos\left(\theta_{i,m} \cdot \frac{\pi}{180}\right) \quad (5.3)$$

5.5. Tomografía axial computerizada

Paralelamente, se plantea la necesidad de visualizar realmente el interior de las probetas para corroborar los datos recabados en el resto de ensayos. La tomografía axial computerizada (TAC) se centra en el estudio de imágenes radiográficas obtenidas repetidamente para secciones de reducido espesor a lo largo de la probeta. El post-procesado de dichas imágenes planas, permite la reconstrucción tridimensional del conjunto con gran fiabilidad sobre el contenido de la muestra.

En este estudio se han realizado los ensayos en dos tomógrafos diferentes. Por un lado, se han extraído unos testigos de las probetas cúbicas y analizado en la Universidad de Burgos, mediante un tomógrafo Y.CT Compact de la casa comercial YXLON (Figura 5.20a) para el estudio de piezas de tamaño reducido. Por otro, se ha empleado el tomógrafo clínico LightSpeed VCT de GE Healthcare, que emplea TAC64 S.L. (Figura 5.20b), a fin de poder examinar probetas de mayor tamaño, para lo cual se ha introducido una de las probetas prismáticas (150 x 150 x 600 mm) extraídas del muro.



Figura 5.20: Tomógrafos empleados durante el estudio.

5.5.1. Procedimiento del estudio

Las características de uno y otro tomógrafo resultan diferentes, debido a que cada uno está diseñado para diferentes aplicaciones. La fuente y el receptor de los rayos X se posicionan en el mismo plano que la sección de la probeta cuya imagen se obtiene, al contrario que en las radiografías. La fuente de rayos X emite una señal que, tras atravesar el elemento de estudio, es recibida por el detector con cierta atenuación. La reconstrucción tridimensional del modelo parte de imágenes planas (píxeles), generando vóxeles, que representan el interior del elemento analizado.

La atenuación registrada depende en gran medida de la potencia e intensidad de la fuente emisora, las dimensiones de la pieza o las propiedades físicas del material atravesado. Cada uno de los píxeles adquiere un color de la escala de grises, siendo convencionalmente el color negro el que denota poca o nula atenuación y el color blanco el que indica el mayor grado de absorción de la señal por parte del material.

El modelo Y CT consiste en un equipo compacto de dimensiones reducidas y limitación en el tamaño y peso del cuerpo a analizar. En él, el emisor y receptor se mantienen estáticos mientras que es la pieza de estudio la que se desplaza verticalmente al mismo tiempo que gira sobre su eje vertical. Esto permite obtener los datos desde diversos ángulos.

Por contra, el tomógrafo LightSpeed VCT se emplea para la realización de tomografías axiales computerizadas sobre pacientes humanos que permanecen inmóviles de manera tumbada, por lo que en este caso son la fuente y el receptor los que se trasladan y giran a lo largo de la zona de estudio.

5.5.2. Resultados en probetas pequeñas

Como probetas pequeñas se han empleado testigos extraídos de manera frontal de las probetas 273 y 292. En la primera posición se ha perforado un cilindro de 50 mm de diámetro y 150 mm de longitud, mientras que en el segundo caso, el diámetro ha sido de 100 mm con igual longitud. La perforación de los testigos se ha realizado desde la cara frontal a la cara trasera de la probeta,

coincidiendo con el eje Y o transversal del muro. La longitud, evidentemente, queda limitada por el espesor del muro.

La diferencia de diámetros es consecuencia de la posible excesiva atenuación de los rayos X en la zona central. Por ello se ha optado por realizar pruebas con medidas diferentes. Sin embargo, la potencia del tubo ha sido suficiente en ambos casos para penetrar en la probeta aportando suficiente nitidez.

Las probetas se disponen sobre un soporte que gira y se desplaza verticalmente mientras el emisor y receptor se mantienen fijos. Se obtienen imágenes mediante rayos X cada 0.25 mm para su posterior reconstrucción mediante software específico.

En las vistas mostradas en las Figuras 5.21 y 5.22, se aprecia que la mayoría de las fibras se orientan de izquierda a derecha, disposición que coincide con el eje longitudinal y las hipótesis de partida establecidas. Debido a las pequeñas dimensiones del cilindro muchas de las fibras se muestran seccionadas.

El post-procesado de las imágenes obtenidas permiten cuantificar el número de fibras, su volumen y la porosidad de la muestra. De acuerdo a los valores resumidos en la Tabla 5.4, la densidad de fibras estimada y la porosidad son acordes a lo esperado.

5.5.3. Resultados en probetas grandes

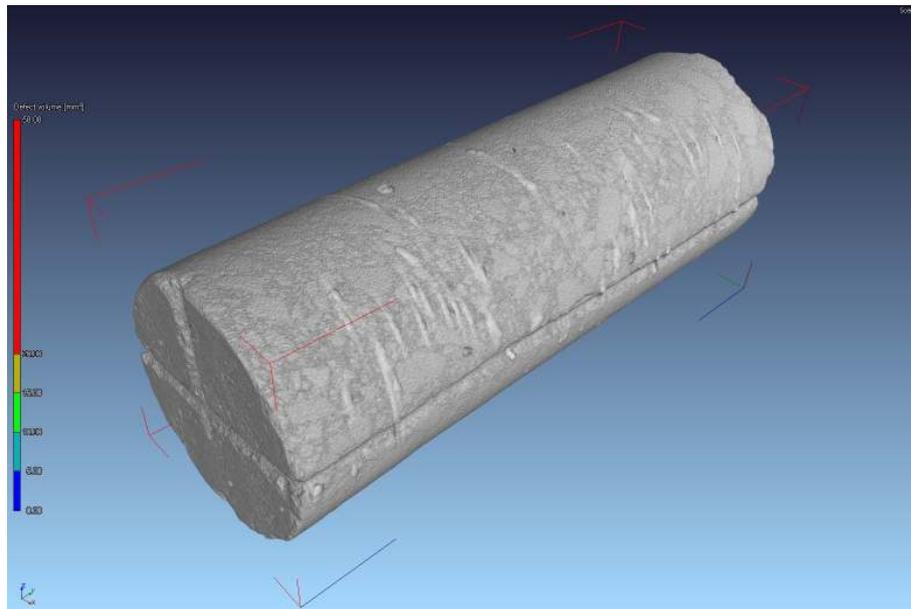
Con motivo de contrastar los resultados obtenidos para las probetas pequeñas, se plantea la realización de otra tomografía en una de las probetas prismáticas. De esta manera se pretende visualizar en un elemento representativo del muro la orientación preferente de las fibras. La probeta analizada, número 328, se localiza en la parte inferior cercana al punto de bombeo.

Debido al tamaño de la probeta, se ha empleado un tomógrafo clínico en lugar de uno industrial. En este caso, la probeta se mantiene estática, como si de un paciente se tratara, mientras que el emisor y el receptor se desplazan y giran a lo largo. El tomógrafo dispone de un tubo de menor potencia y la separación mínima posible entre secciones no puede reducirse más allá de los 0.60 mm. Aún así, resulta suficiente para poder reconstruir el modelo tridimensional sin alteraciones apreciables.

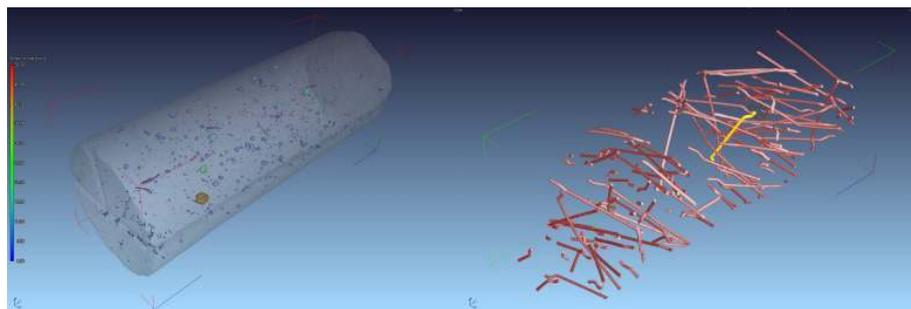
En la Figura 5.23 se muestra con mayor claridad que la orientación adoptada por las fibras tiende a alinearse con el eje X de las probetas. Es posible incluso discernir los efectos pared en las cercanías de los encofrados. No se ha podido medir adecuadamente el volumen de fibras puesto que, las imágenes obtenidas se mostraban con cierto porcentaje de ruido en el perímetro de las fibras. Sin embargo, su información cualitativa sigue siendo muy valiosa para estimar orientaciones preferentes y distribuciones de fibras.

5.5.4. Estimación de la densidad de fibras

Los modelos generados permiten identificar y cuantificar el volumen de fibras, poros o pasta de cemento de que se compone la probeta. La Tabla 5.4 recoge los datos de los testigos pequeños. Se aprecia que el sumatorio del área de fibras seccionado en cada radiografía a lo largo del plano X, es el que menor valor muestra. Ello es debido a que las fibras, al estar orientadas en dirección paralela al eje X, se seccionan de manera perpendicular a su eje mostrando un



(a) Vista isométrica



(b) Poros >0.1 mm

(c) Fibras



(d) Vista frontal

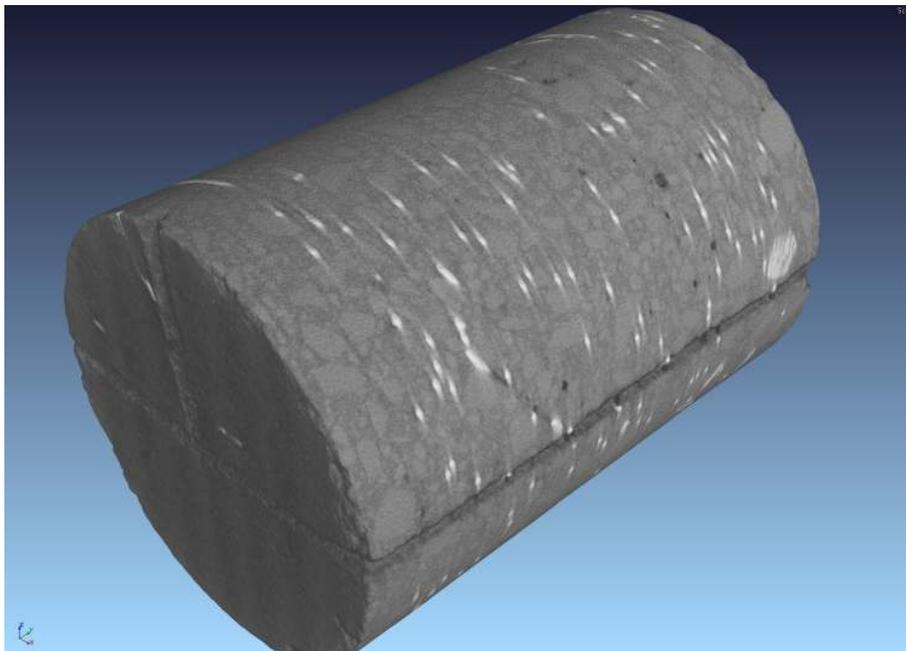
(e) Vista lateral

(f) Vista superior

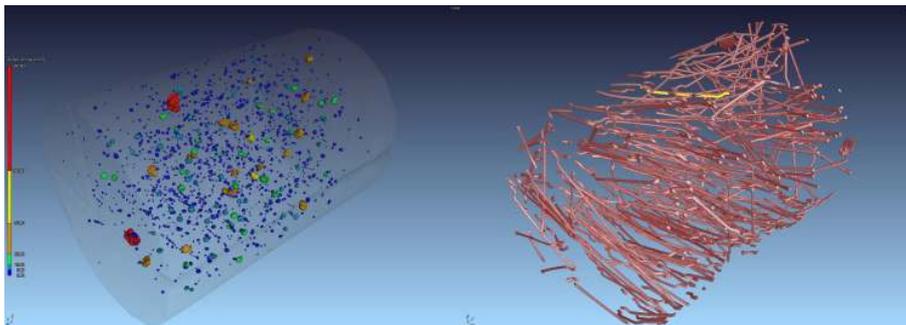
Figura 5.21: Testigo de probeta 292.

área más reducida que si fuesen cortadas de manera longitudinal, lo cual indica su disposición predominante a lo largo del eje longitudinal del muro.

De acuerdo a estos datos, el testigo de la probeta 273 presenta una cuantía de fibras correspondiente a un 1.02% del volumen estudiado, mientras que la relativa a la probeta 292, alberga en su interior un volumen de 0.77% de fibras.



(a) Vista isométrica

(b) Poros >0.1 mm

(c) Fibras



(d) Vista frontal

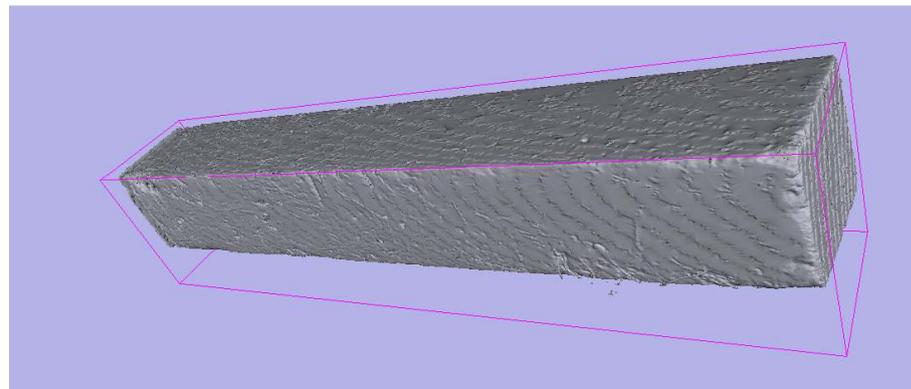
(e) Vista lateral

(f) Vista superior

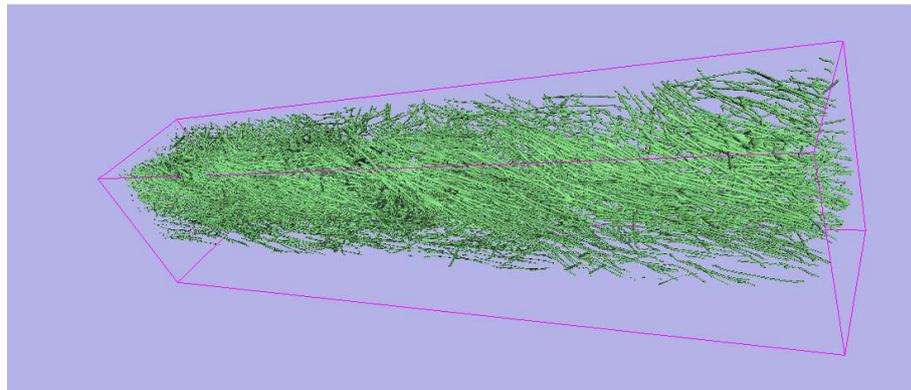
Figura 5.22: Testigo de probeta 273.

5.5.5. Correlación con ensayos magnéticos

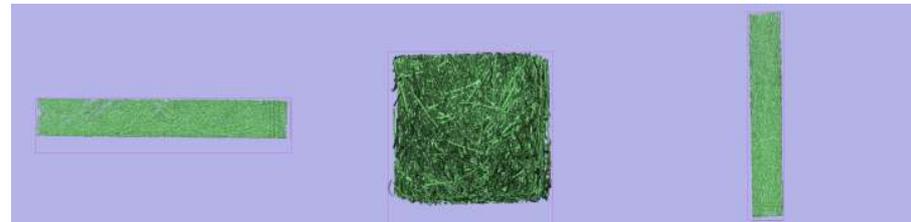
Con antelación a la realización de las tomografías sobre los testigos, se ha procedido a su análisis pormenorizado, tras su extracción de la probeta,



(a) Vista isométrica



(b) Fibras



(c) Vista frontal

(d) Vista lateral

(e) Vista superior

Figura 5.23: Probeta 328.

mediante el método magnético expuesto anteriormente. La Tabla 5.5 recoge los valores de la variación de la inductancia para ambos testigos, así como el porcentaje que representa el sumatorio de la proyección de las fibras de cada rebanada para cada eje, obtenido del ensayo tomográfico.

Se demuestra que existe una relación directa entre los valores obtenidos en ambos estudios, siendo evidentemente inversamente proporcionales la variación de la inductancia, o mayor orientación de las fibras respecto a un eje, con la suma de las áreas de las fibras registradas en cada una de las rebanadas de la tomografía. Dicha relación se muestra en la Figura 5.24 junto con la ecuación que gobierna dicha relación y el excelente parámetro de ajuste.

| | | |
|------------------------------------|----------|---------|
| N° Probeta | 273 | 292 |
| Diámetro (mm) | 100 | 50 |
| Longitud (mm) | 150 | 150 |
| Volumen Probeta (mm ³) | 1083594 | 286538 |
| Volumen Poros (mm ³) | 2661 | 381 |
| Volumen Fibras (mm ³) | 11096 | 2206 |
| ΣX (mm ²) | 5515.73 | 1513.05 |
| ΣY (mm ²) | 12665.92 | 2548.57 |
| ΣZ (mm ²) | 10579.94 | 2331.72 |

Tabla 5.4: Resultados del TAC en las probetas pequeñas.

| | | |
|----------------|-------|-------|
| N° Probeta | 273 | 292 |
| ΔL_x | 0.101 | 0.500 |
| ΔL_y | 0.012 | 0.068 |
| ΔL_z | 0.025 | 0.152 |
| ΣX (%) | 0,19 | 0.24 |
| ΣY (%) | 0,44 | 0.40 |
| ΣZ (%) | 0,37 | 0.36 |

Tabla 5.5: Datos del estudio magnético y del análisis tomográfico.

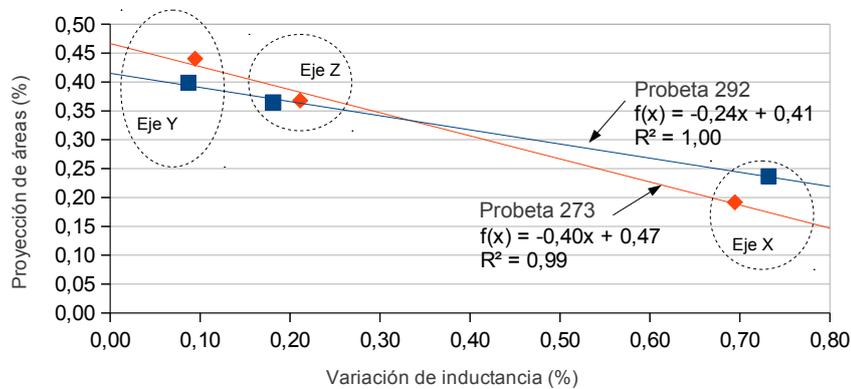


Figura 5.24: Relación entre el método magnético y la tomografía axial computerizada.

5.6. Atenuación de señales

Paralelamente, colegas de la ETSI de Bilbao han desarrollado un estudio sobre el diseño e implementación de un sistema de medidas para caracterizar el material empleado [Moreno (2013)]. De manera inicial se ha determinado el rango de frecuencias en las que puede operar el sistema para definir las dimensiones de las antenas *microstrip*. Para ello, ha sido necesario establecer la permitividad relativa del *host* en base a un sistema que simula el funcionamien-

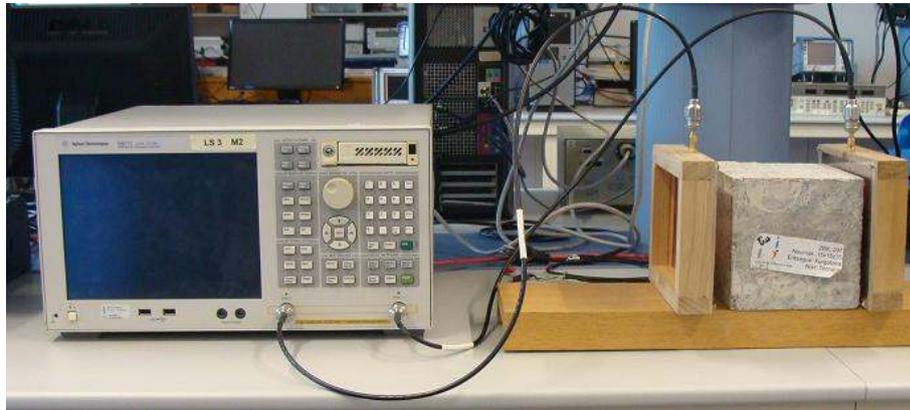


Figura 5.25: Arquitectura del sistema de medidas.

to de un condensador.

Para calcular la atenuación y el retardo que sufren las señales emitidas a través de las probetas cúbicas empleadas, se hubo de diseñar el sistema cuya arquitectura se aprecia en la Figura 5.25. De los resultados se aprecia que a mayor densidad de fibras, mayor es la atenuación que sufre la señal. Sin embargo, para densidades bajas la dispersión es mayor lo que indica que ligeras variaciones en la densidad pueden implicar cambios significativos en la atenuación. Parece ser que los retardos son similares en los tres ejes para cuantías de fibras inferiores a la nominal, independientemente que exista un eje con mayor porcentaje de orientación, mientras que para cuantías superiores los retardos se ven incrementados en la dirección con mayor alineación de fibras. Todos los resultados de dicho ensayo se encuentran en la citada referencia.

5.7. Determinación de la permeabilidad

Desde un inicio de la presente investigación se ha planteado la necesidad de suponer una aplicación estructural concreta para el estudio de un elemento real. Esta aplicación consiste, en este caso, en el diseño de depósitos de contención cilíndricos. Además de todos los aspectos resistentes que se analizarán mediante los ensayos destructivos mencionados en el Capítulo 6 y complementados con parte de los descritos anteriormente en este capítulo, es indispensable un correcto funcionamiento del tanque. En caso contrario, se originarán filtraciones hacia el interior del material, que pueden originar diversos daños, ataques químicos por lo general al hormigón y al acero. En el peor de los casos según los usos del tanque, dichas filtraciones pueden aflorar al exterior, causando alteraciones en la estética del conjunto e incluso daños medioambientales y a la salud humana.

Tal y como recogen las diversas normativas sobre hormigón EHE-08 (2008), es necesario un control de la fisuración para evitar los daños mencionados. En este estudio, se ha determinado la permeabilidad del hormigón diseñado a fin de corroborar un adecuado comportamiento durante la fase de servicio.

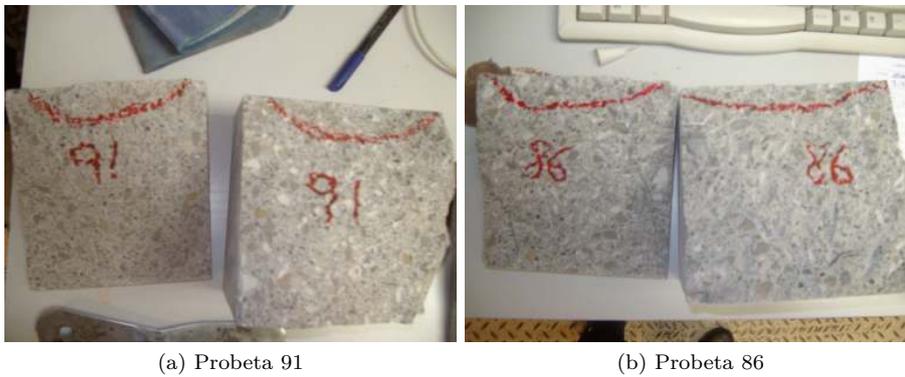


Figura 5.26: Probetas y frente de penetración medido.

| Nº Probeta | 86 | 91 | 196 | 200 | 205 | 310 | 314 | 319 |
|------------------|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Penetración (mm) | 25 | 30 | 18 | 18 | 20 | N/A | 20 | 17 |

Tabla 5.6: Valores de penetración de agua bajo presión.

5.7.1. Procedimiento del ensayo

Se han utilizado probetas cúbicas de 15 cm de lado para el estudio de la permeabilidad de acuerdo a la norma UNE-EN 12390-8. La preparación y ejecución del ensayo se realiza según se indica en dicha norma con una única salvedad. Dado que se intenta relacionar la estructura estudiada con una aplicación concreta, los depósitos de contención circulares en este caso, se ha considerado más razonable ejercer dicha presión en las caras encofradas, al contrario de lo que indica la norma.

En ella se indica que no se debe aplicarla sobre la cara de acabado, pero en la presente investigación se considera fundamental garantizar la impermeabilidad a lo largo del espesor del muro, puesto que será la dirección de posibles filtraciones del contenido del depósito. Esta comprobación se realiza para ciertos ambientes agresivos, de acuerdo a clases generales de exposición III y IV y en los casos donde se establezca una clase específica de exposición.

En la Figura 5.26 se ilustran los frentes de penetración de agua para dos de las probetas.

5.7.2. Resultados de penetración

Los valores de penetración de agua bajo presión de las probetas ensayadas se muestran en la Tabla 5.6. La probeta 310 presenta fugas durante la realización del ensayo, por lo que no se ha considerado válido el mismo. De acuerdo a la Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08), en el peor de los casos, la máxima profundidad a alcanzar debe ser de 30 mm, con una media límite de 20 mm. En todos los casos estudiados se cumple la comprobación.

De las Figuras 5.21b y 5.22b, se puede concluir que el hormigón de dichos testigos presenta pequeños poros, que no están excesivamente interconectados entre ellos, por lo que la tendencia del material debe ser mostrar un buen com-

portamiento frente a la penetración de agua. El volumen de defectos mayores de 1 mm^3 es del 0.24% y 0.13% para los testigos de las probetas 273 y 292, respectivamente. Dichos valores pueden considerarse bajos.

Como ya se ha mencionado anteriormente (Apartado 4.4.1) aún habiendo realizado un curado inadecuado, la libertad de movimiento que le confiere la base articulada no genera fisuración alguna en el muro, que debilite al material en relación a sus propiedades impermeables.

5.8. Consideraciones finales

Se han estudiado diversas técnicas de medición, directas e indirectas, e implementado en el análisis de las probetas extraídas del muro. De acuerdo a todo lo expuesto en el presente apartado, de entre todos los métodos empleados el que reúne de manera más efectiva los aspectos económicos, de fiabilidad y simplicidad es sin lugar a dudas el método magnético.

La medición de la velocidad de los impulsos ultrasónicos no aporta información clara sobre la orientación preferente de las fibras dentro de la matriz de hormigón. Ello se ha contrastado con el análisis visual de todas las caras de corte de las probetas. Al mismo tiempo, los extraños valores obtenidos a la derecha de la zona central no se corresponden con los valores de densidad u orientación determinados. Los métodos estereológicos por otro lado, aunque válidos, no resultan excesivamente interesantes puesto que requieren el corte de la estructura para su estudio.

La tomografía axial computerizada resulta atractiva desde el punto de vista demostrativo, pero carece sobre todo de la facilidad de su aplicación a pie de obra. Las imágenes reconstruidas permiten visualizar el interior de la matriz de manera completa, cuantificando el refuerzo de fibras e incluso la porosidad. Por contra, su elevado coste y complejos equipos hacen prohibitivo su empleo de manera sistemática incluso a nivel de probeta.

La medición de la variación de la inductancia resulta realmente interesante debido a su simplicidad, fiabilidad, repetibilidad y economía. Aúna todos los aspectos necesarios para su adopción como técnica de ensayo. Soportado con unos patrones de calibración previamente contrastados, permite determinar la densidad y orientación de las fibras. Además, se están abriendo líneas de investigación para su implementación en elementos superficiales, lo que puede originar su empleo en elementos estructurales de gran tamaño.

Por último, dentro de este apartado de ensayos no destructivos se ha comprobado el grado de impermeabilidad del material mediante la aplicación de agua a presión. Como era de esperar, la dosificación rica en finos que exige un hormigón autocompactante, forma una matriz compacta y poco porosa que reduce el riesgo de filtraciones para la aplicación propuesta. Cabe recordar otra vez que la estructura no se ha sometido a ningún proceso de curado, por lo que la adición de fibras como refuerzo puede ser la razón de tan reducida penetración de agua, asumiendo por tanto que la fisuración ha sido mínima durante el endurecimiento de la masa.

CAPÍTULO 6

Ensayos destructivos (ED)

6.1. Introducción

La finalidad de los ensayos destructivos reside en cuantificar de manera normalizada las propiedades mecánicas del HACRFA formulado. Se trata de realizar ensayos a rotura solicitando las probetas en diversas configuraciones generando esfuerzos axiales de compresión o tracción, además de esfuerzos tangenciales, dado que la propuesta de aplicación estructural del material consiste en depósitos de contención cilíndricos.

Los ensayos descritos y cuyos resultados se muestran a continuación se enmarcan en la correspondiente caracterización mecánica de los hormigones, y especialmente los reforzados con fibras. Por un lado se han realizado los habituales ensayos de compresión para caracterizar el mismo. Por otro lado, se emplean ensayos específicos que cuantifiquen el incremento de resistencias residuales a tracción y/o ductilidad que aportan las fibras.

La mayor aportación del refuerzo en base a fibras permite a la sección absorber esfuerzos de tracción tras la fisuración de la matriz. Evidentemente, el valor de dicha mejora depende de muchos factores ya mencionados (Capítulo 2). Además del ensayo a flexotracción comúnmente aceptado, con sus diversas variantes en diferentes normativas, se ha aplicado el ensayo Barcelona (ver Apartado 6.3) en múltiples probetas. Se pretende corroborar la idoneidad de dicho procedimiento, resultando en un técnica más simple de llevar a cabo.

Para complementar el estudio se han realizado ensayos a cortante que permitan determinar el incremento de resistencia frente a esfuerzos tangenciales.

6.2. Ensayo de compresión

La caracterización de las propiedades mecánicas del hormigón en estado endurecido requiere la comprobación de su resistencia a compresión. Para ello, se ha empleado la norma de referencia de dichos ensayos, UNE 83507 (2004).

Las probetas se han dispuesto con idéntica disposición respecto a la que tenían en el muro, es decir, la carga de compresión se ha aplicado en dirección vertical, de manera paralela al eje Z.

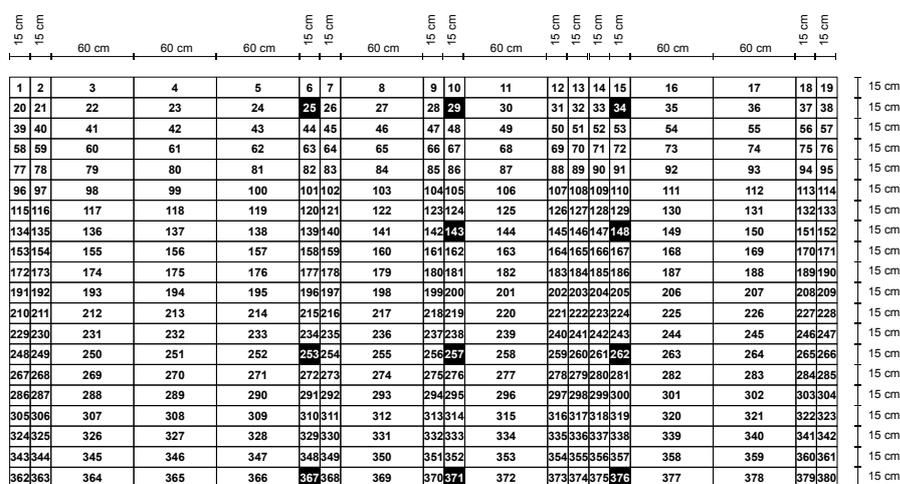


Figura 6.1: Ubicación de las probetas cúbicas ensayadas a rotura por compresión (en negro).

| | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Nº | 25 | 29 | 34 | 143 | 148 | 253 | 257 | 262 | 367 | 371 | 376 |
| f_c (MPa) | 58.7 | 55.3 | 60.9 | 73.4 | 64.5 | 55.7 | 68.1 | 66.7 | 56.6 | 57.8 | 56.9 |
| f_{cm} (MPa) | 61.3 | | | | | | | | | | |
| CV (%) | 9.77 | | | | | | | | | | |
| Fibras (kg/m ³) | 0 | 0 | 0 | 56 | N/A | 62 | 65 | 57 | 66 | 85 | 76 |

Tabla 6.1: Resultados de la resistencia a compresión de las probetas cúbicas.

6.2.1. Ubicación de las probetas

La Figura 6.1 refleja la ubicación de las probetas extraídas y ensayadas a compresión. Se han escogido 11 probetas repartidas a lo largo y alto del muro, para comprobar si las diferentes densidades y orientaciones de las fibras aportan mejoras apreciables. Al mismo tiempo, y con idea de contrastar si el procedimiento de vertido altera notablemente dicha característica, se han ensayado 16 probetas moldeadas durante la ejecución del muro. Estas probetas son cilíndricas y se han ensayado para las edades de 3 ($f_{cm,3}$), 7 ($f_{cm,7}$), 14 ($f_{cm,14}$) y 28 ($f_{cm,28}$) días.

6.2.2. Resultados de compresión

La Tabla 6.1 resume los resultados del ensayo de las probetas extraídas. En la misma se relacionan los valores de resistencia a compresión de las probetas respecto a su densidad de fibras. Ésta última se ha estimado en base al procedimiento descrito en el Apartado 5.4.

El patrón de rotura para las probetas cúbicas, se corresponde de manera acertada con el esperado, tal y como se puede apreciar en la Figura 6.2. Dicho

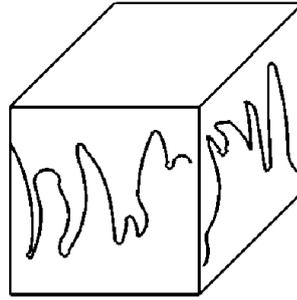
| Edad del hormigón (días) | f_c | | | | f_{cm} (MPa) | CV (%) |
|--------------------------|-------|------|------|-------|----------------|--------|
| 3 | 42.3 | 42.3 | 41.8 | 43.3 | 42.4 | 1.48 |
| 7 | 50.0 | 49.2 | 50.7 | 51.0 | 50.2 | 1.60 |
| 14 | 55.2 | 53.2 | 54.7 | 43.8* | 54.4 | 1.99 |
| 28 | 61.0 | 59.6 | 59.0 | 56.8* | 59.9 | 1.71 |

* Probeta defectuosa

Tabla 6.2: Resultados de la resistencia a compresión de las probetas cilíndricas.



(a) Rotura de la probeta nº34



(b) Ejemplo de rotura satisfactoria

Figura 6.2: Rotura de probetas tras ensayo a compresión.

patrón viene reflejado en la norma de ensayo correspondiente, de manera que sea factible reconocer la validez del ensayo. La adición de fibras no altera el esquema, ya que como se esperaba, las fibras no producen un notable incremento de la resistencia a compresión. Al entrar en carga principalmente en instantes posteriores a la fisuración de la matriz, el valor alcanzado y la forma de rotura dependen casi en exclusiva de las propiedades del hormigón.

El hormigón alcanza una resistencia media cercana a los 60 MPa, sin una relación obvia respecto al refuerzo de fibras de cada una de las probetas. En concordancia con lo expuesto en las conclusiones de varios estudios [Grüne-wald (2004)], la adición de fibras no afecta apreciablemente la resistencia a compresión del material. Aunque para las probetas cúbicas se alcanza, como era previsible, un valor superior al de las probetas cilíndricas debido a su menor esbeltez, éste no es acusado (un 2.3%). Muchas de las normativas (EHE-08, ACI-318, etc) también introducen unos factores de conversión entre la resistencia obtenida en probetas cúbicas y cilíndricas, que varían entre un 70% y un 90%, o incluso la unidad en caso de hormigones de alta resistencia (>80 MPa) [EHE-08 (2008)]. El caso de estudio presenta unos valores similares para ambos tipos de probetas, que difieren en menos de un 3% entre sí.

Se obtienen valores de resistencia a compresión de acuerdo a las expectativas iniciales. Ello se debe a la formulación del hormigón para cumplir requisitos de autocompactabilidad, que exigen una cantidad elevada de finos y que en este caso han sido aportados en su mayoría como cemento (430 kg/m³). La descripción de la formulación empleada en la presente investigación se recoge en el Capítulo 3. Por su lado, [Domone (2006)] establece en un estudio realizado sobre 68 HAC fabricados entre 1993 y 2003 por diversos equipos investigadores,

que más del 80% de los casos estudiados supera una resistencia a compresión de 40 MPa. Es por tanto razonable decir, que el HAC diseñado en el presente estudio, se encuentra en el rango inferior de lo que habitualmente obtiene un HAC en cuanto a resistencia a compresión se refiere.

La homogeneidad del HRFA a lo largo y ancho del muro se manifiesta en los resultados obtenidos, no habiendo muestras de la influencia de la segregación de fibras detectada en la parte superior del muro en lo que a resistencia máxima a compresión se refiere. Por contra es de destacar que las fibras aportan un incremento de la ductilidad ya detectado por [Bencardino et al (2008)], debido a su capacidad de coser las fisuras generadas y continuar con la transmisión de cargas a través de ellas. Todo ello depende de la cuantía de fibras de la que dispone cada una de las probetas, presentando las correspondientes al hormigón sin refuerzo, una rotura brusca y repentina sin capacidad de absorción de energía posterior a la fractura de la matriz.

Contrastando estos valores con los obtenidos de las probetas moldeadas, cuya orientación diferirá de las extraídas del muro debido a procesos de hormigonado y llenado dispares, se observa que la resistencia media a compresión presenta valores muy similares.

6.3. Ensayo Barcelona

Como alternativa al ensayo a flexotracción para determinar la resistencia a tracción del material, ciertos estudios [Pujadas et al (2011)] promulgan el empleo del ensayo Barcelona. Este ensayo emplea menos material al requerir probetas más pequeñas, lo que redundará de manera beneficiosa en el medio ambiente.

La instrucción española recoge la posibilidad de emplear dicho ensayo, que a su vez se encuentra normalizado de acuerdo a la norma UNE 83515. Este ensayo permite sustituir el ensayo a flexotracción habitual o los relativos a la medida de la tenacidad del material. Resulta interesante en situaciones en las que se extraen probetas mediante coronas cilíndricas, puesto que su geometría no es la habitual para aquellos ensayos. En esta investigación se realizará una variante de dicho ensayo mediante probetas cúbicas, siguiendo las pautas de [Pujadas (2013)].

6.3.1. Configuración del ensayo

El ensayo es una modificación del ensayo de doble punzonamiento establecido en [Chen (1970)]. A partir del amplio estudio paramétrico realizado por [Mora (2008)], se han determinado la superficie de contacto y la velocidad de aplicación de la carga. A diferencia de que indica la norma, las probetas empleadas en el ensayo no son cilíndricas ni moldeadas, sino cúbicas extraídas del muro. Es por ello que no es posible la medida de la deformación transversal para determinar la tenacidad del material. Para ello, se opta por apoyarse en los datos de desplazamiento del bastidor de la máquina de ensayos registrados por la misma.

Las probetas se disponen en la máquina de ensayo de igual forma a la inicial correspondiente en el conjunto del muro (la aplicación de la carga se realiza por tanto a lo largo del eje vertical o eje Z). Una vez en esta posición, se interponen unos cilindros de 37.5 mm de diámetro entre probeta y platos

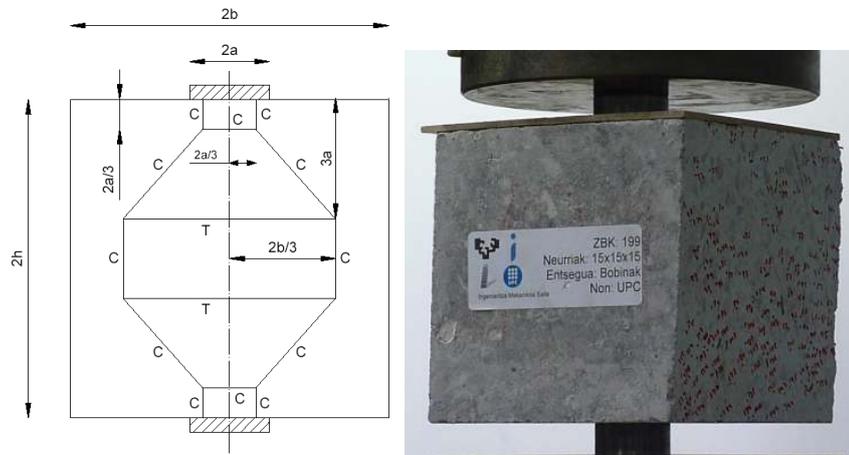


Figura 6.3: Modelo de bielas y tirantes considerado [Mora (2008)] y configuración de ensayo ejecutado.

de carga. Resulta importante que ambas piezas estén bien centradas respecto al eje de la probeta y en la misma vertical. A continuación, se procede a la aplicación de la carga con una velocidad de 0.5 mm/min hasta alcanzar un desplazamiento de 6 mm. Se registran los valores de carga máxima alcanzada y las correspondientes a diferentes desplazamientos del pistón tras la fisuración, al presentar cierta ductilidad el material debido a su refuerzo en forma de fibras. Se pretende por tanto, analizar la carga máxima admisible junto con la tenacidad que proporcionan las fibras.

El esquema de bielas y tirantes que se desarrolla en el interior de la probeta para equilibrar las fuerzas exteriores, superiores e inferiores, se muestra en la Figura 6.3. Dicho modelo puede incluso simplificarse despreciando el estado triaxial bajo los punzones [Mora (2008)].

6.3.2. Ubicación de las probetas

Las probetas escogidas para la realización del ensayo Barcelona se concentran en una de las columnas centrales y otras posiciones, tal y como se aprecia en la Figura 6.4. El motivo de tal elección se basa en las diferentes orientaciones de las fibras en función de la altura debido al movimiento de la masa, según se ha comprobado mediante el método inductivo (Apartado 5.4). Al mismo tiempo existe una ligera segregación de fibras en altura lo que puede quedar de manifiesto gracias a este ensayo.

Las probetas mostradas dispuestas en una de las columnas centrales de la Figura 6.4 se corresponden con aquellas donde se han aplicado, además de los métodos magnéticos (Apartado 5.4), técnicas estereológicas (Apartado 5.3) en base a las fibras de las caras de corte y se ha procedido a su machaqueo para estimar la densidad de fibras y contrastar todos estos valores.

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 |
| 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 |
| 39 | 40 | 41 | 42 | 43 | 44 | 45 | 46 | 47 | 48 | 49 | 50 | 51 | 52 | 53 | 54 | 55 | 56 | 57 |
| 58 | 59 | 60 | 61 | 62 | 63 | 64 | 65 | 66 | 67 | 68 | 69 | 70 | 71 | 72 | 73 | 74 | 75 | 76 |
| 77 | 78 | 79 | 80 | 81 | 82 | 83 | 84 | 85 | 86 | 87 | 88 | 89 | 90 | 91 | 92 | 93 | 94 | 95 |
| 96 | 97 | 98 | 99 | 100 | 101 | 102 | 103 | 104 | 105 | 106 | 107 | 108 | 109 | 110 | 111 | 112 | 113 | 114 |
| 115 | 116 | 117 | 118 | 119 | 120 | 121 | 122 | 123 | 124 | 125 | 126 | 127 | 128 | 129 | 130 | 131 | 132 | 133 |
| 134 | 135 | 136 | 137 | 138 | 139 | 140 | 141 | 142 | 143 | 144 | 145 | 146 | 147 | 148 | 149 | 150 | 151 | 152 |
| 153 | 154 | 155 | 156 | 157 | 158 | 159 | 160 | 161 | 162 | 163 | 164 | 165 | 166 | 167 | 168 | 169 | 170 | 171 |
| 172 | 173 | 174 | 175 | 176 | 177 | 178 | 179 | 180 | 181 | 182 | 183 | 184 | 185 | 186 | 187 | 188 | 189 | 190 |
| 191 | 192 | 193 | 194 | 195 | 196 | 197 | 198 | 199 | 200 | 201 | 202 | 203 | 204 | 205 | 206 | 207 | 208 | 209 |
| 210 | 211 | 212 | 213 | 214 | 215 | 216 | 217 | 218 | 219 | 220 | 221 | 222 | 223 | 224 | 225 | 226 | 227 | 228 |
| 229 | 230 | 231 | 232 | 233 | 234 | 235 | 236 | 237 | 238 | 239 | 240 | 241 | 242 | 243 | 244 | 245 | 246 | 247 |
| 248 | 249 | 250 | 251 | 252 | 253 | 254 | 255 | 256 | 257 | 258 | 259 | 260 | 261 | 262 | 263 | 264 | 265 | 266 |
| 267 | 268 | 269 | 270 | 271 | 272 | 273 | 274 | 275 | 276 | 277 | 278 | 279 | 280 | 281 | 282 | 283 | 284 | 285 |
| 286 | 287 | 288 | 289 | 290 | 291 | 292 | 293 | 294 | 295 | 296 | 297 | 298 | 299 | 300 | 301 | 302 | 303 | 304 |
| 305 | 306 | 307 | 308 | 309 | 310 | 311 | 312 | 313 | 314 | 315 | 316 | 317 | 318 | 319 | 320 | 321 | 322 | 323 |
| 324 | 325 | 326 | 327 | 328 | 329 | 330 | 331 | 332 | 333 | 334 | 335 | 336 | 337 | 338 | 339 | 340 | 341 | 342 |
| 343 | 344 | 345 | 346 | 347 | 348 | 349 | 350 | 351 | 352 | 353 | 354 | 355 | 356 | 357 | 358 | 359 | 360 | 361 |
| 362 | 363 | 364 | 365 | 366 | 367 | 368 | 369 | 370 | 371 | 372 | 373 | 374 | 375 | 376 | 377 | 378 | 379 | 380 |

Figura 6.4: Ubicación de las probetas cúbicas ensayadas a doble punzonamiento (en negro).

6.3.3. Resultados del ensayo Barcelona

Los resultados del ensayo Barcelona no son representativos del material de acuerdo a su dosificación y puesta en obra, según el procedimiento de ensayo adoptado. A diferencia de los habituales tres planos de rotura originados en las probetas de estudios previos [Mora (2008)], únicamente se originan dos planos enfrentados. Ello se debe a la fuerte orientación de las fibras que se alinean en dirección longitudinal, principalmente, y vertical. La dirección transversal, o espesor del muro, presenta con diferencia una menor alineación o factor de orientación de las fibras, de acuerdo a las mediciones de la variación de la inductancia antes mencionadas. La aplicación de depósitos de contención cilíndricos propuesta, no requiere de excesivos armados en dicha dirección transversal.

Debido a esto, los valores obtenidos (Tabla 6.3) resultan inferiores a los que realmente puede desarrollar el material (Pujadas et al (2011)). Las fibras orientadas en el plano perpendicular a la dirección de aplicación de la carga son las que soportan los esfuerzos de tracción generados. Analizando los valores de variación de inductancia de la Tabla 6.3 se constata que los ejes mejor dispuestos son el X y el Z. Al realizar el ensayo de acuerdo a la dirección Z, se solicitan las fibras alineadas con los ejes X e Y, resultando muy inferior por regla general, las fibras en este último eje. Aún así queda claro que el refuerzo de fibras proporciona mayor ductilidad al material para absorber energía tras la rotura de la matriz, puesto que las probetas superiores (n^os 28 y 47) que carecen de fibras explotan repentinamente, debido a esa tracción interior generada por el doble punzonamiento. Cabe destacar que los planos de separación y deslizamiento (Figura 6.5) no llegan a desarrollarse por completo en la mayoría de los casos debido al efecto de cosido ejercido por las fibras.

Los ensayos de las probetas, 66, 85, 104 y 123 no han sido programados correctamente de manera que no se han podido registrar todas las medidas, mientras que en la probeta 161 no ha sido registrado ningún valor. Las probetas 28 y 47, por contra, han explotado debido a la tracción y la ausencia de refuerzo

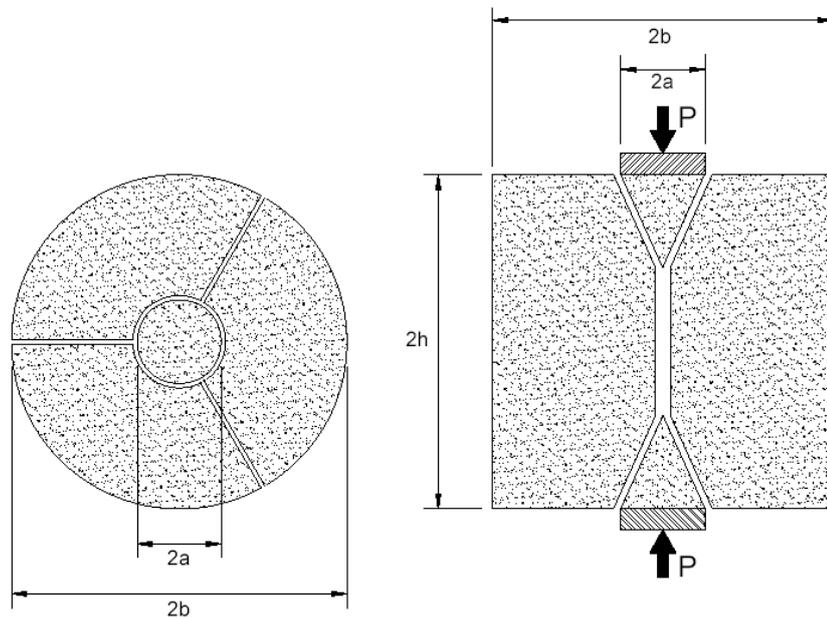


Figura 6.5: Mecanismos idealizados de rotura, separación y deslizamiento [Mora (2008)].



(a) Dos planos de rotura de separación

(b) Tres planos de rotura de separación

Figura 6.6: Patrón de rotura de probetas con orientaciones dispares.

alguno.

La resistencia a tracción del material se puede obtener en base a la carga máxima registrada en el ensayo e independientemente del número de fisuras originadas, a partir de la Ecuación (6.1a), donde P indica la carga máxima, h es la mitad de la altura de la probeta y a el radio del punzón circular dispuesto entre la probeta y los platos de carga. De manera teórica, ese valor también puede ser obtenido mediante la Ecuación (6.1b). De acuerdo a la Tabla 6.3 la carga máxima media registrada es de 166.6 kN, lo que representa una resistencia a tracción de 4.19 MPa (con un coeficiente de variación [C.V.] de 9.31%). De acuerdo a la resistencia a compresión media del hormigón obtenida de los

| Probeta | Tenacidad | | | | | | | Δ Inductancia | | |
|---------|-------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|---------------|--------------|--------------|
| | P_{max} (KN) | $T_{\delta=1}$ (N·m) | $T_{\delta=2}$ (N·m) | $T_{\delta=3}$ (N·m) | $T_{\delta=4}$ (N·m) | $T_{\delta=5}$ (N·m) | $T_{\delta=6}$ (N·m) | L_x (H) | L_y (H) | L_z (H) |
| 9* | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 28 | 141.7 | 47.5 | 89.6 | | | | | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 47 | 147.3 | 33.2 | 97.9 | | | | | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 66** | 168.9 | 43.9 | 128.8 | | | | | 0.09 | 0.03 | 0.06 |
| 85** | 161.7 | 41.6 | 132.8 | 157.5 | | | | 0.30 | 0.10 | 0.26 |
| 104** | 156.6 | 40.8 | 135.0 | 168.6 | 187.6 | | | 0.72 | 0.21 | 0.35 |
| 123** | 158.1 | 25.3 | 136.9 | 198.6 | 241.8 | | | 0.82 | 0.27 | 0.40 |
| 142 | 155.1 | 31.0 | 143.5 | 213.1 | 262.2 | 301.9 | 337.1 | 1.02 | 0.36 | 0.50 |
| 161** | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | 1.25 | 0.27 | 0.37 |
| 180 | 171.3 | 38.8 | 160.5 | 191.2 | 215.3 | 233.8 | 248.5 | 1.26 | 0.24 | 0.39 |
| 199 | 167.5 | 38.5 | 157.2 | 178.6 | 190.0 | 199.2 | 207.9 | 0.78 | 0.21 | 0.62 |
| 218 | 166.4 | 41.8 | 135.7 | 153.0 | 162.4 | 169.4 | 175.1 | 0.92 | 0.23 | 0.48 |
| 237 | 155.3 | 44.9 | 125.7 | 146.9 | 161.7 | 174.2 | 186.4 | 0.63 | 0.15 | 0.46 |
| 256 | 173.9 | 42.0 | 151.4 | 167.7 | 182.3 | 194.9 | 206.9 | 0.79 | 0.22 | 0.66 |
| 275 | 183.5 | 35.3 | 168.2 | 225.3 | 264.7 | 292.1 | 315.7 | 0.99 | 0.22 | 0.34 |
| 294 | 201.4 | 30.5 | 176.9 | 280.1 | 339.9 | 381.9 | 419.5 | 1.49 | 0.38 | 0.32 |
| 313 | 190.6 | 34.5 | 175.7 | 263.7 | 324.4 | 368.7 | 405.3 | 1.49 | 0.42 | 0.42 |
| 332 | 184.2 | 0.1 | 6.4 | 92.4 | 206.1 | 254.7 | 289.5 | 1.42 | 0.39 | 0.25 |
| 351 | 161.2 | 46.8 | 161.3 | 204.2 | 232.4 | 253.2 | 270.2 | 1.57 | 0.50 | 0.26 |
| 370 | 154.4 | 28.2 | 145.0 | 242.5 | 297.5 | 337.4 | 368.6 | 1.81 | 0.52 | 0.26 |

* Probeta defectuosa

** Ensayo defectuoso

Tabla 6.3: Resultados del ensayo Barcelona.

ensayos previos e indicada en la Tabla 6.1, se obtiene una resistencia a tracción media ($f_{ct,m}$) de 4.25 MPa. La similitud entre los valores obtenidos y el bajo coeficiente de variación refuerzan la idoneidad del ensayo para la caracterización del material. La similitud entre las tenacidades iniciales mostrada en la Figura 6.7, indica que las cargas de rotura alcanzan valores cercanos entre si a igualdad de deformación.

$$f_t = \frac{P}{9 \cdot \pi \cdot h \cdot a} \quad (6.1a)$$

$$f_{ct,m} = 0,30 \cdot f_{ck}^{2/3} \quad (6.1b)$$

Mientras que el valor de resistencia a tracción presenta una desviación reducida, no ocurre lo mismo con la tenacidad obtenida en cada una de las probetas. En este caso, la dispersión es mucho más elevada, con una media de 285.9 N·m y un C.V del 29.6 %, tal y como se muestra en la Figura 6.7. La causa de esta discrepancia reside en las diversas cuantías y orientaciones de fibras que influyen de manera notable en la respuesta del material. Cabe mencionar que la probeta n° 332 presenta unos valores muy dispares respecto al resto de probetas analizadas. Se entiende, que alguna irregularidad en las caras de aplicación de la carga originadas durante la fase de corte y extracción, puede haber alterado su respuesta retrasando la generación de tensiones en su interior respecto al resto y mostrando una tenacidad final, para una carrera de 6 mm del bastidor, inferior a lo que en función de su cuantía de fibras cabía esperar.

Una vez analizados los resultados se considera conveniente ampliar la campaña a una serie de probetas seleccionadas en base a un similar factor de orientación en dos de sus planos, determinados de acuerdo a los métodos magnéticos

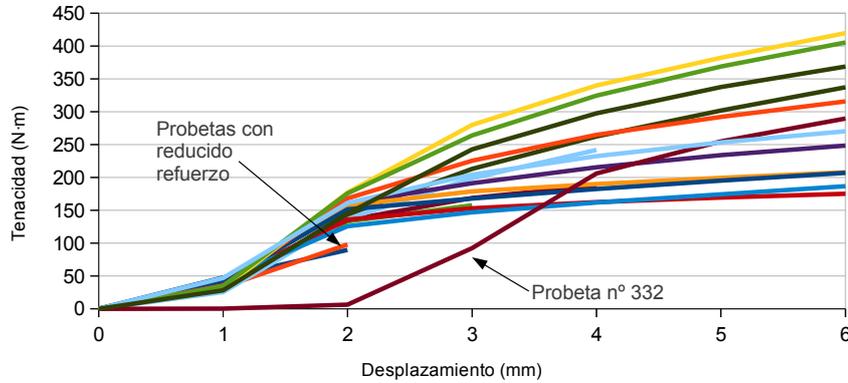


Figura 6.7: Tenacidad del material.

| Probeta | P_{max} (KN) | Tenacidad | | | | | | Δ Inductancia | | |
|---------|-------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------|--------------|--------------|
| | | $T_{\delta=1}$ (N·m) | $T_{\delta=2}$ (N·m) | $T_{\delta=3}$ (N·m) | $T_{\delta=4}$ (N·m) | $T_{\delta=5}$ (N·m) | $T_{\delta=6}$ (N·m) | L_x (H) | L_y (H) | L_z (H) |
| 127 | 156.3 | 14.5 | 116.1 | 172.5 | 199.6 | 218.7 | 232.9 | 0.34 | 0.18 | 0.36 |
| 224 | 170.6 | 16.8 | 118.4 | 199.5 | 243.6 | 277.2 | 302.6 | 0.76 | 0.25 | 0.81 |
| 235 | 150.3 | 13.5 | 114.1 | 182.4 | 227.8 | 264.4 | 294.6 | 0.64 | 0.24 | 0.64 |

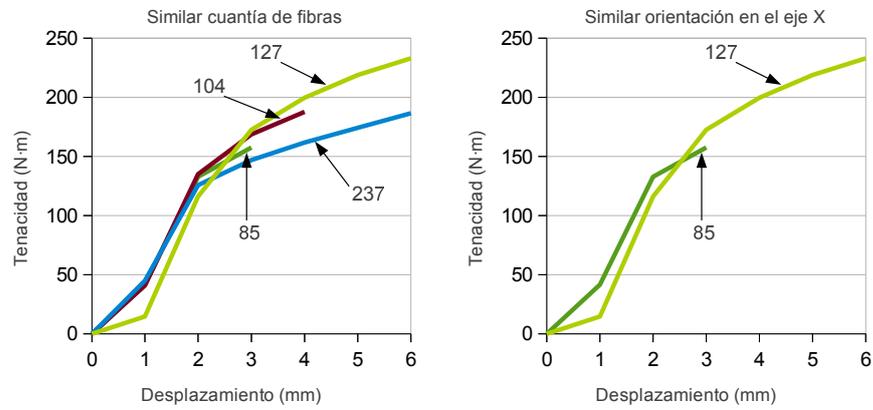
Tabla 6.4: Resultados del ensayo Barcelona en dirección Y.

anteriormente citados. Las probetas se corresponden con aquellas ubicadas de forma dispersa en las posiciones del muro mostradas en la Figura 6.4. En este caso, la aplicación de la carga se realiza a lo largo del eje transversal, eje Y. El motivo de este cambio consiste en buscar una mayor representatividad de la capacidad máxima que puede desarrollar el material. Evidentemente, al ser la tracción perimetral el esfuerzo máximo a soportar por la aplicación propuesta para el material, es necesario determinar dicha resistencia a lo largo del eje X. Con lo cual la aplicación de la carga puede desarrollarse en cualquier eje, excepto en ese eje X, ya que analizando el comportamiento del material cargando según ese eje la tracción se originaría en los otros dos.

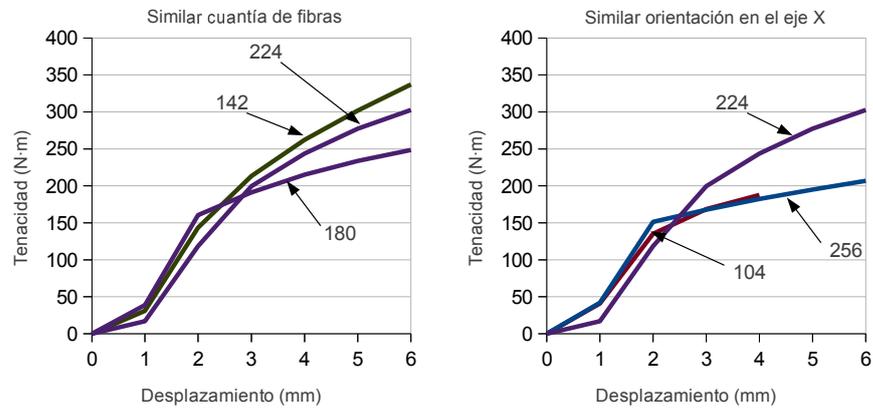
Analizando de forma más detallada los resultados para probetas con similares cuantías, pero con diversas orientaciones (Tabla 6.4), se constata que las cargas de rotura no dependen de la orientación ni la cuantía de fibras, mientras que las tenacidades finales aumentan con el aumento del número de fibras en ambos ejes del plano donde se localizan los esfuerzos de tracción.

En la Figura 6.8 se comparan los resultados de diversas probetas ensayadas inicialmente con respecto a probetas con similar orientación en los dos ejes traccionados. Las gráficas de la izquierda muestran que la tenacidad final es parecida, o incluso mejor, que en las probetas con cuantías similares y orientaciones dispares, pero sobre todo, la diferencia se aprecia cuando se comparan, en las gráficas de la derecha, respecto a probetas que tienen una orientación similar en el eje X, pero mucho más reducida en el eje traccionado normal.

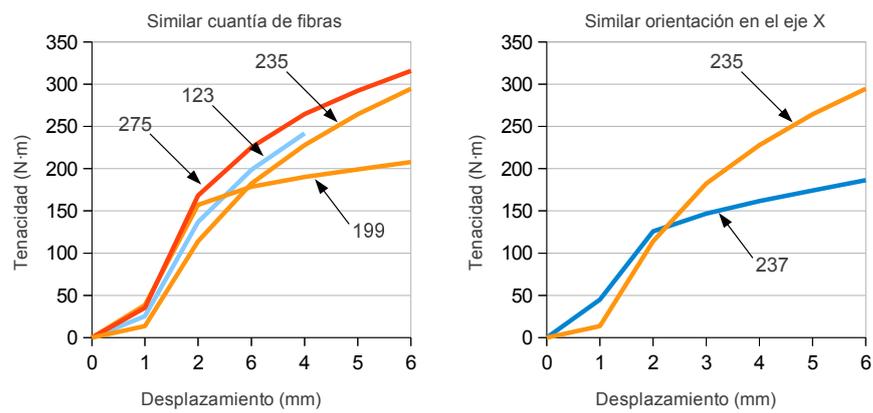
A diferencia de lo expresado en vista de la Figura 6.6, en caso de realizar



(a) Probeta 127



(b) Probeta 224



(c) Probeta 235

Figura 6.8: Comparativa entre probetas de similar cuantía de fibras y similar orientación en el eje X.

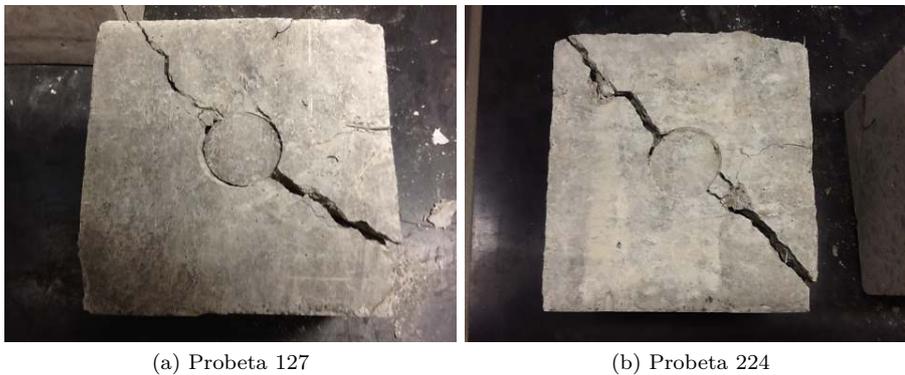


Figura 6.9: Patrón de rotura de probetas con orientaciones similares.

el ensayo perpendicularmente a dos ejes con similares orientaciones de fibras, al no haber un plano paralelo a cualquiera de los ejes que se pueda considerar débil, la rotura se produce de manera diagonal a la pieza (Figura 6.9).

6.4. Ensayo Brasileño

Con motivo de contrastar el valor de resistencia a tracción del material anteriormente obtenido, se han realizado una serie de ensayos de tracción indirecta de acuerdo al conocido ensayo Brasileño, según la norma UNE-EN 12390-6. Para ello, se han empleado tres probetas cilíndricas (diámetro igual a 150 mm y altura de 300 mm) moldeadas paralelamente a la ejecución del muro, junto con las empleadas para la comprobación de resistencia a compresión a diferentes edades.

6.4.1. Configuración del ensayo

La rotura de las probetas se realiza mediante la aplicación de una carga en dirección radial a las mismas. Para ello, la probeta se dispone de manera horizontal entre los platos de carga de la máquina a emplear. Con motivo de introducir la tensión de manera concentrada se intercalan unas bandas de apoyo de fibra prensada entre probeta y platos.

A continuación se aplica una carga constante hasta la rotura de la probeta, registrando el valor de carga máxima alcanzada. Dado que la intención en este caso era analizar únicamente la resistencia a tracción del material, sin analizar la ductilidad que aportan las fibras ni caracterizar el conjunto del comportamiento tensión-abertura de fisura o tensión-deformación, se ha obviado la instalación de transductores de desplazamiento para la recogida de los datos necesarios para tal fin. Como ya se ha comentado en el Apartado 2.2.2, de acuerdo a [Kooiman (2000)] el ensayo Brasileño es el menos complejo de realizar.

Alternativamente se podría emplear el procedimiento descrito en el Anexo A de la norma UNE-EN 12390-6, que hace referencia a la modificación del ensayo para su aplicación en probetas cúbicas como son las extraídas del muro. En este estudio, se ha decantado por la estimación de la tenacidad adicional que

| Probeta | 1 | 2 | 3 |
|------------------|------|------|------|
| f_{ct} (MPa) | 5.44 | 5.14 | 5.84 |
| $f_{ct,m}$ (MPa) | 5.47 | | |
| C.V. (%) | 6.42 | | |

Tabla 6.5: Resultados de la resistencia indirecta de las probetas cilíndricas.

representan las fibras como refuerzo del hormigón a través del ensayo Barcelona (Apartado 6.3), puesto que resulta incluso más sencillo que el ensayo Brasileño.

6.4.2. Resultados del ensayo brasileño

A partir de la carga máxima de rotura de las probetas, se ha obtenido la resistencia a tracción indirecta del material. La Tabla 6.5 resume los valores de cada una de las tres probetas ensayadas, además del valor medio y un coeficiente de variación reducido.

Comparando estos resultados con los obtenidos en el Apartado 6.3.3, se deduce una relación de 1.31 entre las resistencias obtenidas mediante el ensayo Brasileño y el ensayo Barcelona, siempre mostrando un valor más elevado el primero de ellos. Este coeficiente relaciona ambos ensayos y permite el estudio de la resistencia a tracción por medio del ensayo Barcelona. De esta manera es posible emplear probetas de menor tamaño reduciendo la cantidad de material necesaria.

6.5. Ensayo a cortante

El ensayo a cortante permite analizar la resistencia del material respecto a esfuerzos tangenciales mediante corte directo doble. Es de esperar que la adición de fibras, además de aportar un incremento en la tenacidad frente a diversos tipos de rotura, también aumente la resistencia del material frente a este tipo de esfuerzos.

6.5.1. Configuración del ensayo

El ensayo se realiza de acuerdo a la norma UNE 83511, sobre probetas prismáticas de 150 x 150 mm de sección y 600 mm de longitud. Para ello se emplea el útil representado en la Figura 6.10, entre el que se dispone la probeta a analizar.

La grieta a originarse debe encontrarse entre los dientes del útil de uno de los lados de la probeta. En caso contrario, se desestimará el resultado obtenido para posteriores análisis.

6.5.2. Ubicación de las probetas

La aplicación para depósitos de contención cilíndricos propuesta, no genera excesivos esfuerzos cortantes sobre la estructura. Debido a ello, la determinación de la resistencia frente a esfuerzos tangenciales se realiza de manera reducida ensayando 8 probetas prismáticas extraídas del muro y cuya ubicación se muestra en la Figura 6.11. Al igual que la caracterización de la resistencia a

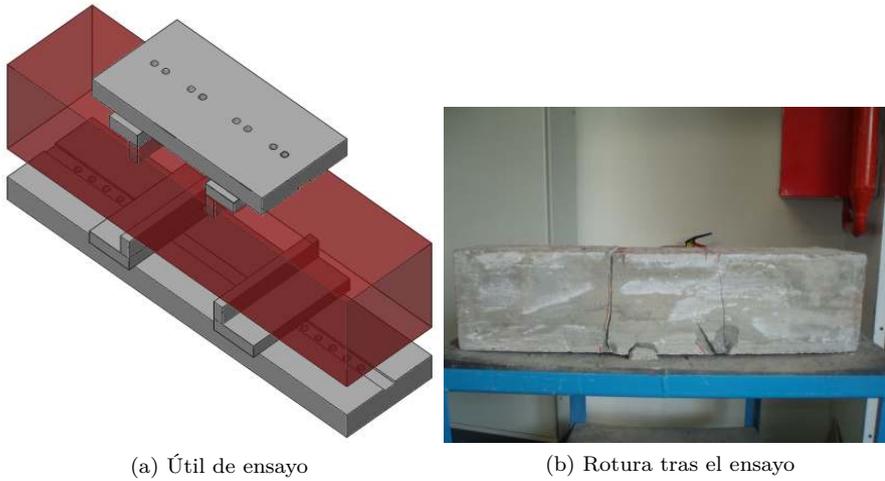


Figura 6.10: Realización del ensayo a cortante.

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------|---|-------|---|-------|---|-------|---|-------|----|-------|----|-------|----|-------|----|-------|----|-------|----|-------|----|-------|----|-------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 15 cm | | 60 cm | | 60 cm | | 60 cm | | 15 cm | | 15 cm | | 60 cm | | 15 cm | | 15 cm | | 60 cm | | 60 cm | | 15 cm | | 15 cm | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 | 41 | 42 | 43 | 44 | 45 | 46 | 47 | 48 | 49 | 50 | 51 | 52 | 53 | 54 | 55 | 56 | 57 | 58 | 59 | 60 | 61 | 62 | 63 | 64 | 65 | 66 | 67 | 68 | 69 | 70 | 71 | 72 | 73 | 74 | 75 | 76 | 77 | 78 | 79 | 80 | 81 | 82 | 83 | 84 | 85 | 86 | 87 | 88 | 89 | 90 | 91 | 92 | 93 | 94 | 95 | 96 | 97 | 98 | 99 | 100 | 101 | 102 | 103 | 104 | 105 | 106 | 107 | 108 | 109 | 110 | 111 | 112 | 113 | 114 | 115 | 116 | 117 | 118 | 119 | 120 | 121 | 122 | 123 | 124 | 125 | 126 | 127 | 128 | 129 | 130 | 131 | 132 | 133 | 134 | 135 | 136 | 137 | 138 | 139 | 140 | 141 | 142 | 143 | 144 | 145 | 146 | 147 | 148 | 149 | 150 | 151 | 152 | 153 | 154 | 155 | 156 | 157 | 158 | 159 | 160 | 161 | 162 | 163 | 164 | 165 | 166 | 167 | 168 | 169 | 170 | 171 | 172 | 173 | 174 | 175 | 176 | 177 | 178 | 179 | 180 | 181 | 182 | 183 | 184 | 185 | 186 | 187 | 188 | 189 | 190 | 191 | 192 | 193 | 194 | 195 | 196 | 197 | 198 | 199 | 200 | 201 | 202 | 203 | 204 | 205 | 206 | 207 | 208 | 209 | 210 | 211 | 212 | 213 | 214 | 215 | 216 | 217 | 218 | 219 | 220 | 221 | 222 | 223 | 224 | 225 | 226 | 227 | 228 | 229 | 230 | 231 | 232 | 233 | 234 | 235 | 236 | 237 | 238 | 239 | 240 | 241 | 242 | 243 | 244 | 245 | 246 | 247 | 248 | 249 | 250 | 251 | 252 | 253 | 254 | 255 | 256 | 257 | 258 | 259 | 260 | 261 | 262 | 263 | 264 | 265 | 266 | 267 | 268 | 269 | 270 | 271 | 272 | 273 | 274 | 275 | 276 | 277 | 278 | 279 | 280 | 281 | 282 | 283 | 284 | 285 | 286 | 287 | 288 | 289 | 290 | 291 | 292 | 293 | 294 | 295 | 296 | 297 | 298 | 299 | 300 | 301 | 302 | 303 | 304 | 305 | 306 | 307 | 308 | 309 | 310 | 311 | 312 | 313 | 314 | 315 | 316 | 317 | 318 | 319 | 320 | 321 | 322 | 323 | 324 | 325 | 326 | 327 | 328 | 329 | 330 | 331 | 332 | 333 | 334 | 335 | 336 | 337 | 338 | 339 | 340 | 341 | 342 | 343 | 344 | 345 | 346 | 347 | 348 | 349 | 350 | 351 | 352 | 353 | 354 | 355 | 356 | 357 | 358 | 359 | 360 | 361 | 362 | 363 | 364 | 365 | 366 | 367 | 368 | 369 | 370 | 371 | 372 | 373 | 374 | 375 | 376 | 377 | 378 | 379 | 380 |

Figura 6.11: Ubicación de las probetas cúbicas ensayadas a cortante (en negro).

compresión, se dispone de una serie de 6 probetas, igualmente prismáticas, moldeadas conjuntamente a la realización del muro, que servirán para contrastar los resultados obtenidos.

6.5.3. Resultados del ensayo a cortante

[Boulekbache et al (2012)] determinan que la resistencia a compresión, en primer lugar, y el volumen de fibras, en segundo lugar, son las variables que mejoran en mayor medida la resistencia a cortante del material. La relación de aspecto influye en menor medida en dicho incremento. No se ha establecido como influyen estos parámetros en el material estudiado, pero en vista de la Tabla 6.6, los valores medidos en los ensayos, resultan superiores a los que la estructura propuesta tendría en servicio.

| Probetas Moldeadas τ_v (MPa) | Probetas Extraídas | |
|--------------------------------------|--------------------|----------------|
| | Nº Probeta | τ_v (MPa) |
| 7.39 | 41 | 5.64 |
| 7.85 | 55 | 3.70 |
| 8.6 | 193 | 6.31 |
| 8.51 | 198 | 7.58 |
| 10.05 | 207* | 6.41 |
| 6.73 | 345 | 7.55 |
| | 350 | 11.21 |
| | 359 | 5.55 |

* Probeta defectuosa

Tabla 6.6: Resultados de la resistencia a cortante de las probetas.

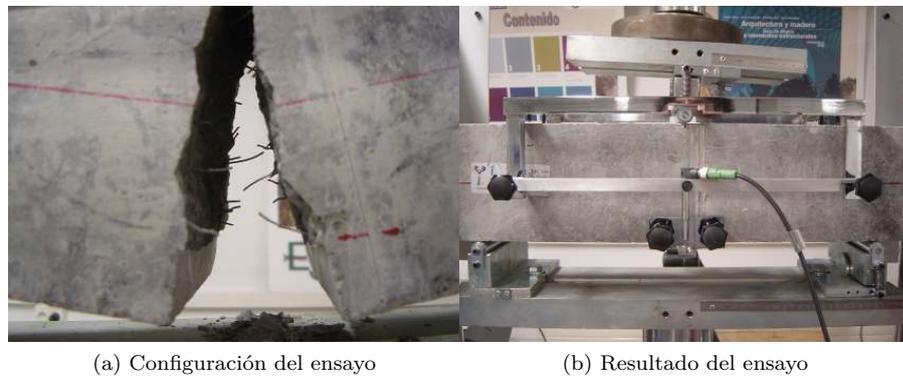


Figura 6.12: Realización del ensayo a flexotracción.

6.6. Ensayo a flexotracción

Los ensayos a flexotracción son los establecidos por la mayoría de las normativas con motivo de obtener los parámetros necesarios para la estimación de la ley constitutiva del material. En el presente apartado, se expondrán el procedimiento de los ensayos realizados, los resultados obtenidos y las correlaciones con respecto a otros parámetros, que permitan la predicción de la respuesta del material.

6.6.1. Configuración del ensayo

El ensayo efectuado se basa en lo recogido bajo la norma UNE-EN 14.651 en base al ensayo a flexotracción de tres puntos (Figura 6.12a). La probeta se posiciona sobre dos apoyos equidistantes del centro de la probeta, con una separación de 500 mm entre ellos. La probeta se entalla transversalmente por la parte inferior correspondiente a la sección central. Esta entalla debe tener una profundidad de $25 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$.

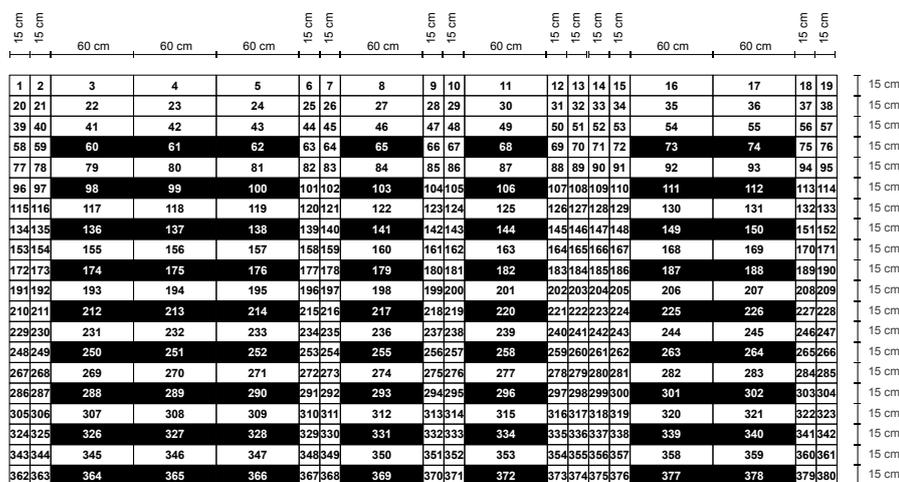


Figura 6.13: Ubicación de las probetas cúbicas ensayadas a flexotracción (en negro).

6.6.2. Ubicación de las probetas

La ubicación de las 74 probetas ensayadas se muestra en la Figura 6.13. Como se aprecia, se ha estudiado la casi totalidad del muro, en filas alternas, a todo lo largo y alto del muro. Posteriores análisis han permitido ampliar su estudio a otras probetas, que se indican en la misma figura.

6.6.3. Resultados del ensayo a flexotracción

Como era de esperar, la dispersión de resultados ha sido elevada. Más si cabe, puesto que las probetas no han sido moldeadas en igualdad de condiciones en el laboratorio, sino que la densidad y orientación de las fibras dentro de las mismas responde a los condicionantes impuestos por la ejecución del muro. La respuesta del material se representa en las Figuras 6.14a a 6.14f.

| Probeta n° | $f_{ct,L}^f$ | $f_{R,1}$ | $f_{R,2}$ (MPa) | $f_{R,3}$ | $f_{R,4}$ | Fibras (ud) | L_m (H) |
|------------|--------------|-----------|-----------------|-----------|-----------|-------------|-----------|
| 60 | 3,97 | 3,21 | 2,83 | 2,68 | 1,72 | N/A | N/A |
| 61 | 3,00 | 0,83 | 0,85 | 0,68 | 0,71 | 10 | 0,2 |
| 62 | 3,99 | 0,69 | 0,73 | 0,45 | 0,31 | 7 | 0,2 |
| 65 | 3,34 | 0,84 | 0,80 | 0,76 | 0,61 | 8 | N/A |
| 68** | 0,66 | 0,63 | 0,17 | 0,12 | 0,11 | 3 | 0,07 |
| 73 | 3,37 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0 | 0 |
| 74 | 2,89 | 0,46 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0 | N/A |
| 98 | 4,78 | 2,39 | 2,21 | 2,04 | 1,81 | 70 | 1,141 |
| 99 | 4,32 | 4,60 | 5,09 | 3,46 | 0 | 50 | 0,641 |
| 100 | 5,66 | 7,92 | 6,45 | 5,46 | 5,07 | 87 | 1,369 |
| 103 | 6,07 | 5,64 | 7,92 | 4,30 | -1,53 | 59 | 1,002 |
| 106 | 4,13 | 3,19 | 3,54 | 3,24 | 3,33 | 26 | 0,523 |
| 111 | 4,62 | 1,16 | 0,87 | 0,34 | -0,09 | N/A | 0,113 |

Continúa en la siguiente página

* Probeta defectuosa

** Ensayo defectuoso

*** Valor central

Tabla 6.7 – continúa de la página anterior

| Probeta n° | $f_{ct,L}^f$ | $f_{R,1}$ | $f_{R,2}$ (MPa) | $f_{R,3}$ | $f_{R,4}$ | Fibras (ud) | L_m (H) |
|---------------|--------------|-----------|--------------------|-----------|-----------|----------------|--------------|
| 112 | 3,80 | 0,03 | -0,03 | 0,00 | 0,00 | 0 | 0,008 |
| 119 | 6,26 | 10,13 | 6,52 | 5,07 | 4,57 | N/A | 1,445*** |
| 136 | 5,56 | 2,63 | 2,41 | 2,42 | 2,42 | 26 | N/A |
| 137 | 3,77 | 5,43 | 6,02 | 4,75 | 4,08 | 69 | 1,227 |
| 138 | 6,51 | 7,12 | 6,28 | 4,62 | 4,04 | 71 | 1,376 |
| 141 | 5,21 | 8,82 | 6,63 | 5,69 | 5,65 | 70 | N/A |
| 144 | 5,00 | 7,98 | 8,74 | 8,21 | 7,29 | 85 | 1,099 |
| 149 | 4,35 | 3,49 | 2,98 | 2,43 | 2,31 | 31 | 0,475 |
| 150 | 3,34 | 1,36 | 1,35 | 1,59 | 1,58 | 12 | N/A |
| 156** | 0,78 | 1,27 | 1,06 | 0,98 | 0,91 | N/A | 1,427*** |
| 160 | 7,61 | 6,39 | 5,46 | 5,01 | 4,03 | N/A | 1,462*** |
| 163 | 4,46 | 5,71 | 6,15 | 4,40 | 3,77 | N/A | 1,512*** |
| 168 | 4,42 | 2,28 | 2,08 | 1,90 | 1,93 | N/A | 0,662*** |
| 169 | 3,38 | 1,99 | 2,24 | 2,27 | 2,11 | N/A | 0,436*** |
| 174 | 4,93 | 2,08 | 1,08 | 1,11 | 1,02 | 38 | 0,645 |
| 175 | 7,10 | 10,52 | 9,07 | 6,21 | 0,51 | 86 | 1,278 |
| 176 | 6,53 | 11,08 | 8,68 | 7,12 | 5,65 | 94 | 1,338 |
| 179 | 6,03 | 9,70 | 10,37 | 8,73 | 7,30 | 100 | 1,489 |
| 182 | 5,58 | 9,00 | 6,71 | 6,49 | 5,99 | 86 | 1,531 |
| 187 | 5,76 | 5,35 | 5,78 | 3,20 | 1,05 | 83 | 0,996 |
| 188 | 5,42 | 2,76 | 2,73 | 2,92 | 2,56 | 41 | 0,504 |
| 201 | 4,86 | 4,55 | 5,28 | 1,12 | 4,01 | N/A | 0,914*** |
| 212 | 4,75 | 3,65 | 2,41 | 1,57 | 1,57 | 28 | N/A |
| 213 | 5,97 | 9,57 | 8,23 | 6,63 | 5,03 | 87 | 1,681 |
| 214 | 4,61 | 4,14 | 4,14 | 4,14 | 4,15 | 59 | 0,914 |
| 217 | 5,73 | 5,35 | 5,06 | 4,51 | 4,34 | 67 | N/A |
| 220 | 5,46 | 9,00 | 8,86 | 8,45 | 7,36 | 87 | 1,183 |
| 225 | 4,65 | 5,99 | 6,02 | 4,14 | 4,04 | 53 | 1,072 |
| 226 | 5,28 | 4,84 | 3,81 | 3,92 | 3,87 | 42 | N/A |
| 233 | 4,31 | 0,95 | 0,89 | 0,64 | 0,58 | N/A | 0,344*** |
| 236 | 4,64 | 4,88 | 5,00 | 3,79 | 3,54 | N/A | 0,952*** |
| 244 | 6,28 | 6,64 | 5,90 | 4,31 | 3,67 | N/A | 1,478*** |
| 250 | 5,20 | 2,37 | 1,84 | 1,75 | 1,70 | 39 | 0,895 |
| 251** | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | 79 | 1,323 |
| 252 | 4,56 | 1,81 | 2,32 | 2,38 | 1,83 | N/A | 0,603 |
| 255 | 5,72 | 5,90 | 6,08 | 5,82 | 5,14 | 58 | 1,001 |
| 258 | 6,30 | 10,28 | 10,00 | 9,36 | 8,05 | 106 | 1,463 |
| 263 | 6,77 | 9,00 | 8,79 | 7,64 | 7,16 | 90 | 1,068 |
| 264 | 6,61 | 3,79 | 3,96 | 3,5 | 3,29 | N/A | 0,645 |
| 289 | 3,52 | 2,66 | 2,65 | 2,69 | 2,61 | 39 | 0,74 |
| 290 | 4,66 | 7,78 | 6,9 | 5,76 | 4,59 | 71 | 1,139 |
| 293 | 6,53 | 9,49 | 9,37 | 8,63 | 7,33 | 86 | N/A |
| 296 | 6,12 | 9,17 | 9,33 | 8,29 | 7,43 | 127 | 1,98 |
| 301 | 6,94 | 10,66 | 10,84 | 9,49 | 8,89 | 117 | 2,058 |
| 302 | 6,47 | 11,40 | 9,19 | 7,97 | 7,83 | 95 | N/A |
| 320 | 6,39 | 9,48 | 9,17 | 8,00 | 4,62 | N/A | 1,388*** |
| 326 | 5,78 | 8,52 | 7,34 | 6,88 | 5,75 | 76 | 0,967 |
| 327 | 5,87 | 6,19 | 4,77 | 3,8 | 3,51 | 65 | 1,112 |
| 328 | 7,30 | 9,09 | 7,17 | 5,08 | 4,42 | N/A | 1,975 |
| 331 | 5,97 | 8,48 | 8,78 | 7,82 | 7,24 | 108 | 1,735 |
| 334 | 6,79 | 7,94 | 8,79 | 0,58 | 0,58 | 141 | 1,85 |
| 339 | 6,90 | 11,51 | 11,08 | 9,29 | 7,79 | 99 | 1,707 |
| 340 | 5,68 | 5,16 | 4,52 | 3,11 | 2,02 | 34 | 0,585 |

Continúa en la siguiente página

* Probeta defectuosa

** Ensayo defectuoso

*** Valor central

Tabla 6.7 – continúa de la página anterior

| Probeta nº | $f_{ct,L}^f$ | $f_{R,1}$ | $f_{R,2}$ (MPa) | $f_{R,3}$ | $f_{R,4}$ | Fibras (ud) | L_m (H) |
|---------------|--------------|-----------|--------------------|-----------|-----------|----------------|--------------|
| 347 | 7,34 | 11,97 | 10,96 | 8,34 | 7,38 | N/A | 2,584*** |
| 364 | 9,89 | 13,01 | 13,01 | 11,72 | 11,67 | 124 | N/A |
| 365* | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 366 | 7,87 | 11,12 | 11,88 | 10,55 | 9,45 | 154 | 2,367 |
| 369 | 8,64 | 10,36 | 9,65 | 8,89 | 8,69 | 135 | N/A |
| 372 | 5,18 | 7 | 9,49 | 8,68 | 7,62 | 155 | 2,232 |
| 377 | 5,81 | 9,58 | 8,86 | 7,32 | 6,13 | 88 | 1,588 |
| 378 | 5,41 | 6,31 | 6,92 | 5,99 | 5,44 | 65 | N/A |

Tabla 6.7: Resultados de la resistencia a flexotracción de las probetas.

* Probeta defectuosa

** Ensayo defectuoso

*** Valor central

Comparando los resultados de la variación de la inductancia al centro de la probeta y su respuesta frente al ensayo a flexotracción, parece haber una notable relación. Existen, no obstante, probetas que no cumplen con lo esperado pudiendo ser consecuencia de ciertos aspectos relativos a la medida de la inductancia y del ensayo a rotura. Por un lado, la inductancia se ha medido sobre la probeta íntegra, mientras que el ensayo requiere entallar la parte inferior central de las probetas para la medición en una posición de antemano localizada de la abertura de fisura. Ello puede originar el corte de varias de las fibras que, evidentemente, dejan de ser efectivas. Por otro, el campo magnético generado barre la totalidad de la sección estudiada por lo que resulta imposible discernir si las fibras que lo alteran, se encuentran posicionadas en la zona superior o inferior de la probeta, lo que puede repercutir en su efectividad respecto a la absorción de esfuerzos de tracción. Las fibras localizadas en la cabeza comprimida o zona menos traccionada, como es la parte superior de la probeta, apenas aportarán capacidad de coser las fisuras soportando esfuerzos de tracción. Es de esperar, que estas alteraciones resulten menos críticas en elementos íntegros y de mayores dimensiones.

Representando gráficamente (Figura 6.15) el comportamiento de las diversas zonas (Figura 6.14) sobre el conjunto del muro, se intuye una cierta similitud con la Figura 5.10, apreciando una disminución de las resistencias en función del flujo ascensional de la masa, debido a que orienta las fibras en dirección vertical en lugar de la dirección horizontal.

6.6.3.1. Relación con los ensayos magnéticos

Como se ha comentado en anteriores apartados (Apartado 5.4) y cuyos resultados se recogen en la Tabla 6.7, las probetas prismáticas han sido sometidas a un estudio por medio de métodos magnéticos. En este apartado se pretende demostrar la correcta estimación del número de fibras visibles en la sección de corte. Dado que en la mayoría de las probetas solo se ha medido la variación de la inductancia en cada uno de los cuartos y no en el mismo centro de la pieza, donde, cabe esperar su rotura debido a la entalla realizada, se han interpolado linealmente los valores obtenidos en los dos cuartos centrales con motivo de obtener un valor medio de la sección central.

La Figura 6.16 muestra una linealidad más que aceptable para la estimación del número de fibras localizadas en la sección de corte a partir de los datos ob-

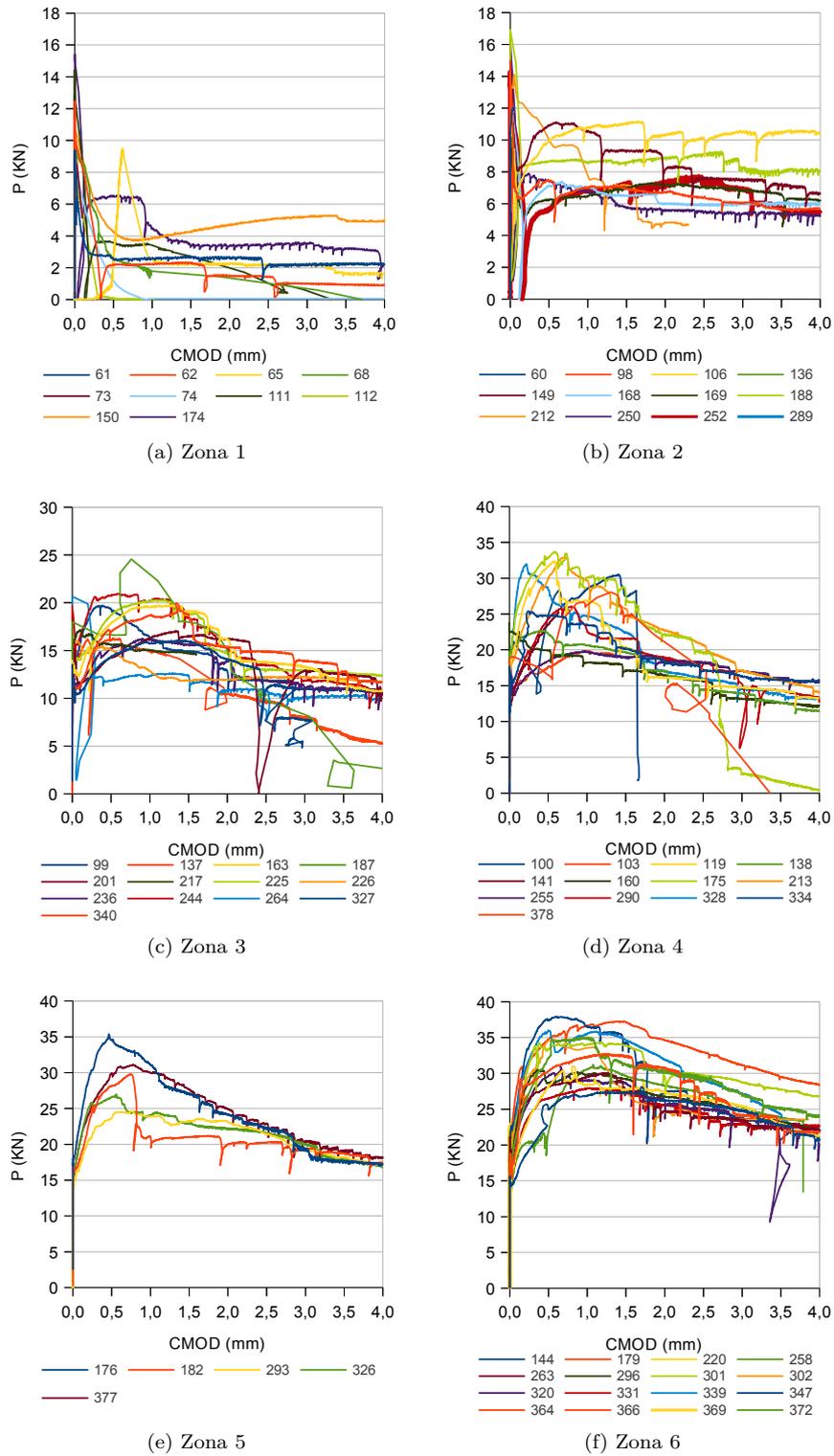


Figura 6.14: Probetas agrupadas en función de su comportamiento mecánico.

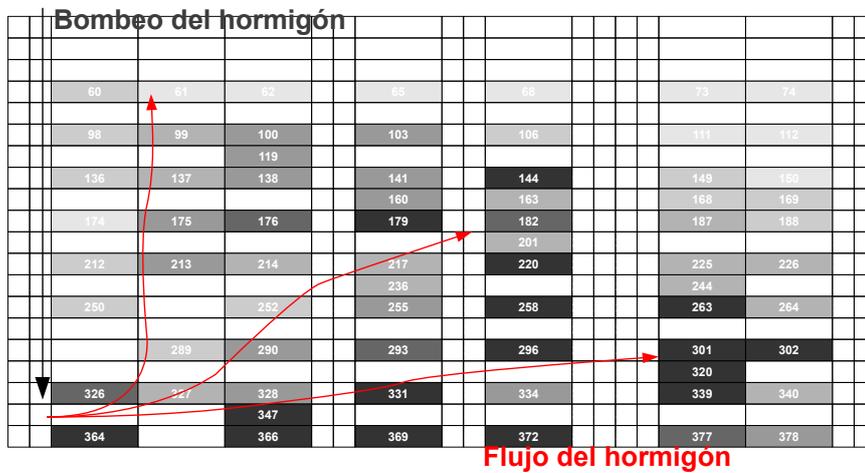


Figura 6.15: Representación del comportamiento mecánico de las probetas en el conjunto de la estructura.

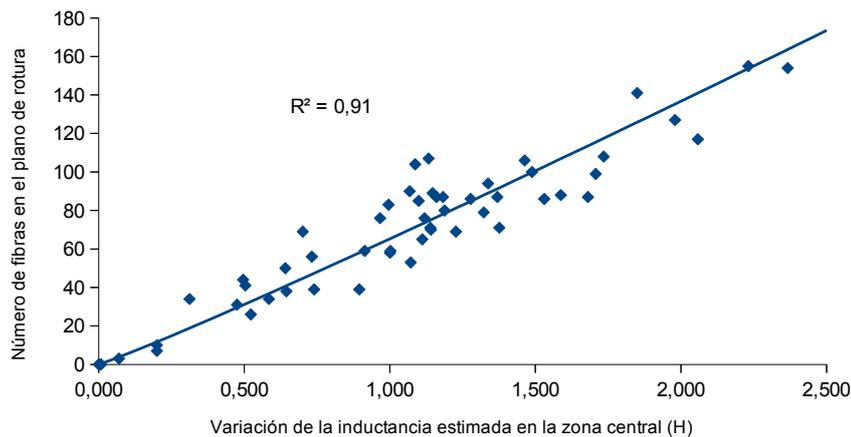


Figura 6.16: Relación entre la variación de la inductancia y el número de fibras en la sección de rotura.

tenidos de los ensayos magnéticos. El coeficiente de determinación ($R^2 = 0,91$) es elevado y la dispersión mostrada se puede deber a las fibras cuya influencia en el campo magnético se ha detectado, pero no se han contabilizado individualmente, al localizarse en la zona entallada de la probeta. De forma añadida, se debe hacer notar que durante el ensayo existen fenómenos de desconche, o *spalling*, de la matriz de hormigón que originan también el desprendimiento de alguna de las fibras. Al mismo tiempo, una medida más cercana a la sección estudiada, podría aportar valores más precisos.

Partiendo de los datos obtenidos, es posible por tanto, medir la variación de la inductancia en el centro de una probeta prismática con cualquier bobina,

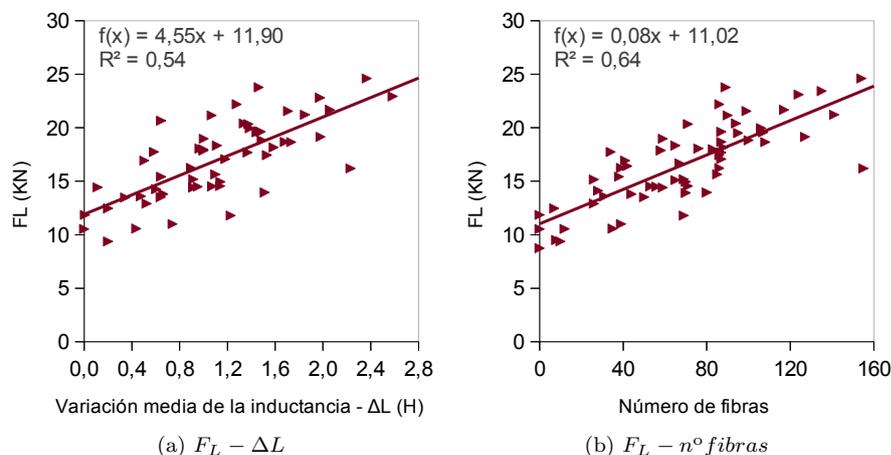


Figura 6.17: Relación entre carga-inductancia y carga-nº de fibras para F_L .

reducir su valor mediante los factores de corrección y relacionarlo con el de un patrón calibrado. Ello posibilitaría la estimación de la densidad de fibras contenida.

Considerando aceptable dicha relación y asumiendo que el número de fibras localizado en la sección de rotura es un parámetro muy influyente de la respuesta mecánica del material, entonces es razonable plantear que los valores de variación de la inductancia pueden permitir estimar en cierta medida la respuesta del material frente al ensayo a flexotracción. En realidad y como ya se viene recalando anteriormente, la variación de la inductancia aporta información sobre el número de fibras localizadas en la sección de corte, pero no sobre su ubicación en la zona inferior o superior, zona traccionada y comprimida respectivamente de acuerdo al ensayo realizado. Representando en las Figuras 6.17 a 6.21, la relación obtenida entre la carga correspondiente al Límite de Proporcionalidad y las cargas a diferentes aberturas de fisura, por un lado, y el número de fibras contabilizado en la sección de rotura, por otro, respecto a la variación estimada de la inductancia en la sección central, se obtienen una curvas de regresión que permiten establecer los parámetros necesarios del modelo de exponencial cuádruple (Apartado 6.6.3.2).

Se aprecia en las Figuras 6.17 a 6.21 que el coeficiente de determinación para las cargas a aberturas de 0.5 y 1.5 mm, F_1 y F_2 respectivamente, es muy elevado, disminuyendo a medida que se acentúa la dispersión del ensayo para aberturas mayores. Las líneas de tendencia más ajustadas se adaptan a una curva potencial en el caso de las resistencias residuales, partiendo del hecho de no poder presentar resistencia tras la fractura de la matriz aquellos hormigones que no presentan fibras ni, por tanto, alteran el campo magnético en el que se les introduce.

Sin embargo, no todas las probetas presentan una similitud tan elevada. Debe recordarse que la bobina con su actual configuración, mide la variación de la inductancia en los 15 cm centrales. De ello se puede estimar un número de fibras que cruce la sección de rotura, en base a la densidad de fibras mezcladas

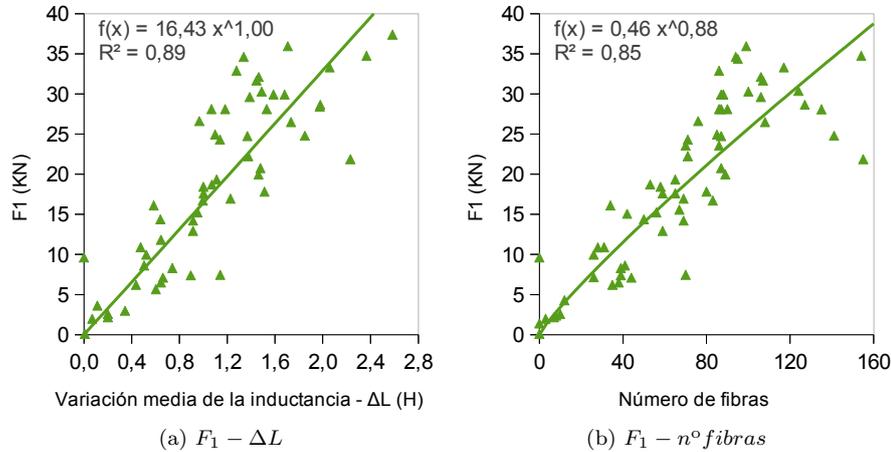


Figura 6.18: Relación entre carga-inductancia y carga-nº de fibras para F_1 .

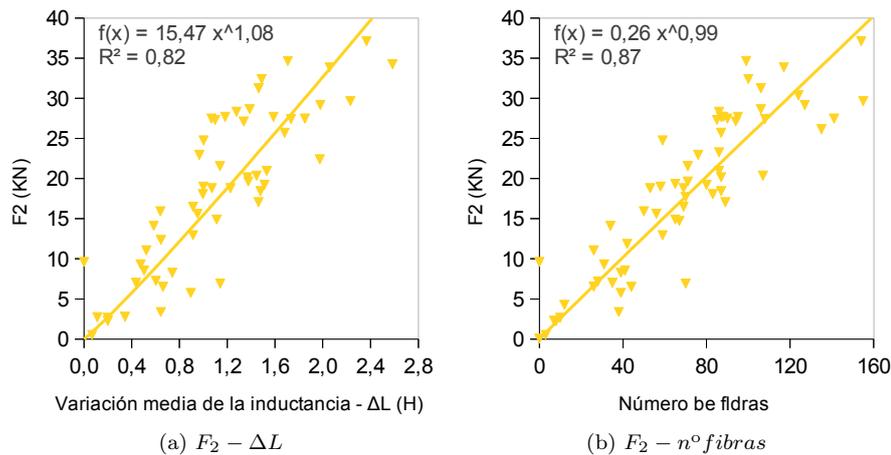


Figura 6.19: Relación entre carga-inductancia y carga-nº de fibras para F_2 .

en la masa y el factor de orientación esperado. Pero el número de fibras en la sección de rotura resultante del ensayo puede diferir dado que la medición se ha realizado en una longitud más amplia. De forma añadida, el método propuesto no discierne la posición de las fibras a lo largo de la sección, pudiéndose encontrar éstas en la zona comprimida de la sección en lugar de en la traccionada, con lo cual su contribución no será efectiva.

En el caso del número de fibras contabilizado en la sección de rotura, resulta un método más arduo y, quizás, más ambiguo que la medición de la variación de la inductancia. Resulta complicado estimar si las fibras que asoman han participado en el mecanismo resistente y, por tanto, han sido efectivas, además de caber la posibilidad del desprendimiento de fibras en el proceso de separación

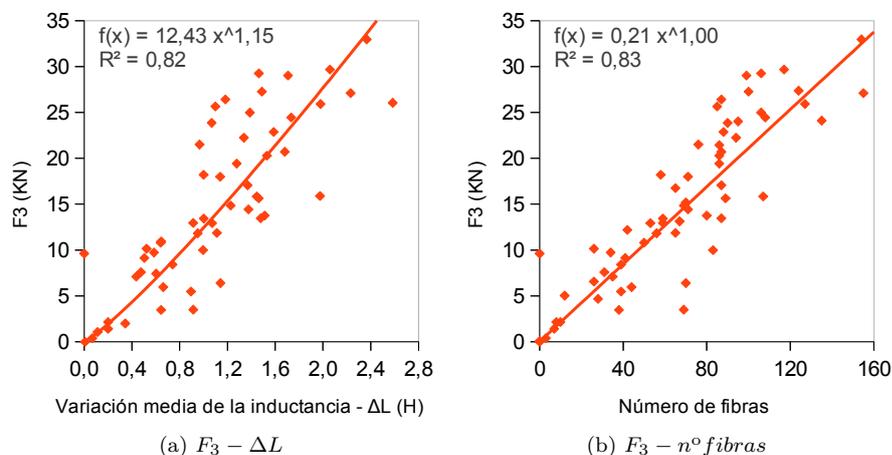


Figura 6.20: Relación entre carga-inductancia y carga-nº de fibras para F_3 .

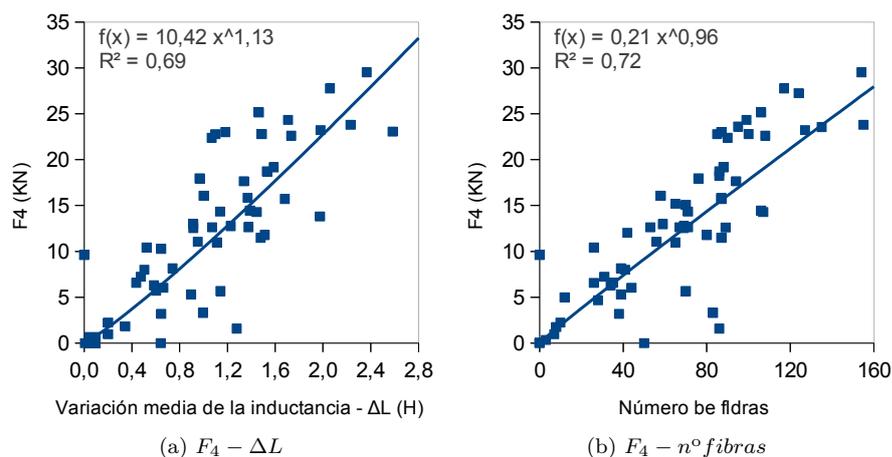


Figura 6.21: Relación entre carga-inductancia y carga-nº de fibras para F_4 .

de ambas partes de la probeta, necesario por otra parte, para su medición.

La carga correspondiente al límite de proporcionalidad también, presenta un R^2 reducido, pero debe tenerse en cuenta el procedimiento para obtener dicho valor. Éste, se basa en determinar la carga máxima registrada hasta una abertura de 0.05 mm, lo cual puede dejar de lado otros valores más representativos que quedan fuera de ese rango por motivos diversos. Entre ellos pudieran encontrarse un indebido acoplamiento con los puntos de apoyo y aplicación de carga originado por defectos superficiales en la probeta, posicionamiento y orientación de las fibras, etc. Además, se observa que la cuantía de fibras o la variación de la inductancia tienen una limitada influencia en su valor. La mejor forma de representar dicha tendencia se corresponde con una relación lineal,

| Probeta | ΔL (H) | $f_{ct,L}^f$ | $f_{R,1}$ | $f_{R,2}$ | $f_{R,3}$ | $f_{R,4}$ |
|-------------|----------------|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 119 | 1.133 | 0.87 | 0.60 | 0.90 | 0.90 | 0.80 |
| 160 | 1.147 | 0.72 | 0.96 | 1.08 | 0.93 | 0.93 |
| 163 | 1.188 | 1.24 | 1.12 | 1.00 | 1.09 | 1.02 |
| 168 | 0.496 | 1.00 | 1.17 | 1.15 | 1.97 | 0.80 |
| 169 | 0.312 | 1.21 | 0.85 | 0.67 | 0.48 | 0.44 |
| 201 | 0.701 | 0.97 | 0.82 | 0.66 | 2.45 | 0.55 |
| 233 | 0.237 | 0.93 | 1.29 | 1.22 | 1.36 | 1.14 |
| 236 | 0.732 | 1.04 | 0.80 | 0.73 | 0.74 | 0.65 |
| 244 | 1.160 | 0.87 | 0.82 | 1.02 | 1.09 | 1.01 |
| 320 | 1.087 | 0.84 | 0.61 | 0.61 | 0.55 | 0.75 |
| 347 | 2.060 | 0.95 | 0.92 | 1.01 | 1.05 | 0.94 |
| Valor medio | 0.96 | 0.90 | 0.91 | 1.05 | 0.82 | |
| C.V. (%) | 16 | 24 | 23 | 50 | 26 | |

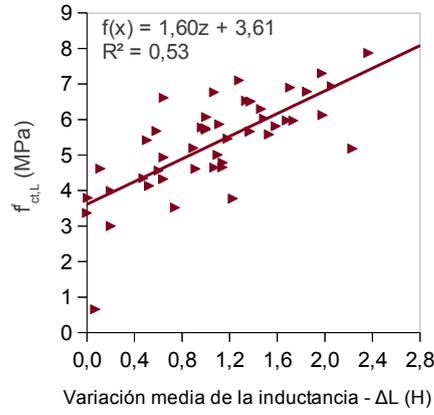
Tabla 6.8: Ratio entre valores de resistencias reales y previstas.

puesto que para hormigones no reforzados, la matriz presenta cierta resistencia a tracción.

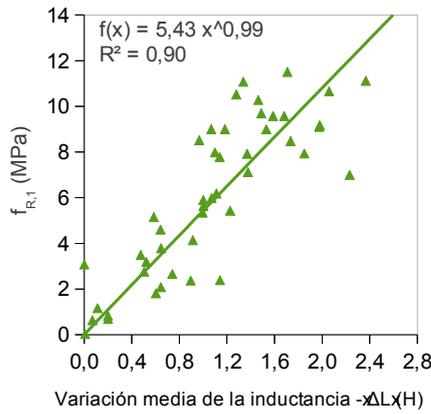
Para justificar numéricamente que el empleo de dichas líneas de regresión es adecuada para la predicción de los parámetros indicados, se realizará a continuación una comparativa de las resistencias residuales previstas y obtenidas para otras 11 probetas prismáticas ensayadas posteriormente. Las relaciones entre la variación de la inductancia medida y las diversas resistencias registradas en base a los ensayos a flexotracción realizados se muestran en las Figuras 6.22a a 6.22e. Como es de esperar, los valores del Límite de Proporcionalidad (LOP) no se ajustan adecuadamente a la línea de regresión, puesto que las fibras influyen poco en la resistencia a tracción de la matriz. Dado que la aportación de las fibras resulta notable una vez fracturada la matriz, las pendientes de las resistencias residuales son más acusadas que la anterior. Al mismo tiempo, muestran mejores valores del coeficiente de determinación frente al ajuste definido.

Similar comportamiento se puede apreciar para las 11 probetas ensayadas a posteriori. En las Figuras 6.23a a 6.23e se recogen los resultados del ensayo a flexotracción sobre dichas probetas, solapados con los valores previstos para cada una de las resistencias. Las líneas de regresión representadas muestran notables parecidos. Las diferencias entre ambas series de valores no son elevadas. Considerando el ratio entre ambos rangos, se vislumbran ciertos aspectos interesantes. La Tabla 6.8 resume dichos resultados para todas las resistencias, así como su valor medio y coeficiente de variación.

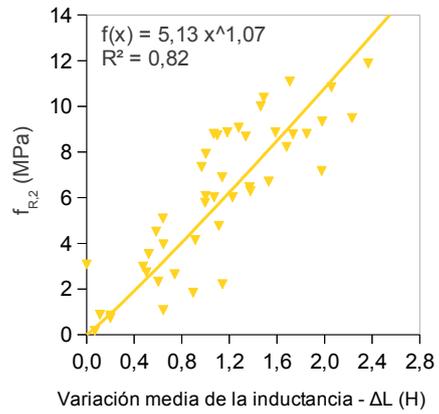
A excepción de casos aislados, muchos valores son cercanos a la unidad. También la probeta n° 201 muestra una caída de resistencia en la tercera resistencia residual, recobrando inmediatamente el nivel de resistencia esperado. Incluso el valor medio es notablemente cercano a la unidad, lo que indica que no existe apenas diferencia entre los previstos y realmente obtenidos experimentalmente. Aunque el coeficiente de variación parezca alto, se debe recalcar que el comportamiento mecánico del muro consiste en la suma de las capacidades portantes de una superficie mayor que lo compone, en lugar de una probeta aislada. Es conocida la inherente dispersión asociada al ensayo de flexotracción a



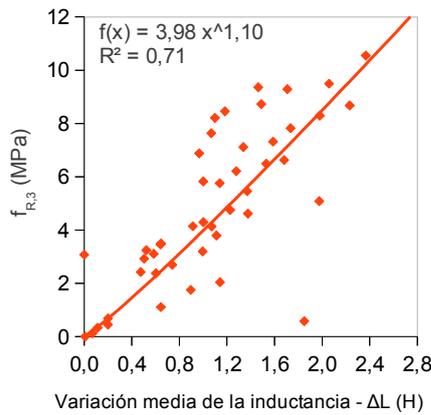
(a) $f_{ct,L}^f - \Delta L$



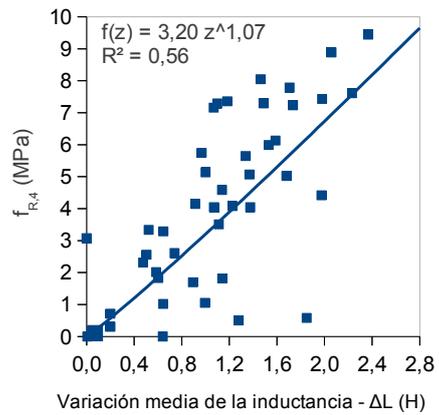
(b) $f_{R,1} - \Delta L$



(c) $f_{R,2} - \Delta L$

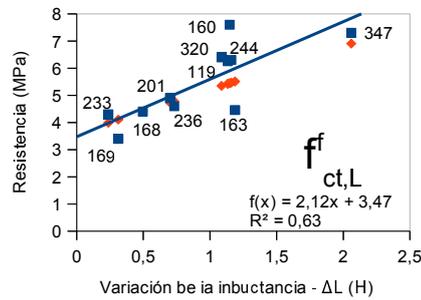


(d) $f_{R,3} - \Delta L$

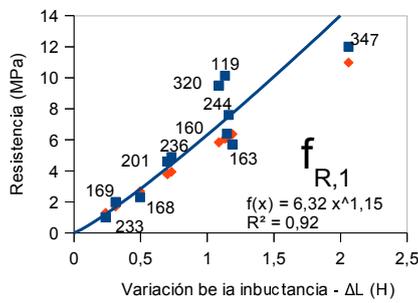


(e) $f_{R,4} - \Delta L$

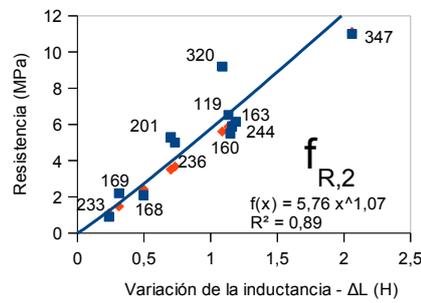
Figura 6.22: Relación entre inductancia y diversas resistencias.



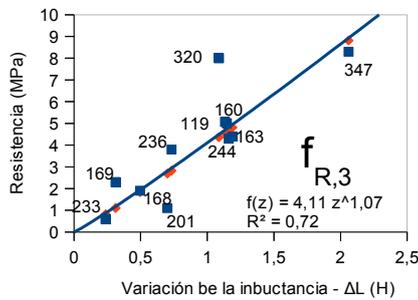
(a) Limite de proporcionalidad



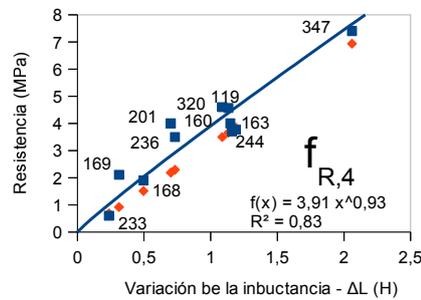
(b) 1ª resistencia residual



(c) 2ª resistencia residual



(d) 3ª resistencia residual



(e) 4ª resistencia residual

Figura 6.23: Resultados del ensayo a flexotracción (cuadrados azules) y valores previstos (rombos rojos).

tres puntos, cuyo coeficiente de variación de acuerdo a [Parmentier et al (2008)] en ocasiones puede exceder incluso el 20%. Sin embargo, también se reconoce que dichos valores decrecen para elementos de mayores dimensiones que las convencionales probetas prismáticas. Al mismo tiempo, la entalla requerida por la normativa de ensayo secciona un número desigual de fibras en cada una de las probetas, aumentando la dispersión. Consecuentemente, aunque existan áreas ligeramente infravaloradas, también las hay cuya resistencia ha sido marginalmente sobrevalorada, ajustándose de manera global el comportamiento real y el previsto.

| Prob. | | $f_{R,1}$ (H) | $f_{R,2}$ (H) | $f_{R,3}$ (H) | $f_{R,4}$ (H) | Med. (H) | C.V. (%) |
|-------|---|------------------|------------------|------------------|------------------|-------------|-------------|
| 119 | I | 1.88 | 1.25 | 1.25 | 1.40 | 1.44 | 21 |
| | F | 1.59 | 1.14 | 1.17 | 1.22 | 1.28 | 16 |
| 160 | I | 1.18 | 1.06 | 1.23 | 1.24 | 1.18 | 7 |
| | F | 0.99 | 0.94 | 1.16 | 1.05 | 1.03 | 9 |
| 163 | I | 1.05 | 1.19 | 1.10 | 1.17 | 1.12 | 6 |
| | F | 0.88 | 1.07 | 1.01 | 0.97 | 0.98 | 8 |
| 168 | I | 0.42 | 0.43 | 0.51 | 0.62 | 0.50 | 19 |
| | F | 0.34 | 0.30 | 0.42 | 0.39 | 0.36 | 14 |
| 169 | I | 0.36 | 0.46 | 0.60 | 0.68 | 0.53 | 27 |
| | F | 0.29 | 0.33 | 0.50 | 0.45 | 0.39 | 25 |
| 201 | I | 0.84 | 1.03 | 0.32 | 1.24 | 0.85 | 46 |
| | F | 0.70 | 0.90 | 0.23 | 1.05 | 0.72 | 50 |
| 233 | I | 0.17 | 0.19 | 0.19 | 0.20 | 0.19 | 7 |
| | F | 0.13 | 0.08 | 0.11 | -0.03 | 0.07 | 96 |
| 236 | I | 0.90 | 0.98 | 0.96 | 1.10 | 0.98 | 9 |
| | F | 0.75 | 0.85 | 0.87 | 0.90 | 0.84 | 8 |
| 244 | I | 1.23 | 1.14 | 1.07 | 1.14 | 1.14 | 5 |
| | F | 1.03 | 1.02 | 0.99 | 0.94 | 1.00 | 4 |
| 320 | I | 1.76 | 1.72 | 1.89 | 1.41 | 1.69 | 12 |
| | F | 1.48 | 1.63 | 1.87 | 1.24 | 1.56 | 17 |
| 347 | I | 2.22 | 2.03 | 1.96 | 2.18 | 2.10 | 6 |
| | F | 1.88 | 1.97 | 1.95 | 2.10 | 1.98 | 5 |

Tabla 6.9: Análisis de las diferencias entre las variaciones de inductancia esperadas para las líneas de regresión inicial (I) y final (F) en el caso de las diversas resistencias residuales.

Aunque las líneas de regresión obtenidas para las probetas iniciales y las calculadas para las 11 probetas posteriores no sean idénticas, la diferencia no es realmente tan acusada. La Tabla 6.9 expresa la variación de inductancia, que debiera aportar cada una de las probetas para, basándose en la línea de regresión inicial y la final, alcanzar la resistencia determinada en el ensayo a flexotracción. Se debe hacer notar que la resistencia correspondiente al Límite de Proporcionalidad ha sido excluida por no tener una relación tan estrecha con la cantidad de fibra. El valor medio en la mayoría de las probetas es bastante similar para ambas líneas. Las diferencias estimadas presentan un valor medio de 0.14 Henrios, con un coeficiente de variación del 9%. Los coeficientes de variación son lo suficientemente bajos, excepto para las probetas n° 201 y 233, tal y como ya se ha mencionado anteriormente. Asumiendo de manera conservadora, que la cuantía de fibras orientadas en dirección longitudinal, correspondiente al eje X, es de un 50%, la variación media de la inductancia para los tres ejes debería ser aproximadamente de 0.09 Henrios. De acuerdo a la Figura 5.18 es posible relacionar la variación de la inductancia y la cuantía de fibras, lo cual implicaría que la diferencia del contenido e fibras sería de 9.5 kg/m^3 , lo cual puede aceptarse como satisfactorio para una cuantía de fibras de diseño media de 50 kg/m^3 . Se obtienen diferencias mucho menores empleando como líneas de regresión inicial relaciones lineales en lugar de potenciales. Sin embargo, ello conllevaría situaciones irreales, donde el parámetro constante introduce niveles

de resistencias residuales incluso para matrices no reforzadas, conjuntamente con mayores valores de los coeficientes de variación. Por consiguiente, las líneas de regresión potenciales adoptadas como punto de partida para la predicción de la resistencia, infravaloran ligeramente la cuantía del refuerzo pero estando del lado de la seguridad y de una manera más constante, con lo cual es perfectamente factible introducir parámetros de corrección para el diseño.

6.6.3.2. Predicción del resultado del ensayo a flexotracción

De acuerdo a lo expuesto en el apartado precedente sobre la aceptable precisión de las previsiones realizadas, resulta posible predecir el comportamiento mecánico del material para cualquier abertura de fisura. Para aproximarse al comportamiento que presentarían las probetas prismáticas en un ensayo a flexotracción a tres puntos, como el realizado en este estudio, se requiere una función continua y diferenciable en todo el rango de medidas, para lo cual se adoptará una ecuación de exponencial cuadruple de acuerdo a la Ecuación (6.2). En este apartado se mostrarán, por tanto, los datos de entrada y el procedimiento a seguir para su definición.

$$f(x) = c_1(e^{-c_2x} - e^{-c_3x}) + c_4(e^{-c_5x} - e^{-c_6x}) \quad (6.2)$$

Esta ecuación se puede mostrar de manera simplificada como la suma de dos curvas bi-exponenciales, tal y como muestra la Ecuación (6.3). F_{pre} representa el comportamiento dominante previo a la fisuración, mientras que F_{post} domina el la región posterior de la gráfica.

$$F_{pre}(x) = c_1(e^{-c_2x} - e^{-c_3x}) \quad (6.3a)$$

$$F_{post}(x) = c_4(e^{-c_5x} - e^{-c_6x}) \quad (6.3b)$$

$$f(x) = F_{pre}(x) + F_{post}(x) \quad (6.3c)$$

Para el modelo exponencial cuádruple, será necesario determinar la carga y abertura de fisura de dos puntos de referencia ubicados, uno anterior a la fisuración de la matriz y el segundo, posterior a la misma. Al mismo tiempo, se deben establecer dos parámetros que controlan la forma de las curvas exponenciales designadas α_{pre} y α_{post} . Se opta por adoptar como puntos de referencia los valores correspondientes a F_L y F_1 , obtenidos de acuerdo al análisis regresivo (Ecuaciones (6.4a) y (6.4b)) efectuado sobre las probetas ensayadas, de forma que puedan obtenerse de manera directa para la caracterización previa del material.

$$P_{pre-fisuración} = 4,55 \cdot \Delta L + 11,90 \quad (6.4a)$$

$$P_{post-fisuración} = 16,43 \cdot \Delta L^1 \quad (6.4b)$$

Los valores de x_{pre} y x_{post} se corresponden con los valores de CMOD relativos a las resistencias consideradas para la obtención de los valores de P_{pre} y P_{post} , 0,05 y 0,5 mm respectivamente. Por su lado, los parámetros α_{pre} y α_{post} se fijan en 1.001 y 100, de forma que el resto de parámetros se calcula en base a los ya establecidos de acuerdo a las Ecuaciones (6.5a) a (6.5f).

$$c_1 = \frac{P_{pre} - F_{post}(x_{pre})}{\left(\begin{array}{c} \left(\frac{1}{1 - \alpha_{pre}} \right) \\ \alpha_{pre} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \left(\frac{\alpha_{pre}}{1 - \alpha_{pre}} \right) \\ -\alpha_{pre} \end{array} \right)} \quad (6.5a)$$

$$c_2 = \frac{\ln \alpha_{pre}}{x_{pre}(\alpha_{pre} - 1)} \quad (6.5b)$$

$$c_3 = \alpha_{pre} \cdot c_2 \quad (6.5c)$$

$$c_4 = \frac{P_{post}}{\left(\begin{array}{c} \left(\frac{1}{1 - \alpha_{post}} \right) \\ \alpha_{post} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \left(\frac{\alpha_{post}}{1 - \alpha_{post}} \right) \\ -\alpha_{post} \end{array} \right)} \quad (6.5d)$$

$$c_5 = \frac{\ln \alpha_{post}}{x_{post}(\alpha_{post} - 1)} \quad (6.5e)$$

$$c_6 = \alpha_{post} \cdot c_5 \quad (6.5f)$$

El establecimiento de este modelo de exponencial cuádruple no pretende sustituir al normalizado ensayo a flexotracción, sino complementarlo. Dado que el ensayo es el más extendido para la caracterización mecánica del material respecto a su capacidad de soportar esfuerzos de tracción, siendo éste un ensayo destructivo, resulta interesante relacionarlo con algún otro método de ensayo no destructivo que, de manera indirecta, pueda aseverar la resistencia del material. Ello pueda dar lugar a desarrollar los métodos magnéticos, en aras de su aplicación sobre elementos estructurales reales y realizar un control de calidad *in situ* con suficientes garantías.

En las Figuras 6.24a a 6.24d se expone la similitud de los resultados del ensayo y la predicción mediante el modelo de cuadruple exponencial para una serie de probetas. La comparativa para el total de las probetas analizadas se analiza individualmente en el Anejo C. Varios de los ensayos muestran gráficos que no se ajustan del todo, pero la razón de ello, es haber obtenido las relaciones mostradas en las Ecuaciones (6.4a) y (6.4b) en base a los criterios mencionados para estimar el LOP, que descartan ciertos valores máximos de tensión alcanzados de manera retrasada.

6.6.3.3. Predicción de la ley constitutiva del material

De entre los posibles modelos de comportamiento del material descritos en el Apartado 2.2.3, los basados en la relación tensión-elongación son los más habituales para los ingenieros responsables de cálculos estructurales. Es por ello que se opta por establecer un modelo multilineal tensión-elongación (Figura 6.25) para representar la respuesta del material frente a esfuerzos normales de tracción y caracterizar su respuesta de comportamiento mecánico como el del resto de materiales. Esta ley constitutiva se define de acuerdo a lo recogido en el Anejo nº14 de la Instrucción de Hormigón Estructural [EHE-08 (2008)]. El motivo de la elección de este modelo entre todos los disponibles en diferentes

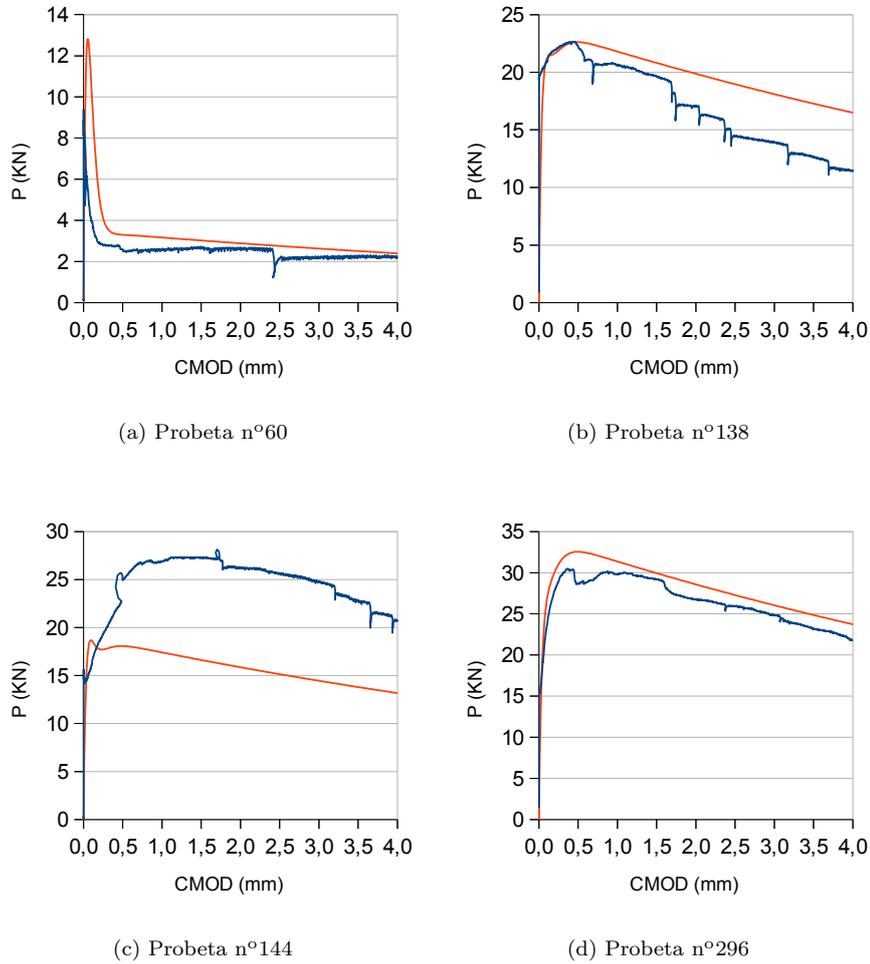


Figura 6.24: Resultados del ensayo flexotracción (en azul) y aproximación exponencial (en rojo).

documentos técnicos, es poder respaldar los diseños realizados de la aplicación propuesta en base a la normativa vigente del ámbito más cercano.

La obtención de las elongaciones de los puntos clave del diagrama multilíneal se basan en un valor denominado en la propia normativa como *Longitud Crítica* (I_{cs}). En la literatura este parámetro adquiere el nombre de *Longitud Característica* y representa la relación entre ambos modelos (tensión-elongación y tensión-abertura de fisura) en base a la Ecuación (6.6). La determinación del valor de esta variable sigue requiriendo sin embargo mayor estudio [di Prisco and Colombo (2006)].

$$\epsilon = \frac{w}{I_{cs}} \quad (6.6)$$

La Instrucción EHE-08, establece como longitud característica el valor me-

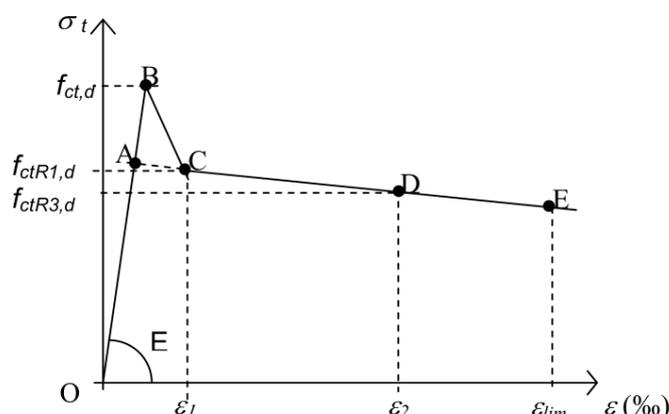


Figura 6.25: Diagrama multilinear [EHE-08 (2008)].

| ΔL (H) | x_{pre} (mm) | σ_{pre} (MPa) | $\alpha 1$ | x_{post} (mm) | σ_{post} (MPa) | $\alpha 2$ |
|-------------------|-------------------|-------------------------|------------|--------------------|---|------------|
| $\lesssim 1.00$ | 0.005 | $f_{ct,L}^f \cdot 0.61$ | 1.001 | 0.5 | $f_{R,1} \cdot 0.33$ | 10 |
| $\gtrsim 1.00$ | 0.01 | $f_{ct,L}^f \cdot 0.67$ | 100 | 0.5 | $f_{R,1} \cdot (-0.19 \cdot \Delta L + 0.68)$ | 10 |

Tabla 6.10: Parámetros de entrada para la predicción del comportamiento del material.

nor correspondiente a la distancia media entre fisuras o la distancia del eje neutro al extremo más traccionado. Por tanto, resulta necesario el determinar la profundidad del eje neutro, tarea que complica el procedimiento. Esto resulta complicado puesto que determinar el equilibrio de fuerzas en la sección requiere conocer la resistencia a tracción, dato que, de primeras, es desconocido. Sin embargo, la Instrucción permite, para comportamientos con ablandamiento ($f_{R,1}$ y $f_{R,3} < f_L$), considerar que la separación de fisuras es igual al canto de la probeta entallada, 125 mm en este caso. Este valor resulta aceptable para probetas que presentan una caída de tensión tras la fisuración de la matriz, aquellas que presentan valores de resistencias residuales menores al LOP. Adoptar este valor está del lado de la seguridad puesto que provoca que la cola del diagrama sea menos tendida, presentando una mayor tasa de reducción de la capacidad resistente.

Al igual que se ha mostrado de manera precedente, las Figuras 6.26a a 6.26e expresan las relaciones obtenidas entre la variación de la inductancia medida y la resistencia del LOP ($f_{ct,L}^f$) y las subsiguientes resistencias residuales a tracción por flexión ($f_{R,i}$). En este caso, se han englobado todas las probetas prismáticas ensayadas en los apartados precedentes.

Con los datos recogidos en la Tabla 6.10 se puede establecer el modelo multilinear para la totalidad de las probetas ensayadas en base a un procedimiento inverso. En las Figuras 6.27a a 6.27d se muestran los resultados para varias de ellas. Al mismo tiempo, es posible determinar la ley constitutiva del material a partir de los resultados magnéticos obtenidos previamente, aplicando un procedimiento similar al demostrado en el Apartado 6.6.3.1. En este caso,

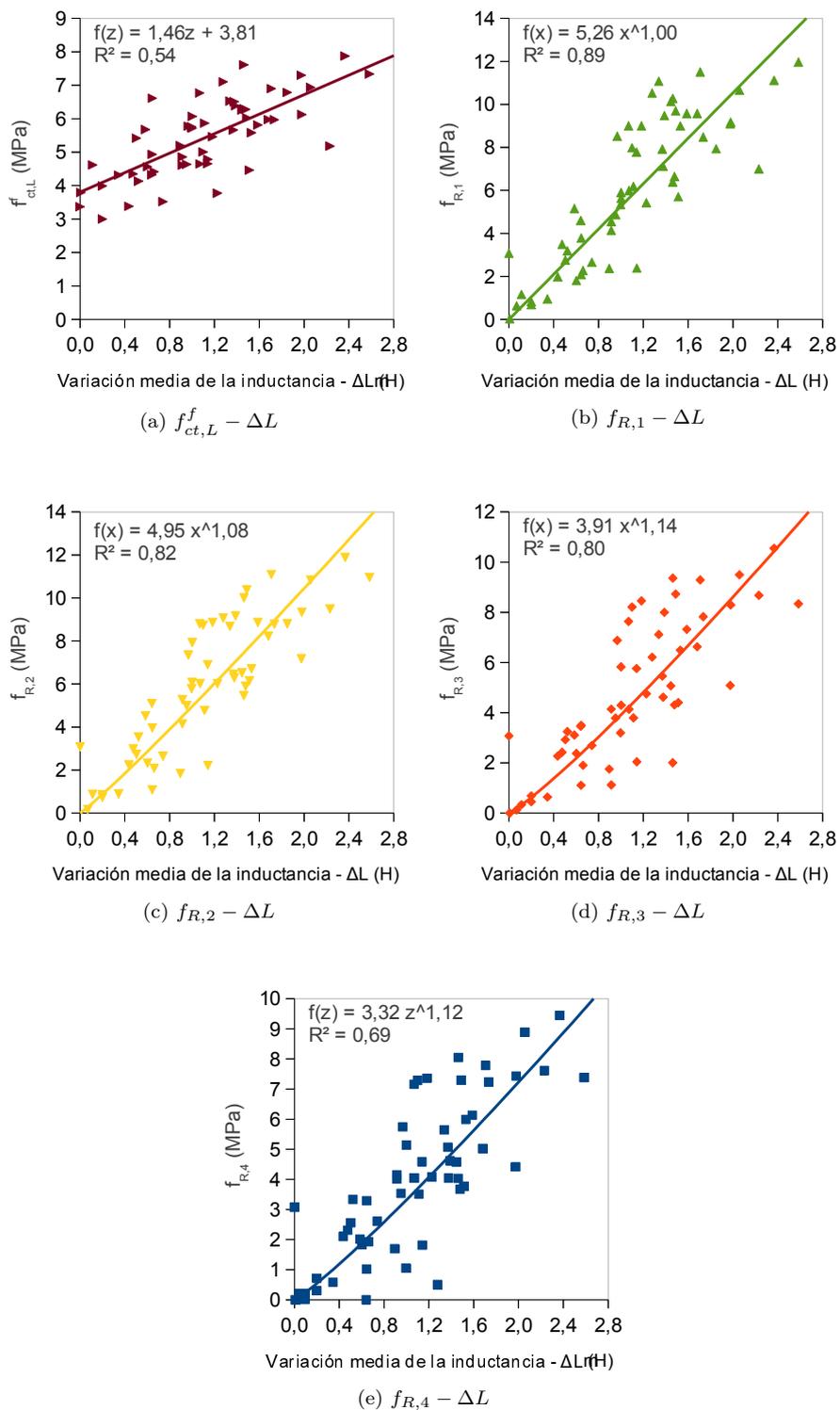


Figura 6.26: Relación entre inductancia y diversas resistencias.

los parámetros de entrada se adecuan a lo exigido para el establecimiento del modelo multilíneo, partiendo de las resistencias correspondientes al límite de proporcionalidad ($f_{ct,L}^f$) y la resistencia residual medida para una abertura de fisura de 0.5 mm ($f_{R,1}$). Se ha considerado primordial ajustar las curvas lo mejor posible en la zona de máxima resistencia, puesto que la aplicación propuesta requiere de un extremo control de la fisuración en servicio. Además, ciertos autores [Blanco et al (2013)] indican que se corresponde con los parámetros que mayor influencia tienen en la respuesta estructural. De ahí, que se haya empleado la primera resistencia residual, además de corresponder habitualmente al valor máximo a lo largo del régimen post-fisuración. Los parámetros de reducción de las resistencias previa a la fisuración se consideran constantes, puesto que la influencia del refuerzo mediante fibras no altera notablemente el comportamiento de la matriz. En cuanto a los valores de resistencia tras la fisuración de la misma, se reducen mediante un parámetro constante para aquellas probetas con menor refuerzo, ya que no se ha podido establecer una relación ajustada respecto al nivel de refuerzo (o variación de la inductancia en este caso). Sin embargo, para el otro rango de probetas más reforzadas, si se ha apreciado una influencia entre ambos aspectos, adoptando un parámetro de reducción variable, aumentando con la variación de la inductancia. Los parámetros que controlan la forma de las curvas exponenciales designadas como α_{pre} y α_{post} , se modifican, esta vez, en función del grado de refuerzo estimado. Los valores de elongación para la máxima resistencia a tracción introducidos en el modelo, se ajustan también al grado de refuerzo. La totalidad de los resultados para el conjunto de probetas ensayadas se recoge en el Anejo C.

Analizando dichas aproximaciones se constata que, por lo general, las probetas con refuerzos menores (variación de la inductancia menor a 1.00 Henrio) muestran una caída de tensión tras la fisuración de la matriz de hormigón. Esa frontera no es del todo nítida, encontrando probetas que se acomodan mejor a una tipo de predicción aun cuando les correspondería el contrario. Al mismo tiempo, las probetas con refuerzo (o medida de la variación de la inductancia) dispares en los cuartos adyacentes al plano central muestran una pérdida de resistencia brusca en alguno de los puntos, recuperando habitualmente la tendencia inicial. Ello origina que la predicción de la ley constitutiva no sea tan ajustada como debiera esperarse.

$$F_{post}(x) = c_4(e^{-c_5x}) \quad (6.7)$$

Dichos comportamientos se aproximan, por tanto, mediante dos variantes del modelo de exponencial cuadruple. La diferencia de ambos planteamientos radica en la forma en la que Instrucción EHE-08 confecciona su diagrama multilíneo. La primera función exponencial describe la aportación de la matriz de hormigón, mientras que la segunda función exponencial se encarga de definir el comportamiento del régimen tras la fisuración. En los casos donde el refuerzo no es suficiente, bien sea debido a su cuantía o su orientación, existe un comportamiento a ablandamiento acusado originando una zona con menor pendiente y menor nivel de resistencia. Para ilustrar dicho comportamiento, los componentes de la segunda función exponencial se reducen a lo mostrado en la Ecuación (6.7). En el caso del comportamiento mejorado a altos niveles de refuerzo, se procederá adoptando los parámetros de acuerdo a las ya mostradas Ecuaciones (6.5a) a (6.5f). Se debe hacer constar, que no se modifican los

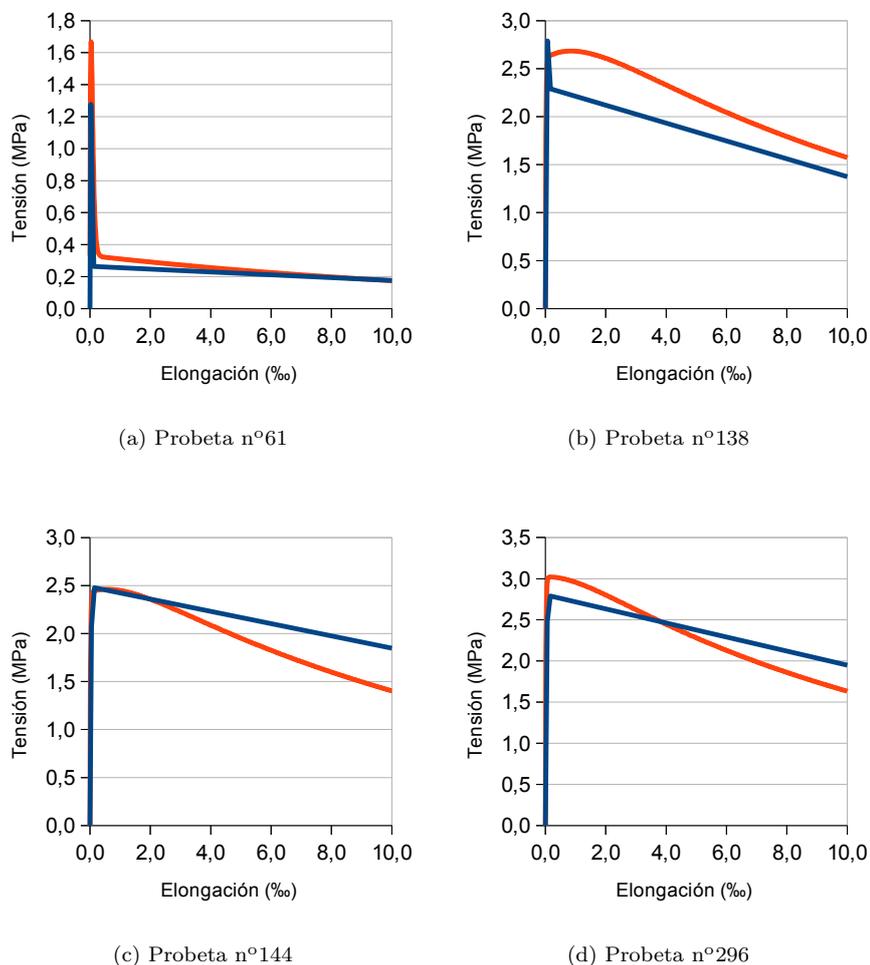


Figura 6.27: Diagrama multilínea (en azul) y aproximación exponencial (en rojo).

valores de α_{post} y c_5 para ambas aproximaciones, a diferencia de lo expuesto en [Lee and Barr (2004)].

6.7. Consideraciones finales

Los datos aportados por la campaña experimental de ensayos destructivos, demuestran que el material presenta unos valores de resistencia a compresión uniforme a lo largo y ancho del muro. Este valor resulta moderado partiendo de los condicionantes iniciales, que establece la dosificación de un hormigón autocompactante como el empleado. La adición de fibras no influye de manera notable en las resistencias alcanzadas por el material, obteniendo valores medios similares en las probetas cúbicas extraídas del muro y las probetas cilíndricas moldeadas conjuntamente.

En cuanto a la resistencia a tracción se refiere, se verifica su adecuación al uso propuesto mediante diversos métodos y ensayos. Por un lado, el ensayo Barcelona y el ensayo Brasileño presentan valores de resistencias a tracción máximas sin elevada dispersión con una relación 1.31 superior en el segundo de los métodos. La formulación convencional para obtener la resistencia a tracción media a partir de la resistencia característica a compresión, muestra un valor muy cercano al obtenido experimentalmente mediante el ensayo Barcelona.

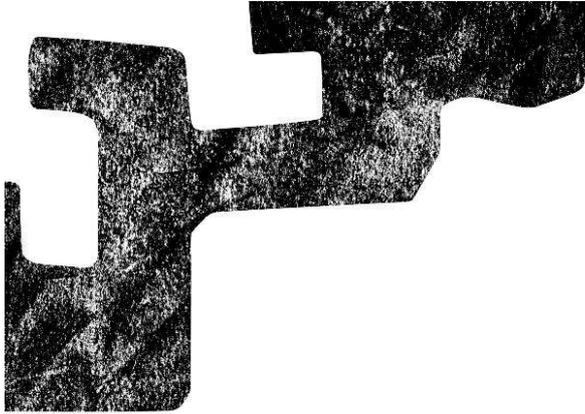
La tenacidad del material se estudia por medio del ensayo de doble punzonamiento modificado, denotando que la orientación de fibras principalmente, así como la densidad en segundo lugar, juegan un papel muy importante en los patrones de rotura y los valores máximos alcanzados. Este aspecto se analiza de manera más detallada mediante los ensayos de flexotracción. Éstos permiten obtener la ley constitutiva del material en base a un modelo tensión-elongación descrito en la Instrucción de Hormigón Estructural [EHE-08 (2008)].

Se demuestra que el material puede alcanzar una capacidad resistente notable desde el punto de vista de su resistencia a tracción y las resistencias residuales, que demuestran la ductilidad incrementada gracias al refuerzo de fibras. Ahora bien, el procedimiento de vertido u hormigonado, influye de manera considerable en la orientación que adoptan las fibras reforzando cada eje de la pieza de manera diferente. El hormigón autocompactante reforzado con fibras de acero (HACRFA) no es, por tanto, un material isotropo, si no que sus propiedades varían en cada una de las direcciones.

Si bien, la ejecución del muro no ha sido la adecuada, ha permitido analizar dicho comportamiento y estimar las variaciones originadas por el efecto del movimiento de la masa dentro del encofrado. De manera complementaria se contrastan los valores resistentes con los valores de variación de la inductancia del campo magnético generado atravesando las probetas, concluyendo que puede establecerse una relación entre ambos. Se establecen de manera satisfactoria los procedimientos para determinar la respuesta del material frente al ensayo de flexotracción y su correspondiente diagrama $\sigma - \epsilon$ de acuerdo a la EHE-08, de manera predictiva partiendo de los resultados de dicho método magnético. Esta afirmación resulta de lo más interesante, puesto que puede permitir un adecuado control de calidad sobre las estructuras construidas a escala real, confirmando las capacidades resistentes exigidas en proyecto en función de las alteraciones de un campo magnético aplicado a la propia estructura real. Para ello, resulta necesario desarrollar los equipos adecuados, que se adapten a las geometrías diseñadas.

Es más, si se relacionasen los resultados del movimiento de la masa obtenidos mediante simulaciones basadas en métodos de dinámica de fluidos computacional, podría ser posible estimar una orientación de fibras de forma que se estableciese la ley constitutiva del material de manera directa y previa a cualquier ensayo sobre probetas moldeadas. En el Apartado 7.4 se profundizará en dicho aspecto.

Finalmente, se ha analizado la capacidad del material de soportar esfuerzos tangenciales, sin obtener datos aclaratorios de la influencia de las fibras en tal aspecto.



PARTE **V**

Predicción de la orientación

CAPÍTULO 7

Simulación de hormigonado mediante CFD

7.1. Introducción

La Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) se muestra como una de las técnicas a desarrollar para un correcto diseño del material a escala real. Se ha demostrado a lo largo de esta Tesis Doctoral, que el movimiento de la masa interfiere en la alineación que adoptan las fibras y que ésta puede ser en cierta medida previsible. Existen, evidentemente, otros aspectos como los efectos pared, o el vibrado en hormigones no autocompactantes, que también alteran dicha orientación y que por ahora quedan fuera del alcance del presente análisis computacional. En este apartado se mostrará el procedimiento desarrollado para realizar la simulación del hormigonado del muro y su contrastación con los resultados de anteriores ensayos destructivos (Capítulo 6) y no destructivos (Capítulo 5).

El estudio del comportamiento reológico del material permite su análisis mediante el empleo de métodos numéricos apropiados. En el presente estudio se demuestra la adecuación de la simulación realizada en base a la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes, implementadas en el programa Gerris Flow Solver.

La simulación se ha realizado mediante el empleo del programa de código abierto Gerris [Popinet (2003)]. En él, se resuelven las ecuaciones que determinan el movimiento de fluidos incompresibles por medio del método de Volumen de Fluido (VOF) recogido en el Apartado 2.4, para describir el movimiento de flujos multifase de densidad variable.

7.2. Resolución de ecuaciones de Navier-Stokes

Las ecuaciones de Navier-Stokes surgen de la aplicación de la segunda ley de Newton y consisten en ecuaciones diferenciales, que describen el movimiento de un fluido. Para una viscosidad constante, se desarrollan de la manera representada en la Ecuación (7.1).

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \nabla u \right) = -\nabla p + \nabla(2\eta|\gamma|) + \rho g \quad (7.1)$$

La primera parte de la igualdad de la Ecuación (7.1), representa las fuerzas inerciales con ρ como la densidad del fluido y la segunda parte muestra el gradiente de presión, la viscosidad (siendo $|\gamma|$ el tensor del gradiente de deformación) y, por último, la gravedad.

Dado que los efectos de la temperatura son despreciables, de forma añadida únicamente se requiere determinar la conservación de la masa en un fluido incompresible, o más concretamente el volumen en este caso, de acuerdo a la Ecuación (7.2).

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (7.2)$$

Para rastrear y localizar la superficie libre entre las dos fases en juego dentro de la simulación, como son el aire y el hormigón, se emplea la técnica numérica conocida como VOF (Ecuación (7.3)). El programa permite aplicar esta técnica euleriana gracias a una malla adaptativa, que recoge la forma de la envolvente. Este método resulta adecuado para garantizar la conservación de la masa, adaptándose correctamente a los cambios de su topología.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \nabla(cu) = 0 \quad (7.3)$$

La simulación multifase se realiza introduciendo un trazador c que separa ambas fases, siendo $c = 0$ para la fase aire y $c = 1$ para el hormigón. Valores intermedios indican la interfase o gradiente del volumen de control. Las ecuaciones (7.4a), (7.4b) y (7.4c) establecen las propiedades de los fluidos para cada fracción de volumen. En ellas, los subíndices h y a corresponden a las fases de hormigón y aire, respectivamente.

$$\rho = \rho_h \cdot c + \rho_a \cdot (1 - c) \quad (7.4a)$$

$$\mu = \mu_h \cdot c + \mu_a \cdot (1 - c) \quad (7.4b)$$

$$\tau_0 = \tau_{0,h} \cdot c + \tau_{0,a} \cdot (1 - c) \quad (7.4c)$$

El fluido se modeliza asimilándolo con un fluido Bingham (Ecuación (2.4a)) homogéneo. Para ello se introduce la viscosidad aparente (η) del material en base al binomio formado por la tensión de corte (τ_0) y la viscosidad dinámica (μ) de acuerdo a la Ecuación (7.5), suponiendo despreciables los efectos de inercia. Cabe destacar que en la formulación empleada en este caso, la introducción de la segunda invariante del tensor deformación (II_γ), difiere ligeramente de la habitual ya que se ha optado por seguir el criterio establecido en [Lagrée et al (2011)]. En las simulaciones realizadas, no se ha requerido emplear la aproximación propuesta por [Papanastasiou (1986)].

$$\eta = \mu + \frac{\tau_0}{\sqrt{2}II_\gamma} \quad (7.5)$$

7.2.1. Parámetros reológicos

Los datos de partida necesarios para la resolución del problema son los relativos a las propiedades reológicas y físicas del material. Por un lado, es

necesario conocer la tensión umbral y la viscosidad plástica del hormigón. Estos parámetros, como ya se ha mencionado, condicionan el movimiento de la masa confiriéndole en este caso, sus propiedades autocompactantes.

Ante la carencia de un reómetro idóneo para su caracterización, se han adoptado valores obtenidos de acuerdo a diversas simulaciones del ensayo de escurrimiento y cotejados con los múltiples ensayos reológicos y de escurrimiento realizados sobre la masa fresca por [Zerbino et al (2009)]. Se realizan, por tanto, 9 simulaciones en 2D variando paulatinamente los valores de tensión de corte y viscosidad de forma que se obtenga una aproximación matemática del diámetro final alcanzado y el tiempo transcurrido para superar la línea de 500 mm.

La Figura 7.1 recoge una instantánea de la superposición de todas las combinaciones realizadas. En dicha imagen, los hormigones de cada columna presentan igual viscosidad, con un aumento de la tensión de corte cuanto más a abajo, mientras en las filas, la tensión de corte se mantiene constante y se incrementa la viscosidad hacia la derecha. De esta manera, se realiza un estudio amplio de diversas casuísticas donde se puede apreciar cual es la influencia de cada uno de los parámetros respecto a los datos a medir.

A diferencia de las simulaciones realizadas hasta la fecha, en lo que al ensayo de escurrimiento del hormigón se refiere, en este caso, se ha incluido dentro de la simulación el propio cono de Abrams, que tal y como muestra la Figura 7.2 condiciona el movimiento de la masa, sobre todo en masas viscosas. Dicha figura muestra para el mismo instante de tiempo, la ubicación de la interfase hormigón-aire, apreciándose claramente que el sólido impide el desplazamiento lateral de la masa albergada todavía en su interior. Este fenómeno se aprecia de manera más acusada en hormigones con mayores viscosidades. Es de destacar que la diferencia entre el tiempo T_{50} medido y el diámetro final D_f alcanzado se ve afectada por la velocidad de izado e incluso, posibles desplazamientos laterales del cono. Ya mencionan [Gettu et al (2004)], que existen ligeras diferencias achacables al operario que efectúa la maniobra y mide los tiempos en los ensayos de caracterización de los hormigones autocompactantes.

Los parámetros se reducen a variables adimensionales debido al elevado ratio entre las densidades y viscosidades de ambos materiales presentes en la simulación, como son el hormigón y el aire. El ámbito de estudio abarca un espacio bidimensional de 1 metro de altura y 1 metro de anchura, donde el eje de revolución del cono y el hormigón se han dispuesto en uno de los laterales del dominio, resolviendo por simetría la parte excluida de la simulación. De acuerdo a sus unidades en el sistema internacional, las nuevas variables adimensionales adoptan las siguientes formas para el tiempo $\tilde{t} = t/\sqrt{b/g}$, la velocidad $\tilde{v} = v/\sqrt{b \cdot g}$, la viscosidad dinámica $\tilde{\mu} = \mu/(\rho_c \cdot b^{1,5} \cdot g^{0,5})$ y la tensión umbral $\tilde{\tau}_0 = \tau_0/(\rho_c \cdot b \cdot g)$, siendo b el lado del ámbito analizado y g la fuerza de gravedad.

El modelo implementa un refinamiento dinámico de la malla que permite optimizar los recursos durante su proceso. De esta manera, la interfase entre ambas fases y la correspondiente a la fase hormigón se refina de acuerdo a unos criterios previamente establecidos. Para que el gasto computacional no se incrementa de manera excesiva, la malla puede optimizarse a lo largo del proceso de manera iterativa. Se establecen en el código, por tanto, unos criterios que introduzcan un mayor refinamiento en la fase de hormigón e incluso mayor en la interface entre hormigón y aire, de forma que se pueda rastrear la curvatura

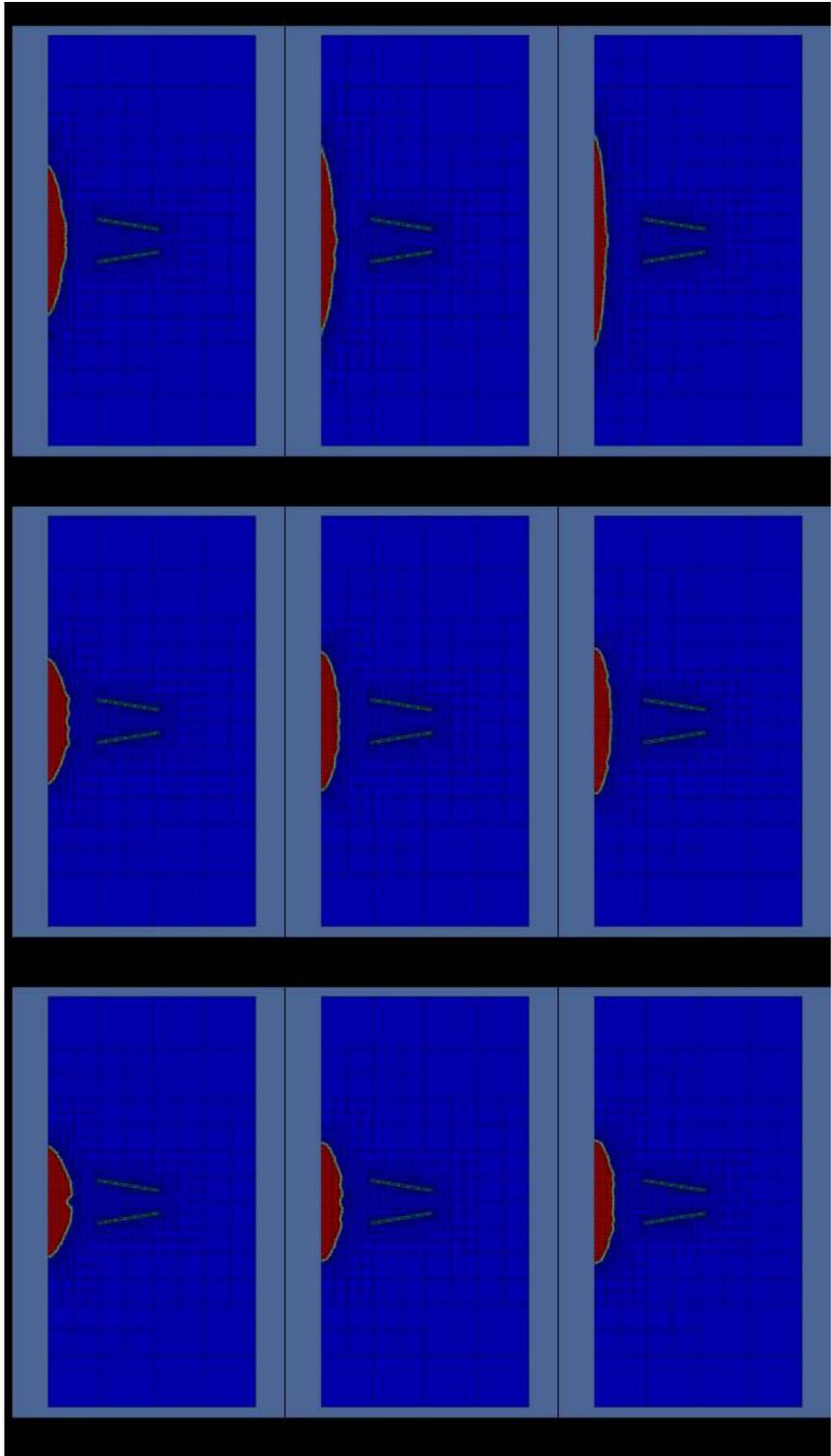


Figura 7.1: Simulación del ensayo de escurrimiento mediante el cono de Abrams para diversas combinaciones de tensión de corte y viscosidad.

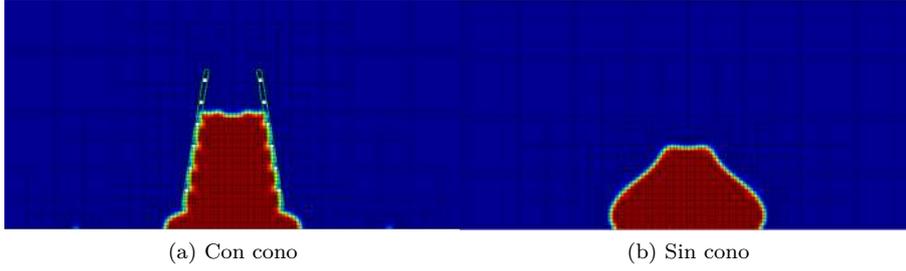


Figura 7.2: Diferencia de movimiento de la masa debido a la coacción del cono.

de manera más eficiente.

En la Tabla 7.1 se muestran las diferencias entre las simulaciones con y sin cono. Se aprecia claramente, que la ausencia del cono implica un movimiento más rápido en todos los casos alcanzando en tiempos más reducidos la línea que indica el diámetro de 500 mm y donde se establece el tiempo T_{50} . Así mismo, se hace notar que dicha tendencia no se ve excesivamente alterada por el aumento de la tensión de corte, como es habitual. Sin embargo la medición del diámetro final D_f del escurrimiento aporta cierta divergencia de resultados. Como también es habitual, el aumento de la tensión de corte es el parámetro que mayor influencia tiene en el diámetro alcanzado, pero mientras que para masas poco viscosas, el diámetro aumenta, a medida que la viscosidad crece, existe una regresión en el valor máximo. Esto puede ser debido a que exista una notable disipación de energía tras la brusca caída de la masa, que no ocurre con un movimiento iniciado por el resquicio abierto bajo el cono, que aun siendo más lento, es más constante. Parece, por tanto, más correcto incluir el elemento sólido en movimiento dentro de la simulación a costa, evidentemente, de complicar y ralentizar la misma. Además de resolver la advección del hormigón, se requiere computar la correspondiente a las celdas englobadas dentro del propio elemento sólido que simula el cono.

De esta manera, se han establecido las gráficas mostradas en las Figuras 7.3 y 7.4 donde se aprecian las influencias de las variaciones de ambos parámetros en la simulación realizada englobando el cono como sólido desplazándose de manera vertical. Si bien ambas propiedades alteran las medidas convencionales, queda claro que la tensión umbral juega un papel más notorio en la reducción del diámetro final alcanzado que en el aumento de la velocidad (Figuras 7.3b y 7.4b), mientras que la viscosidad ejerce una influencia contraria, afectando en mayor grado la velocidad de escurrimiento sin modificar en exceso la dimensión final (Figuras 7.3a y 7.4a).

Analizando las tendencias de la influencia de las propiedades reológicas con respecto a los ensayos estandarizados, es posible plantear las Ecuaciones (7.6a) y (7.6b) para determinar el comportamiento del hormigón fresco.

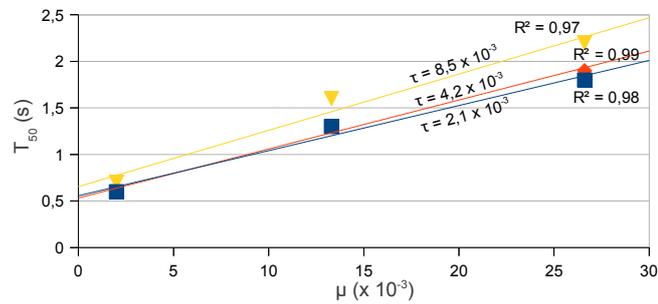
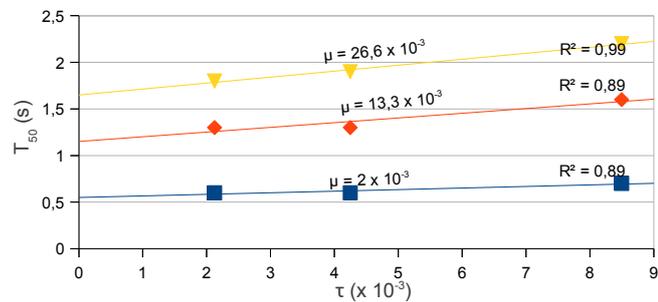
$$T_{50} = (0,044 + 0,0018 \cdot \tilde{\tau}_0 \cdot 10^{-3}) \cdot \tilde{\mu} \cdot 10^{-3} + (0,017 \cdot \tilde{\tau}_0 \cdot 10^{-3} + 0,495) \quad (7.6a)$$

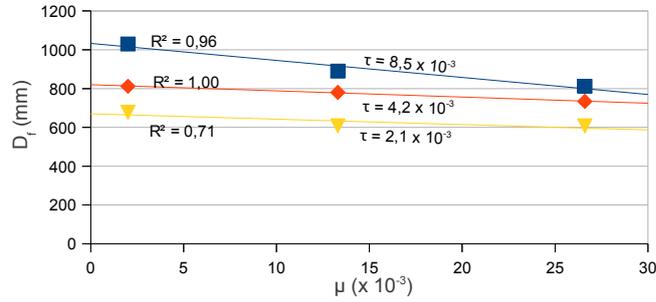
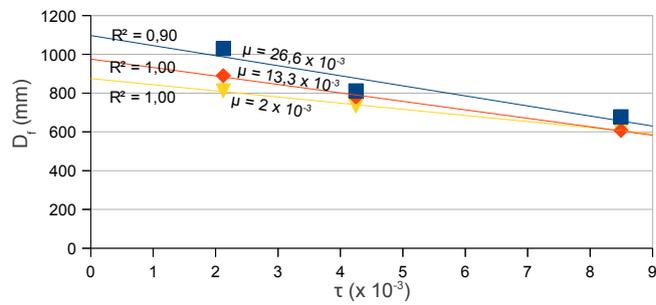
$$D_f = (54 + 0,8 \cdot \tilde{\mu} \cdot 10^{-3}) \cdot \tilde{\tau}_0 \cdot 10^{-3} + (-9 \cdot \tilde{\mu} \cdot 10^{-3} + 1108,09) \quad (7.6b)$$

Estos valores de tensión umbral y viscosidad se refieren a los valores introducidos en la simulación bidireccional del fluido realizada. Es cierto que difieren

| | $\tilde{\tau}_0$ (10^{-3}) | $\tilde{\mu}$ (10^{-3}) | T_{50} (s) | D_f (mm) |
|----------|-----------------------------------|--------------------------------|-----------------|---------------|
| Con cono | 2.1 | 2 | 0,6 | 1030 |
| | 2.1 | 13.3 | 1,3 | 890 |
| | 2.1 | 26.6 | 1,8 | 812 |
| | 4.2 | 2 | 0,6 | 812 |
| | 4.2 | 13.3 | 1,3 | 780 |
| | 4.2 | 26.6 | 1,9 | 734 |
| | 8.5 | 2 | 0,7 | 678 |
| | 8.5 | 13.3 | 1,6 | 608 |
| | 8.5 | 26.6 | 2,2 | 608 |
| Sin cono | 2.1 | 2 | 0,3 | 1078 |
| | 2.1 | 13.3 | 0,5 | 780 |
| | 2.1 | 26.6 | 1,1 | 764 |
| | 4.2 | 2 | 0,5 | 874 |
| | 4.2 | 13.3 | 0,6 | 718 |
| | 4.2 | 26.6 | 1,2 | 718 |
| | 8.5 | 2 | 0,3 | 858 |
| | 8.5 | 13.3 | 0,7 | 608 |
| | 8.5 | 26.6 | 1,5 | 592 |

Tabla 7.1: Diferencias en las mediciones entre simulaciones con y sin cono.

(a) Variación de T_{50} respecto a $\tilde{\mu}$ para diversos valores de $\tilde{\tau}_0$ (b) Variación de T_{50} respecto a $\tilde{\tau}_0$ para diversos valores de $\tilde{\mu}$ Figura 7.3: Variación de T_{50} en función de $\tilde{\mu}$ y $\tilde{\tau}_0$.

(a) Variación de D_f respecto a $\bar{\mu}$ para diversos valores de $\tilde{\tau}_0$ (b) Variación de D_f respecto a $\tilde{\tau}_0$ para diversos valores de $\bar{\mu}$ Figura 7.4: Variación de D_f en función de $\tilde{\mu}$ y $\tilde{\tau}_0$.

un tanto de los valores que aportan los viscosímetros o reómetros que se encuentran en el mercado, aunque como ya se ha mencionado en su momento, estos también difieren entre sí [Hu (1995)]. Para relacionar las medidas de la simulación con las mediciones efectuadas sobre masas reales de hormigón, se han empleado los resultados del estudio realizado por [Zerbino et al (2009)] y se han determinado las propiedades que de acuerdo a las Ecuaciones (7.6a) y (7.6b) son necesarias para obtener las mismas medidas en los ensayos. En el mencionado artículo, se analizan 40 muestras de hormigón, repitiéndose para la mayoría de ellas (25) los ensayos de escurrimiento y la determinación de los parámetros reológicos. Aún así, únicamente se han empleado los valores de la masa recién amasada, para evitar que otros fenómenos como el inicio del fraguado, introduzcan mayor dispersión en la comparativa. La linealidad de ambos rangos de valores, permite realizar la correspondiente transformación de los parámetros reológicos de una masa analizada mediante el viscosímetro BML, para su posterior modelización en Gerris.

La Tabla D.1 del Anejo D, recoge los resultados y la Figura 7.5 muestra las relaciones entre ambos casos. Se aprecia en ellas, que los valores con medidas nulas de la tensión umbral, se encontrarían en un rango negativo respecto a las de la simulación. Es decir, las masas con elevada fluidez, tienden a presentar valores de tensión umbral negativos, tal y como ya se ha mencionado en el Apartado 2.4, y como físicamente resulta imposible, los equipos de medida indican un valor nulo. Esas medidas, y de manera adicional alguna otra con

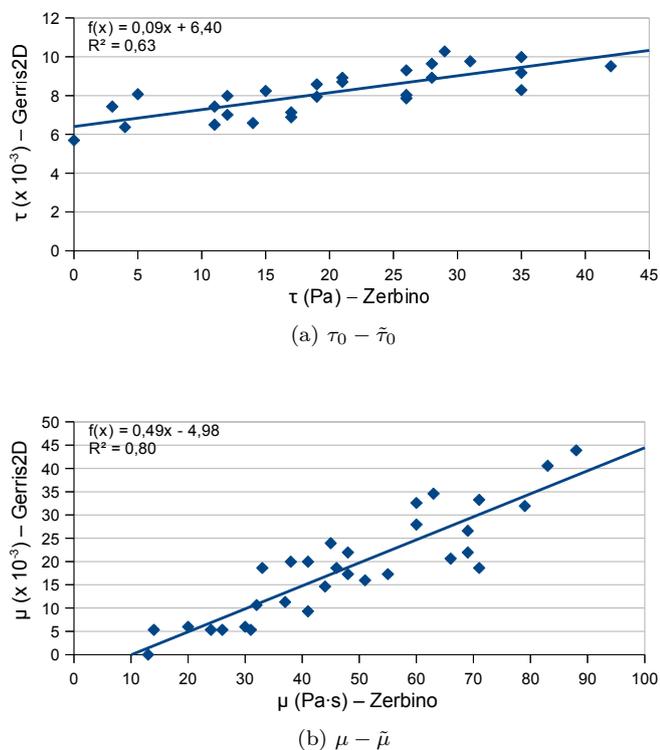


Figura 7.5: Relación entre medidas de τ_0 y μ del viscosímetro BML y $\tilde{\tau}_0$ y $\tilde{\mu}$ de simulaciones CFD.

una tensión de corte reducida, han sido omitidas en la representación gráfica, dado que impedían determinar una correlación adecuada.

En función de la velocidad para alcanzar un diámetro de 500 mm (T_{50}) y el diámetro final (D_f) tras el ensayo de escurrimiento realizado al hormigón autocompactante reforzado con fibras de acero vertido en el muro y las relaciones hasta ahora mostradas, se adoptan una tensión umbral (τ_0) y una viscosidad plástica (μ) de 0 Pa y 63 Pa·s, respectivamente. Se establece una densidad del hormigón de 24 KN/m³. Al mismo tiempo, se adoptan para la fase gaseosa, el aire, una densidad de 12 KN/m³ y una viscosidad de $1.81 \cdot 10^{-5}$ Pa·s.

Estos valores conformarán, por tanto, los datos de partida de la simulación completa del hormigonado del muro, donde se analizarán los campos de velocidades para su comparación con la orientación de fibras estimada mediante el resto de ensayos.

Queda latente en esta fase, la limitación que presenta el modelo Bingham para materiales como el hormigón autocompactante. La simulación bidimensional (2D) del ensayo de escurrimiento aporta siempre valores positivos para la tensión umbral, mientras que en los modelos tridimensionales (3D) y axisimétricos, se sobrestiman dichos valores. Esta diferencia entre los valores representativos en modelos bidimensionales y axisimétricos, y su explicación, ya ha sido puesta de manifiesto por [Dufour and Pijaudier-Cabot (2005)] en estudios anteriores.

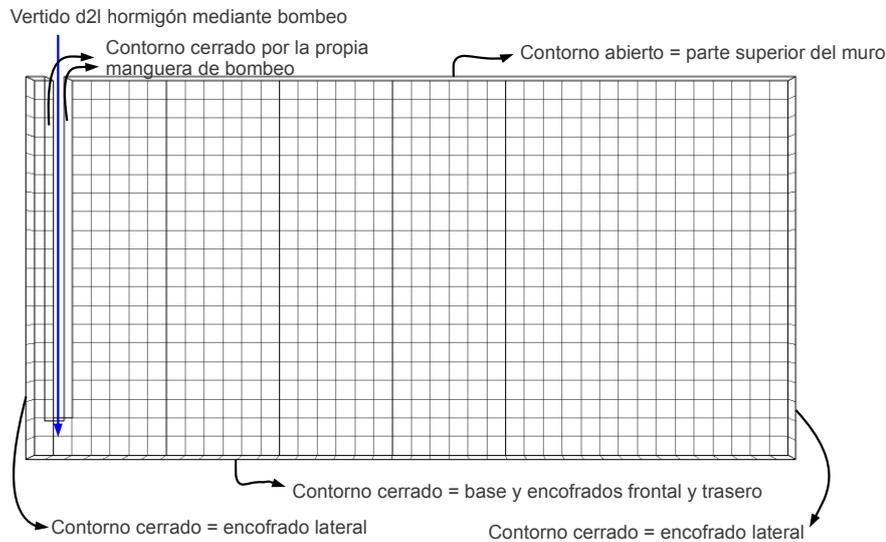


Figura 7.6: Modelo de simulación del muro y sus condiciones de contorno.

Se establece, por tanto, un procedimiento para caracterizar la reología del hormigón vertido, que consiste en la comparación del ensayo del cono de Abrams efectuado sobre la masa fresca y su simulación computacional. Debido a lo anteriormente expuesto, resulta más interesante realizar una simulación bidimensional, que permita registrar todo el rango de escurrimientos indicado en la normativa vigente para considerar un hormigón como autocompactante. Posteriormente los valores obtenidos en la simulación se extrapolan a medidas más concordantes con las registradas mediante el viscosímetro BML, en función de la relación mostrada en la Figura 7.5.

7.2.2. Modelo completo

El modelo de análisis diseñado (Figura 7.6) reproduce la totalidad del muro con unidades de estudio de 0.15 cm de lado, que permiten su modulación como si de probetas cúbicas se tratase. De acuerdo a las dimensiones principales del muro (longitud, altura y espesor), éste se subdivide en 800 cubos, pero varios de ellos se han anulado para simular el espacio que ocupa la manguera de bombeo. En definitiva, son un total de 782 cubos por los que fluye el hormigón fresco. Se han incluido sólidos que simulen los sargentos dispuestos para amarrar uno y otro lado del encofrado, para incluir en la simulación la alteración del flujo que pudieran provocar.

El caudal de bombeo se establece en función del tiempo que dura la operación de hormigonado. Todo el proceso dura 8 minutos, con lo que se requiere de $0.3375 \text{ m}^3/\text{min}$ para rellenar el encofrado de $2,7 \text{ m}^3$. Se considera que no existe deslizamiento en las paredes del encofrado, lo que origina que la velocidad del hormigón en contacto con el mismo sea nula. Dichos encofrados, son los comunmente empleados en la construcción de muros, impregnados con un producto desencofrante para su posterior retirada.

El hormigón se introduce por la esquina inferior izquierda del encofrado a

través de la manguera de bombeo y fluye, de izquierda a derecha y de abajo a arriba, hasta rellenar todo el molde. Al mismo tiempo, la cara superior del conjunto se considera abierta para permitir la salida del aire, sin que se quede atrapado dentro de la masa. La manguera empleada para el bombeo tiene un diámetro de 150 mm que encaja perfectamente entre los paneles de encofrado frontal y posterior, de forma que se generan espacios separados a cada lado.

La simulación se ha realizado de forma coherente con el proceso de hormigonado real, manteniendo la manguera de bombeo introducida hasta la parte baja en todo momento. Este procedimiento, sin embargo, no era el previamente establecido determinándose una velocidad de ascensión de la manguera a medida que el frente de hormigonado se elevase. El presente estudio, no obstante, prima establecer unas condiciones de ejecución lo más reales posibles donde, como ha sido el caso, la comunicación entre los agentes intervinientes no suele resultar tan efectiva como era de esperar. Consecuentemente, el ensayo reproduce exactamente las condiciones de puesta en obra del hormigón.

Aun cuando el procedimiento y los resultados fuesen otros inicialmente, la simulación se ha adaptado al caso concreto analizado. Existe, aun así, una ligera diferencia entre el proceso de ejecución del muro y su simulación, puesto que en esta última no se ha reflejado la retirada de los equipos de bombeo previstos. Esa extracción de la manguera ha podido provocar un cierto movimiento de la masa, sobre todo en dirección vertical, que localmente ha modificado la orientación de las fibras en las proximidades del punto de vertido. Puesto que se considera poco relevante respecto al comportamiento mecánico del conjunto del muro, se ha optado por reducir la simulación al simple vertido de hormigón. De igual manera, no se ha contemplado que las dos columnas extremas tengan dispuesta una junta machiembreada con un banda impermeabilizante de PVC, lo que obviamente habrá dificultado el flujo del hormigón. El diseño de depósitos para casos reales, establece un espesor mínimo superior al empleado, por lo que los problemas originados en los extremos en el caso estudiado no serán extrapolables directamente.

Al igual que la simulación del ensayo de escurrimiento realizada, el modelo también implementa un refinamiento dinámico de la malla. En este caso, se ha evitado refinar la fase hormigón puesto que el mayor volumen del mismo durante la simulación obligaría a un mayor gasto computacional sin aportar información relevante. Al ser el ámbito de estudio del muro asimilable a las probetas cúbicas, no se requiere de mayor grado de detalle para comparar los resultados con los resultados de los métodos magnéticos, por ejemplo.

En cambio, se modifican los criterios de refinamiento establecidos para el cono de Abrams, potenciando un mejor acercamiento al movimiento de la masa en zonas con mayor vorticidad, además de la propia interfase, puesto que repercuten en mayor medida en la posible orientación de las fibras a lo largo del muro. Los sargentos entre encofrados laterales introducen discontinuidades geométricas que requieren acomodar la malla a agujeros tan pequeños. Del inicial ámbito de estudio denominado *caja*, que presenta unas dimensiones de 0.15 x 0.15 metros de lado, se alcanzan 3 niveles de refinamiento dinámico o estático en función de los criterios mencionados. La Figura 7.7 ilustra en una zona reducida del modelo, la unidad de referencia adoptada y las diversas situaciones que provocan la adaptación de la malla. Aún así, la malla no se ha refinado de manera tan acusada como en el ensayo del cono, puesto que su estudio se realiza a una escala mayor, superior al tamaño de sus agregados pétreos.

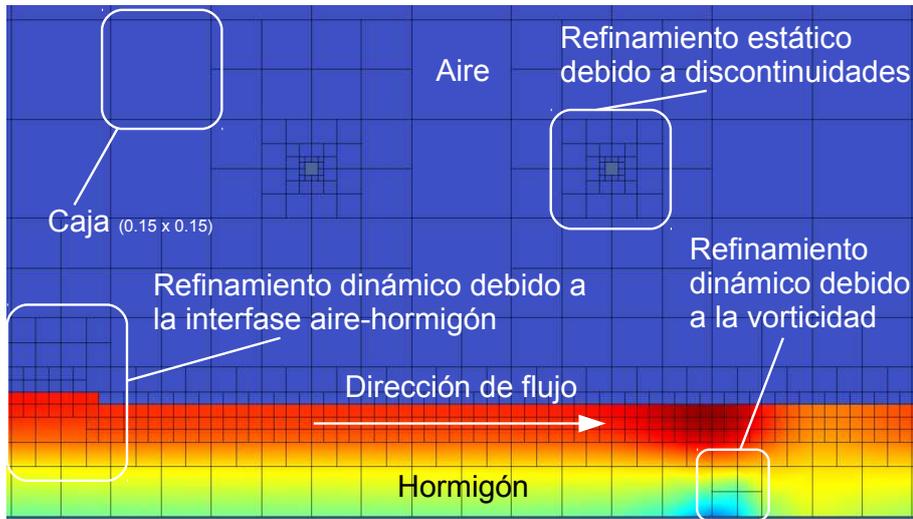


Figura 7.7: Criterios y niveles de refinamiento.

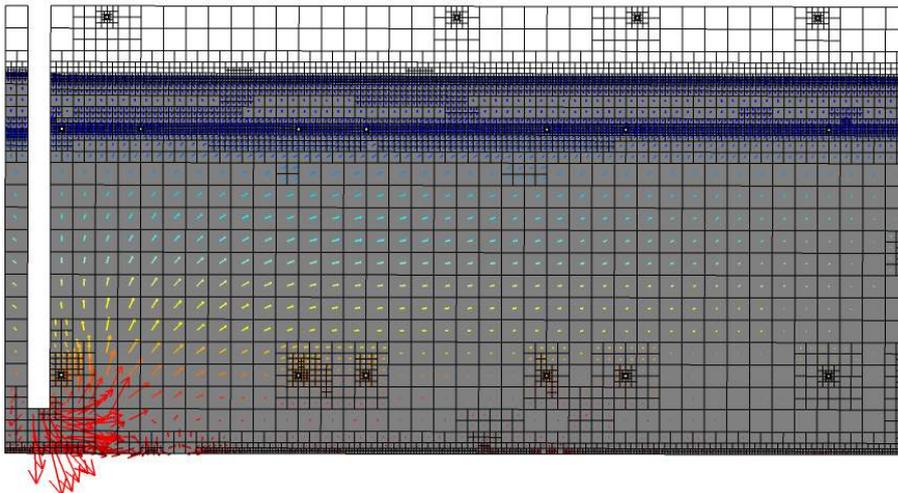
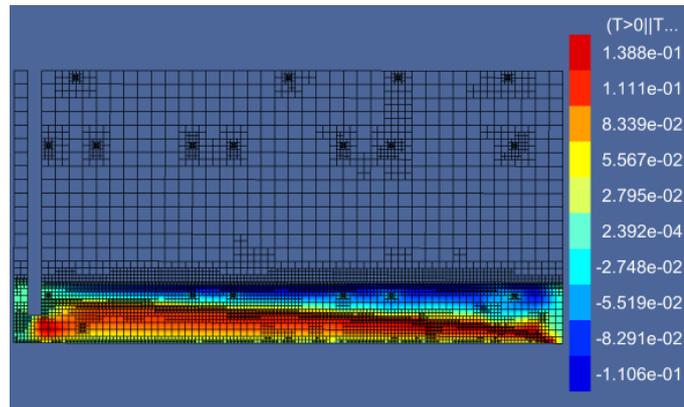


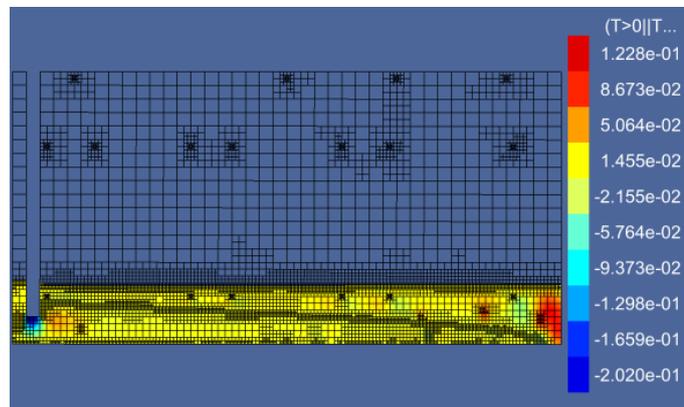
Figura 7.8: Zona rellena con hormigón y el refinamiento de la malla.

Se obtienen como resultado, además de la posición del trazador en cada instante de tiempo, las presiones y los campos de velocidades de ambas fases durante todo el proceso de hormigonado. Dado que el estudio se centra en el movimiento de la masa fresca de hormigón, se han omitido en este documento los resultados de la fase gaseosa.

Se aprecia en la Figura 7.8 el refinamiento que adopta la malla en los gradientes de las fases y en zonas con alta vorticidad, además de las líneas de flujo que indican la dirección e intensidad de la masa de hormigón que llena parte del volumen. En éste, se vislumbran dos niveles con mayor refinamiento, que delimitan los frentes de hormigonado de dos tipos de hormigón, debido a la segregación ya citada (Apartado 4.4.1). Resulta necesario, por tanto, involu-



(a) Velocidad horizontal.



(b) Velocidad vertical.

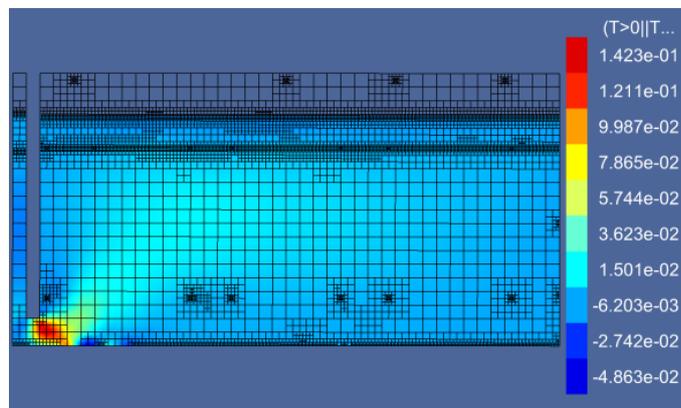
Figura 7.9: Campos de velocidades para $t = 112$ s.

crar a todos los agentes intervinientes para que el resultado final sea óptimo. Con idea de simular el proceso real, se ha introducido de manera previa al hormigón con las características descritas en el Apartado 7.2.1, otro hormigón menos viscoso y con menor densidad, que simule la segregación ocasionada por el agua de cebado de la bomba.

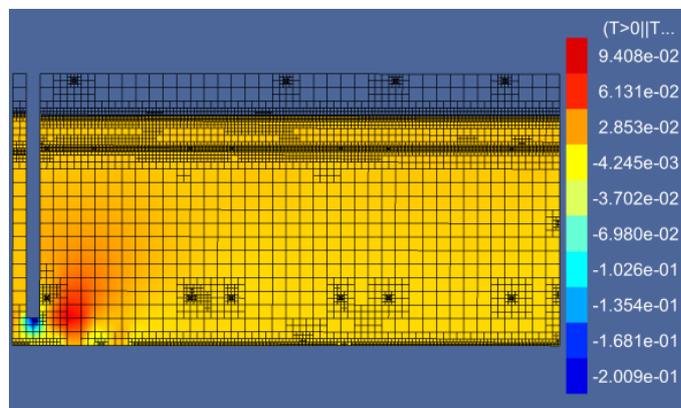
7.3. Resultados de la simulación

La simulación realizada sobre el conjunto del muro replicando el proceso de vertido y llenado del encofrado, muestra campos de velocidades diversos para cada zona del muro. Así cómo en la parte baja del muro, al inicio del hormigonado la masa discurre de manera horizontal con una componente de velocidad en el eje longitudinal notable, a medida que progresa la ejecución, se estabiliza el flujo tendiendo a un estado de reposo. Esta situación se refleja en la Figuras 7.9 y 7.10 para dos instantes de tiempo, correspondientes a 112 segundos y 439 segundos tras el inicio del hormigonado.

Debido a ello, en el lado derecho del tubo de hormigonado se empieza a



(a) Velocidad horizontal.



(b) Velocidad vertical.

Figura 7.10: Campos de velocidades para $t = 439$ s.

generar un flujo vertical a causa del volumen ocupado en los instantes iniciales que impide el movimiento horizontal del hormigón. En cuanto el hormigón alcanza la zona superior del frente de hormigonado, se vuelve a establecer dicho gradiente de velocidad horizontal. Sin embargo, cuanto más arriba se localice la *caja* analizada, mayor es el ratio entre componentes verticales y horizontales.

A medida que se ha vertido una mayor cantidad de hormigón en el encofrado, los valores de velocidad en la masa tienden a disminuir, puesto que resulta más complicado desplazar el volumen previamente vertido pero, aún así, el patrón de los campos de velocidades generados se mantiene constante.

7.3.1. Contrastación experimental

Resulta necesario la contrastación de los resultados de la simulación en un elemento real. Para ello, se emplearán los datos recabados, sobre todo, en los ensayos magnéticos anteriormente detallados (Apartado 5.4). En los mismos se aprecia como ha influido la dirección del movimiento de la masa en la orientación de las fibras.

En las Figuras 7.9a y 7.10b se aprecian las zonas en las que el flujo es

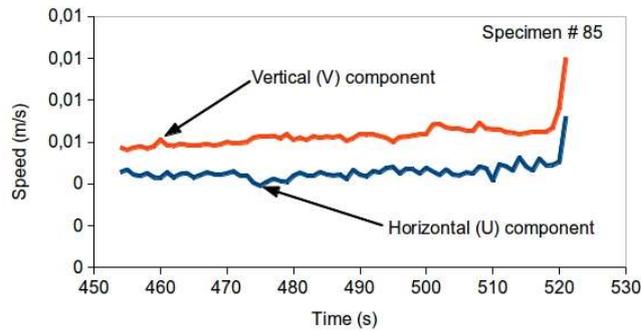
prácticamente horizontal y en las que existe una notable componente vertical, respectivamente. Ello se corresponde de manera muy acertada con la orientación en dirección longitudinal (X), que muestran las fibras en las probetas introducidas en el campo magnético y como indica la Figura 5.10. Tal y como se ha planteado, el flujo inicial recorre el encofrado en sentido longitudinal sin impedimentos. Esto no ocurre así cuando se ha vertido una cierta cantidad de hormigón, alrededor de un tercio de la altura, ya que obliga a la masa a ascender para poder desplazarse a posteriori de manera horizontal por la zona más superficial.

Los campos de velocidad pueden ser analizados para cada *caja* a lo largo de la simulación. Estudiando más detalladamente diversas zonas, concretamente las correspondientes con las probetas cúbicas n° 85 y n° 294, se muestran en la Figura 7.11 los campos de velocidad registrados para cada instante de tiempo. La velocidad horizontal es predominante para las *cajas* inferiores, aunque tiende a reducirse rápidamente durante la simulación. Para las *cajas* superiores ambas componentes de velocidad, horizontal y vertical, son más semejantes y continuando dicha tendencia hasta el final del hormigonado. La fase de hormigón requiere más tiempo para alcanzar las *cajas* superiores, por lo que su influencia en la simulación es menor que en las inferiores.

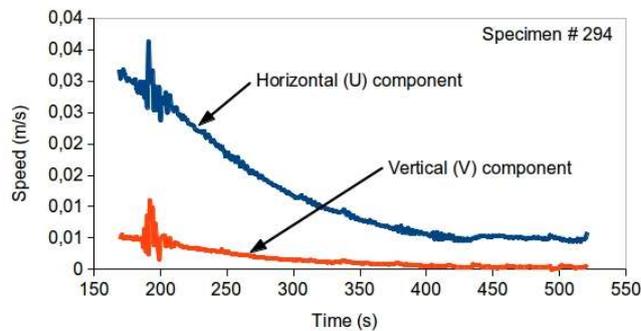
Para corroborar las predicciones realizadas mediante los métodos computacionales de simulación de fluidos, se comparan con los resultados del método magnético empleado en el Apartado 5.4. La orientación de las probetas se muestra para aquellas en las que se ha podido medir la variación de la inductancia para todos sus ejes. Ello explica que sólo se muestren las relaciones de las probetas cúbicas y 7 de las probetas prismáticas que se habían cortado en cubos, con motivo de obtener más información acerca de la aplicabilidad de los métodos magnéticos empleados (Apartado 5.4.3). En la Figura 7.12 se pueden apreciar las orientaciones de acuerdo al modelo computacional (en verde) y las obtenidas como resultado de los ensayos no destructivos (en rojo). Se observa que en muchos de los casos, si bien es cierto que no en todos, las orientaciones coinciden con notable precisión.

La distribución de las orientaciones a lo largo y alto del muro, se puede aproximar mediante una distribución Gaussiana para cada una de las filas, de acuerdo a lo mostrado en la Figura 7.13. Las zonas inferiores y superiores, presentan orientaciones más uniformes, manifestados por bajas desviaciones estándar (12-13% como valor mínimo). En las filas intermedias, la alineación de las fibras es variada debido a los fenómenos anteriormente mencionados. La zona de transición generada refleja zonas con componentes principales verticales, cerca del punto de bombeo, y zonas con campos de velocidad más marcadamente horizontal a medida que el flujo se estabiliza lejos de ese punto. En éste último caso, la desviación estándar se eleva hasta un 32%, fiel a lo predicho.

Al mismo tiempo, la respuesta mecánica también se ve influenciada por la orientación que adquieren las fibras dentro de la matriz. Analizando la Figura 6.15, se observa que existe también un corredor desde el punto de vertido que asciende en diagonal hacia la derecha, donde las probetas han presentado menores valores de resistencia residual. Esa zona se corresponde de manera bastante aproximada con el movimiento simulado de la masa.



(a) Probeta n°85



(b) Probeta n°294

Figura 7.11: Progresión de los campos de velocidad para las probetas n° 85 y n° 294.

7.3.2. Predicción de resistencias

Se ha constatado durante la realización de los diversos ensayos mecánicos (Capítulo 6) a lo largo de la presente Tesis Doctoral, como la orientación de las fibras respecto a los planos de rotura influyen notablemente en la capacidad resistente del material. Por tanto, fibras mejor alineadas con la dirección de los esfuerzos de tracción aportan valores más elevados en lo que a resistencia residual se refiere. Se considera, por tanto, factible la predicción del comportamiento mecánico del material en base a las orientaciones previstas de acuerdo a la simulación computacional de la dinámica del fluido. De los resultados registrados en el Apartado 6.6.3 para un total de 74 probetas prismáticas de una de cada dos filas del muro, se establece la aproximación mostrada en la Figura 7.14. En ella se muestran las orientaciones previstas para cada una de las probetas en su plano central frente a las diversas resistencias residuales ($f_{R,i}$). Se debe recalcar que el límite de proporcionalidad (LOP) no se ha representado, puesto que la aportación de las fibras se hace notar una vez se ha fracturado la matriz de hormigón. Tal y como se esperaba, ángulos reducidos proporcionan valores de resistencias elevados. De manera añadida, se observa claramente que los valores máximos alcanzados se corresponden con con ángulos ligeramente

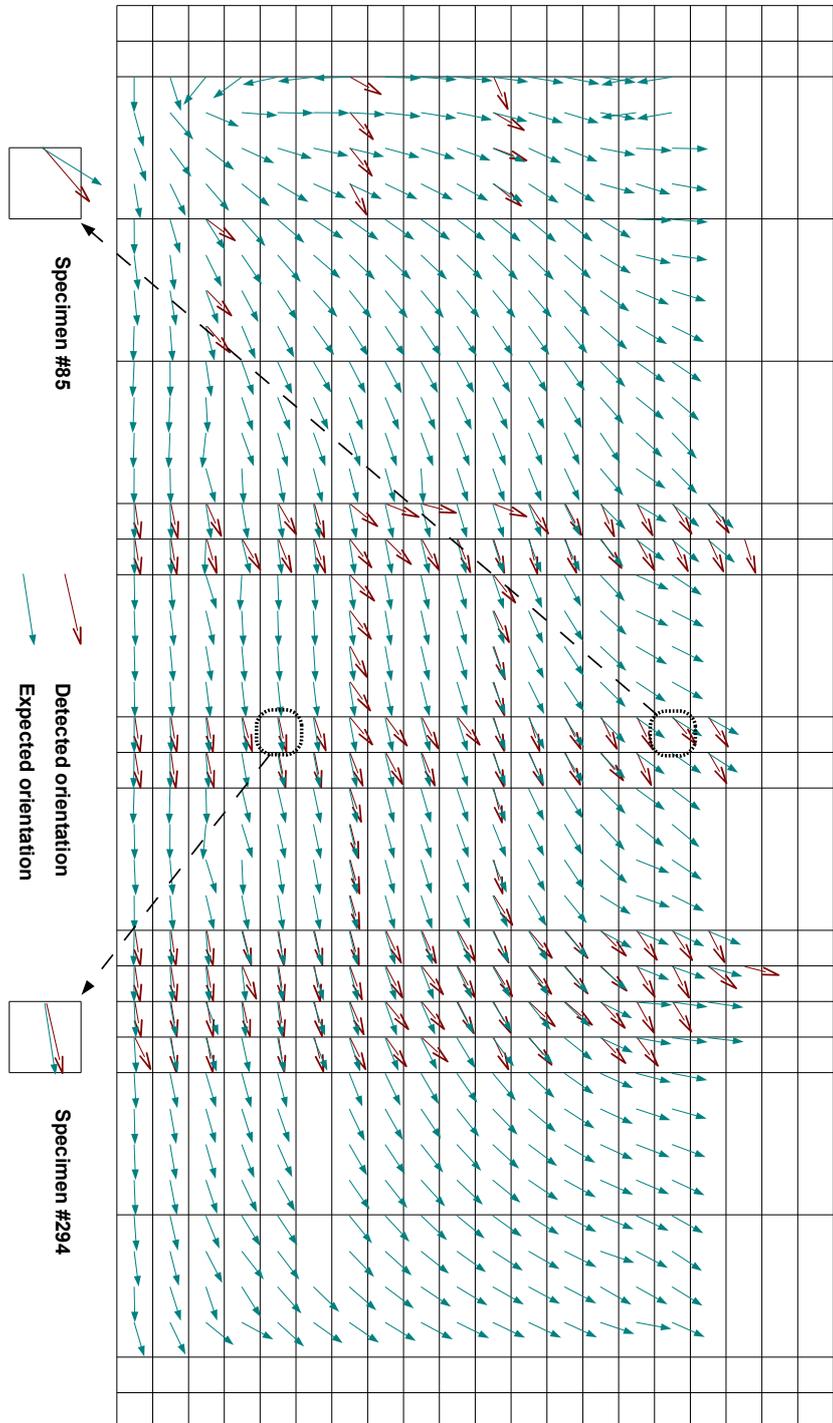


Figura 7.12: Superposición de orientaciones previstas y detectadas mediante métodos magnéticos.

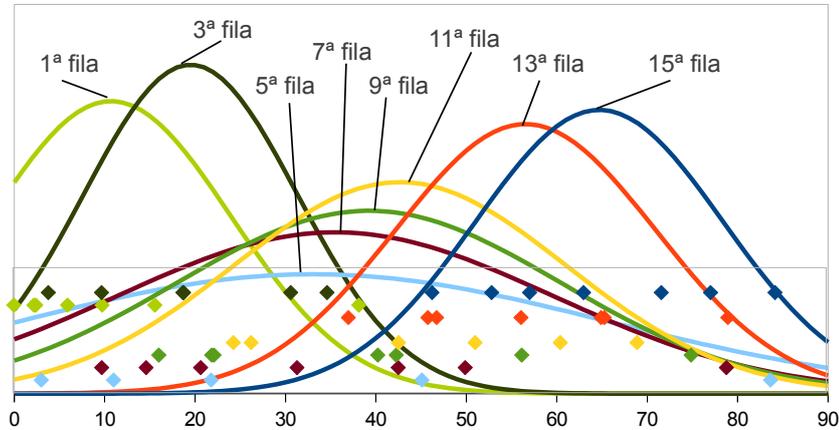


Figura 7.13: Distribución Gaussiana de las orientaciones.

superiores al plano horizontal, tal y como probaron [Robins et al (2002)] en los ensayos de arrancamiento de fibras individuales. La rotura localizada de la matriz en las zonas donde asoman las fibras y el enderezamiento de las mismas [Bartos and Duris (1994)] son las causantes de dicho incremento. Por contra, ángulos desalineados respecto a los esfuerzos de tracción aportan reducidas capacidades de carga.

Ya se ha comentado en apartados previos (Apartado 6.6.3.1), la dispersión inherente al ensayo de flexotracción, por lo que los datos no deben tomarse de manera aislada en función de cada probeta, si no con una perspectiva más amplia para conocer el comportamiento global de la estructura.

Aún cuando predecir el valor exacto de las resistencias residuales para una gran cantidad de probetas individuales no parece lo más exacto, es posible aproximar una línea de regresión que indique cualitativamente el comportamiento mecánico de las diversas zonas del elemento estructural. De esta manera, se permite detectar zonas débiles debido a procedimientos de hormigonado no adecuados para las características geométricas del elemento estructural y el encofrado dispuesto. Todo ello de manera previa a su ejecución real, con el consiguiente ahorro económico y temporal que supone. Resulta interesante establecer una única función continua diferenciable para describir el comportamiento resistente del material para cualquier orientación de fibras e, incluso, el estado post-fisuración. La Ecuación (7.7) define la función sigmoide empleada para establecer dicha tendencia.

$$y = A_b \cdot \frac{A_t - A_b}{\left(1 + \exp\left(\frac{x - x_0}{w}\right)\right)} \quad (7.7)$$

Debido a lo disperso de los resultados, se aplica el algoritmo Levenberg-Marquardt (LMA) para un ajuste de curva no lineal. Este procedimiento iterativo, minimiza el cuadrado de las desviaciones mediante el método de los

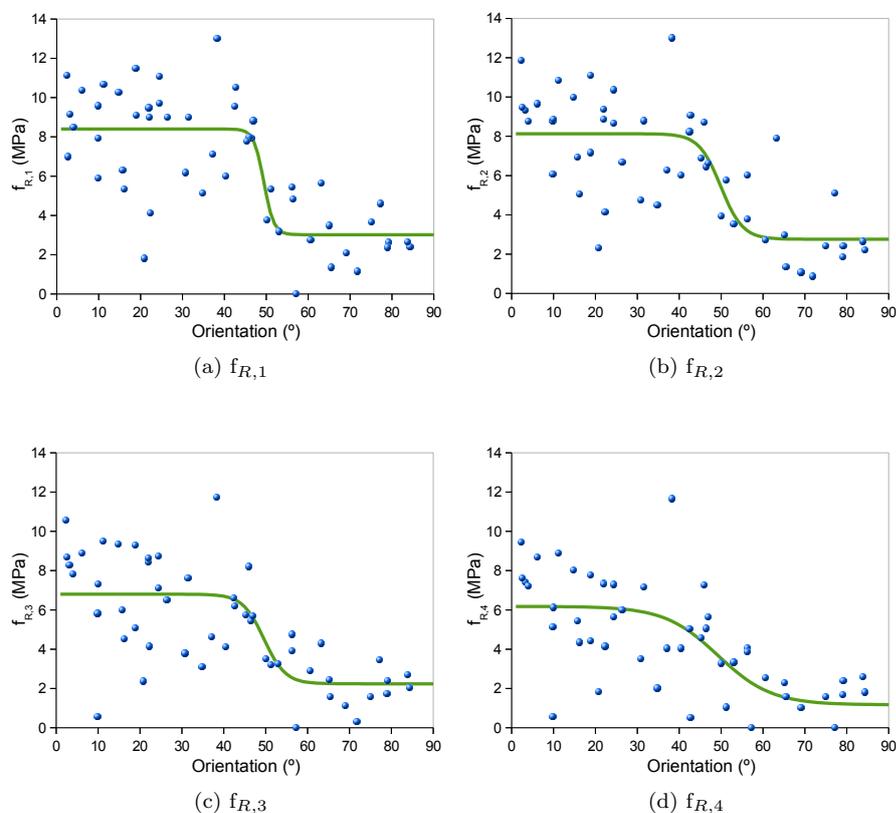


Figura 7.14: Predicción de las resistencias residuales basada en las orientaciones previstas.

mínimos cuadrados, con el fin de obtener una aproximación lo más exacta posible. El significado físico de los parámetros adoptados en la función, muestra información de los aspectos más relevantes del comportamiento mecánico del material. Así, A_b y A_t corresponden con las respectivas asíntotas de la función que limitan los valores mínimos y máximos a alcanzar. Se debe hacer constar que en esta aproximación conservadora, se han despreciado los ligeros incrementos para pequeñas inclinaciones. Los valores x_0 y w acotan la posición del punto de inflexión y el ancho de la zona de transición donde se invierte la tendencia de crecimiento exponencial a desaceleración, cambiando la curvatura de la función. Dos comportamientos quedan claramente diferenciados por la frontera imaginaria delimitada por la zona de transición. Orientaciones menores a los 50° , muestran un adecuado nivel de resistencias residuales, mientras que aquellos cuyas fibras se encuentran marcadamente desalineadas respecto a los esfuerzos de tracción presentan valores menores. El cambio es más abrupto para resistencias residuales iniciales, puesto que la capacidad portante de fibras muy inclinadas resulta efectiva a grandes aperturas de fisura. La Tabla 7.2 resume los datos de partida necesarios para adoptar la función en cada caso.

Partiendo de las resistencias residuales obtenidas es factible continuar con

| Parámetro | A_b | A_t | x_0 | w |
|-----------|-------|-------|-------|------|
| $f_{R,1}$ | 3.02 | 8.40 | 49.42 | 1.19 |
| $f_{R,2}$ | 2.76 | 8.13 | 49.02 | 2.61 |
| $f_{R,3}$ | 2.24 | 6.80 | 49.59 | 2.55 |
| $f_{R,4}$ | 1.17 | 6.18 | 49.28 | 6.37 |

Tabla 7.2: Parámetros de partida para las funciones sigmoides.

el procedimiento indicado en la EHE-08 a fin de obtener la ley constitutiva del material y cotejarla con los resultados de los modelos estructurales. De esta manera y de forma previa a la ejecución y hormigonado del elemento se posibilita contrastar el margen de seguridad frente a las acciones del que se dispone. Como ya se ha mencionado, es más apropiado realizar el análisis en el conjunto del elemento. Si la normativa aplicable calcula las resistencias residuales de manera diferente a lo establecido en la EHE-08, el procedimiento sería similar para obtener la mencionada correlación de valores.

7.4. Predicción de la ley constitutiva del material

En este apartado se plantea la posibilidad de predecir incluso la ley constitutiva del material sin haber hormigonado ni testado, de manera destructiva o no, la estructura ejecutada o parte de ella. Es decir, partiendo únicamente de las simulaciones realizadas sobre modelos computacionales resulta factible aproximar la respuesta mecánica del material en cualquier punto de la estructura. La forma de representar la curva $\sigma - \epsilon$ del material replica en gran parte el procedimiento empleado para la predicción en base a los valores de variación de inductancia obtenidos mediante los métodos magnéticos no destructivos (Apartado 6.6.3.3). A diferencia de la situación expuesta en dicho apartado, en este caso los únicos datos que se obtienen de la simulación se corresponden con la orientación de las fibras a lo largo del elemento. Aceptando que la adición de fibras no ejerce una definida influencia en la resistencia a tracción del material, la resistencia correspondiente al Límite de Proporcionalidad se obtendrá de acuerdo a la Ecuación (7.8).

$$f_{ct,L}^f = 0,21 \cdot \sqrt{f_{ck}^2} \quad (7.8)$$

En cuanto a la primera parte del diagrama, se opta por emplear el valor característico de la resistencia a tracción. De esta manera, se considera un valor menor (cuantil 5%) de la resistencia para controlar de manera más fehaciente la aparición de fisuras en las zonas con un comportamiento más frágil en el depósito de contención. Para zonas mejor reforzadas de la zona baja del muro sin embargo, se aprecia que emplear la resistencia a tracción media aporta resultados más ajustados. La otra salvedad, en este aspecto, radica en que no se aplica ningún valor de reducción de la resistencia, a excepción del coeficiente parcial de seguridad habitual para transformar los valores característicos en valores de diseño.

Para modelizar el comportamiento post-fisuración del material, es necesario disponer de un patrón de calibración que aporte los valores de resistencia correspondientes a $f_{R,1}$ para cualquier orientación de igual manera que se ha

realizado en la Figura 7.14a. Dicha relación se obtiene de los parámetros mostrados en la Tabla 7.2 en base al mayor y menor valor que se puede alcanzar para dicho material. Es de recalcar, que diferentes tipos de fibras embebidos en matrices de diversa resistencia aportarán valores diferentes. La tarea de crear patrones de calibración es tediosa puesto que existen multitud de combinaciones fibra/matriz. Además de la dispersión mencionada para el ensayo de flexotracción que sirve como punto de partida para la obtención de dichos valores, el modelo de simulación planteado considera que cualquier punto presenta un refuerzo idéntico, lo cual, independientemente de una posible segregación, no es realmente posible.

Como ejemplo se muestran las Figuras 7.15a a 7.15d, en las que se representan el diagrama multilineal predicado por la Instrucción EHE-08, junto con la aproximación exponencial descrita en base a parámetros obtenidos de la simulaciones computacionales y patrones de calibración.

Aún cuando en la mayoría de los casos se subestime la resistencia a tracción del material, el procedimiento resulta adecuado para predecir el comportamiento del material o detectar posibles puntos débiles en la estructura. Existen probetas de la zona superior donde se sobrevalora el comportamiento post-fisuración, pero el origen de dicha discrepancia radica en un error de ejecución, debido al exceso de agua de cebado y la consiguiente segregación de fibras ocurrida en la parte superior del muro, y no en la incorrecta estimación del límite asintótico inferior.

7.5. Consideraciones finales

La técnica de dinámica de fluidos computacional se muestra como uno de los campos de actuación más interesantes, en cuanto a la predicción de la orientación se refiere, para la implementación del refuerzo mediante fibras en el hormigón. Los estudios multifase mediante el método VOF permiten discernir el comportamiento del hormigón a medida que llena el encofrado. Para observar el desplazamiento relativo de las fibras introducidas en la masa, se considera imprescindible emplear partículas lagrangianas o procedimientos similares. Estas partículas simulan a las propias fibras, de manera que se les puedan asignar las características de las fibras (longitud, densidad, etc.) y analizar su rotación dentro del fluido que simula al hormigón.

La limitación del modelo Bingham expuesta, requiere estudios más concisos en torno al empleo de otros modelos (Herschel-Bulkley, Bingham modificado, etc.), que resultando válidos para todo el espectro de autocompactabilidad, presenten valores acordes a los ensayos empíricos. Resulta interesante establecer diferentes correlaciones entre el rango de los parámetros a introducir en el programa de resolución de ecuaciones de Navier-Stokes Gerris, respecto a otros aparatos disponibles en el mercado como, por ejemplo, el BTRHEOM.

De manera simplificada, sin embargo, es posible determinar la orientación de las fibras en base al campo de velocidades generado durante el proceso de hormigonado. Esto resulta posible cuando el refuerzo de fibras se realiza en un hormigón autocompactante. El realizar un elemento de gran envergadura en lugar de una probeta de laboratorio de escala reducida, imposibilita realizar conjeturas sobre la orientación final adoptada, lo que otorga más valor a los correctos resultados obtenidos. Se ha contrastado, que dichas orientaciones

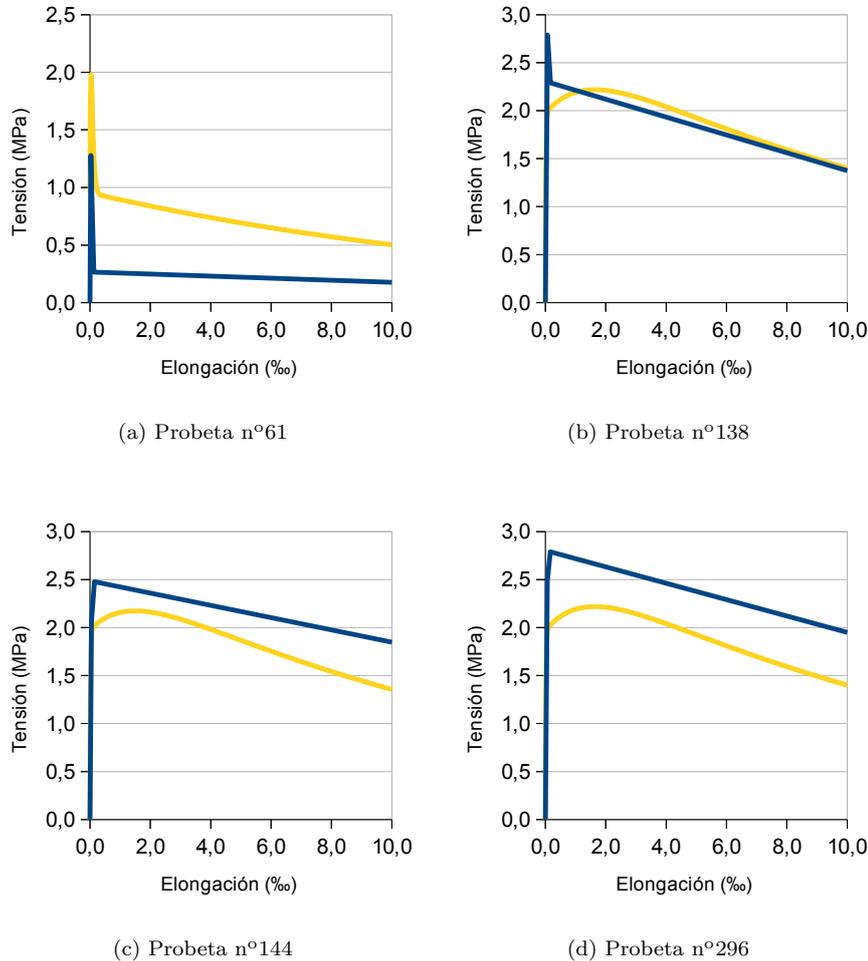
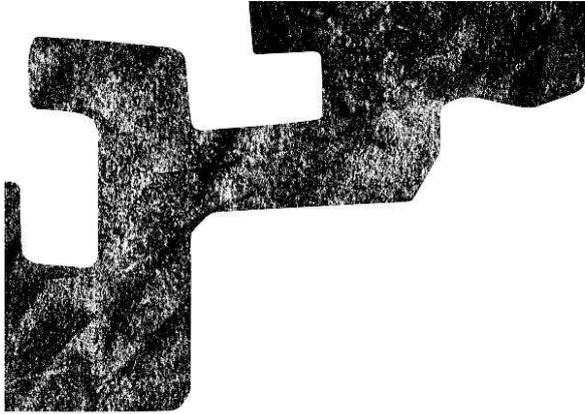


Figura 7.15: Diagrama multilínea (en azul) y aproximación exponencial (en amarillo).

se aproximan adecuadamente a las determinadas mediante los ensayos magnéticos, cuya idoneidad ya ha sido demostrada a lo largo del presente estudio. Dado que la respuesta mecánica del material difiere en gran medida en función de la orientación que adoptan las fibras, es posible discernir comportamientos incorrectos en zonas concretas de elemento estructural. En caso de hormigones convencionales, la orientación viene provocada o alterada por elementos de vibración, externos o internos a la masa, que no son simulables, de manera directa, mediante los métodos CFD.

Partiendo de las orientaciones previstas mediante la simulación, parece posible realizar una aproximación, que permita determinar el comportamiento mecánico del material en cada ubicación. Aunque existan discrepancias de resultados en varias zonas, a nivel global el resultado puede calificarse como satisfactorio, si bien, debería realizarse un estudio más detallado para determi-

nar las causas de dichas diferencias, sean éstas zonas de flujo turbulento, como la salida de la manguera de bombeo, etc. Este procedimiento redundará en un gran ahorro económico, puesto que permite reconocer geometrías o procedimientos de puesta en obra incorrectos de manera previa a la ejecución material del elemento estructural.



PARTE VI

Aplicación a casos prácticos

CAPÍTULO 8

Depósitos circulares de contención

8.1. Introducción

Durante la redacción del estudio reflejado en la presente Tesis Doctoral, se ha hecho hincapié en la búsqueda de aplicaciones industriales, que puedan ser apropiadas para el empleo del hormigón autocompactante reforzado con fibras de acero aquí expuesto. En este apartado, se realizará una breve reseña de depósitos de contención circulares localizados geográficamente cerca del epicentro de esta investigación, para la consideración también de aspectos sostenibles.

Se comentarán sus características geométricas y mecánicas y se contrastarán con alternativas ejecutadas mediante el HACRFA desde el punto de vista económico, social y medioambiental, de acuerdo al mayor o menor grado de sostenibilidad que presentan.

Desde el punto de vista económico, la solución resulta interesante en comparación con las habituales estructuras de hormigón armado con armaduras pasivas a base de barras corrugadas. El ahorro se puede contemplar en el conjunto de la ejecución de la estructura, compensando ligeros incrementos de los materiales con una disminución del plazo y la mano de obra, así como una más adecuada puesta en obra para secciones reducidas. Parte de esos factores se ven reflejados de manera cualitativa en la Tabla 8.1.

El refuerzo mediante fibras permite un mejor control de la fisuración con lo que resulta posible disminuir la cuantía geométrica mínima exigida en la normativa. El ligero sobrecoste de las fibras queda, por tanto, compensado de esta manera. Además, se evita la necesidad de dotar de una geometría curva a la armadura al mismo tiempo que se ahorra el tiempo y la mano de obra de su colocación.

Las ventajas aportadas por la elevada fluidez del hormigón autocompactante conllevan, por un lado, un mayor empleo de cemento y, por otro, la necesidad del empleo de aditivos superplastificantes de última generación, que lo encarecen. Sin embargo, la clase de ambiente general y específica establecida para el hormigón en depósitos de contención cilíndricos expuestos a ambientes agre-

| Factor | Incremento de coste | Decremento de coste |
|---|---------------------|--|
| Materiales Componentes | Moderado (10-15%) | |
| Fabricación (tiempo mezcla) | Bajo | |
| Encofrado | Bajo | |
| Control de calidad | Alto (al principio) | |
| Asistencia técnica e I+D | Alto (al principio) | |
| Mano de Obra | | Alto ($\approx 1/2$) |
| Equipos auxiliares y maquinaria | | Moderado |
| Plazo de ejecución | | Alto ($\approx 1/3$) |
| Calidad de acabado y errores de ejecución | | Moderado/alto * |
| Reducción del ruido | | Moderado/alto ^{*,\diamond} |
| Seguridad y salud laboral | | Moderado |
| Flexibilidad en el diseño | | Moderado/alto * |

* Dependiendo de la aplicación
 \diamond Permite también trabajo nocturno

Tabla 8.1: Influencia relativa de diversos factores en el coste del HAC [Garrido (2004)].

sivos requiere un incremento del contenido de cemento mínimo, así como una reducción de la relación agua/cemento.

8.2. Ejemplos de la aplicación

Las peculiaridades demostradas en la presente investigación, en relación con la orientación de las fibras en función de la geometría del elemento a hormigonar y su puesta en obra, reducen evidentemente las aplicaciones que resultan aptas para ejecutarse mediante el HACRFA. Es decir, una orientación muy forzada en uno de los ejes, resulta adecuada cuando dicha dirección presenta esfuerzos superiores al resto. En caso contrario, pueden surgir limitaciones en cuanto al comportamiento del material se refiere. No cabe duda, aún así, que el material estudiado presenta aptitudes interesantes, que también pueden combinarse con estructuras de hormigón reforzadas con armadura convencional, estableciendo claro está, un control más férreo en cuanto al posible bloqueo que se puede originar entre las barras corrugadas y las fibras. En esta Tesis Doctoral, no se ha incidido en especial en el riesgo de bloqueo de las fibras, puesto que la aplicación se propone única y exclusivamente reforzando el hormigón con fibras de acero.

En la Figura 8.1 se muestra la localización de diversos depósitos ubicados en las cercanías de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Bilbao. Todos ellos corresponden a las instalaciones de abastecimiento de aguas del Consorcio de Aguas Bilbao-Bizkaia, responsable de suministrar agua potable a gran parte de los municipios del entorno.

Se trata de depósitos de contención cilíndricos situados de manera aislada o conjunta y sobre rasante, con otras estructuras pertenecientes al sistema de abastecimiento en la Estación de Tratamiento de Agua Potable de Venta Alta.

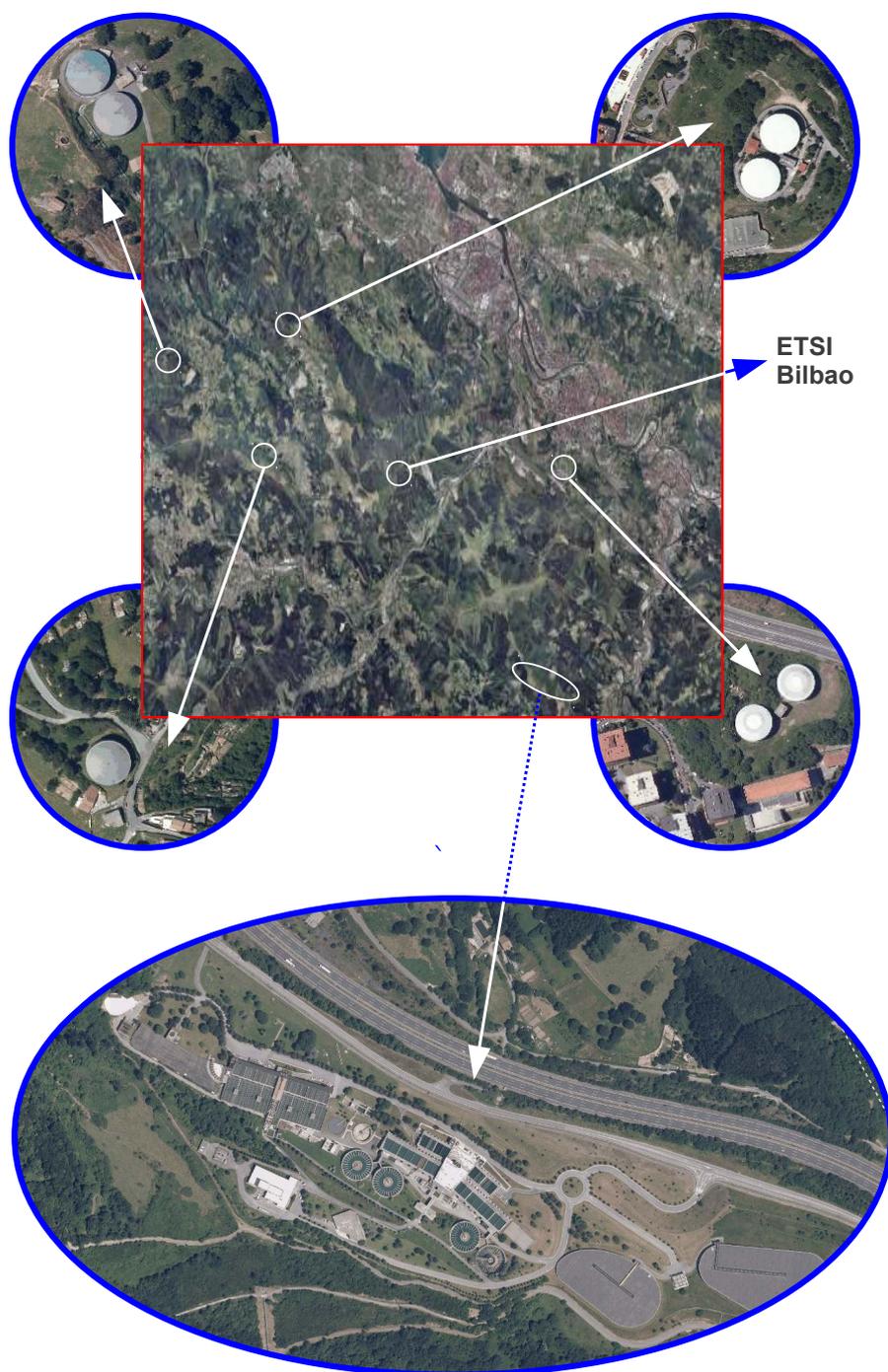


Figura 8.1: Ubicación de diversos depósitos de contención cilíndricos en las cercanías de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Bilbao.

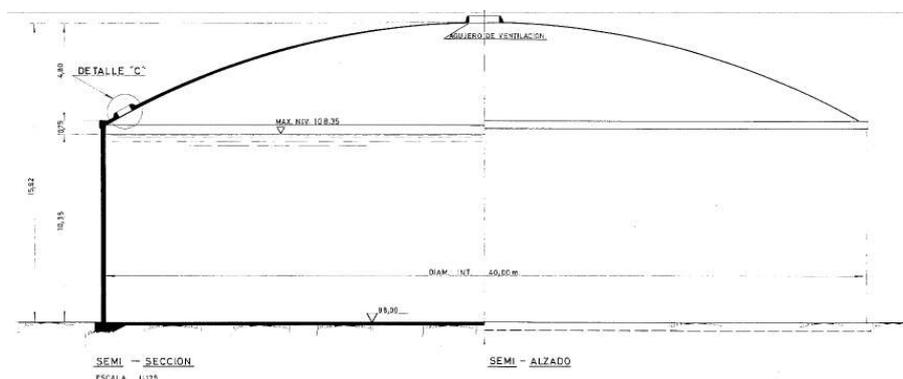


Figura 8.2: Sección geométrica de una estructura tipo.

8.2.1. Dimensiones, armados y materiales

Las estructuras ubicadas de forma aislada rondan los 30 y 40 metros de diámetro, con una altura media de 10 metros aproximadamente. En la E.T.A.P de Venta Alta se dispone de mayor número de depósitos que cumplen diversas funciones dentro del sistema de abastecimiento como pueden ser un espesador de fangos (23 m de diámetro entre caras interiores), un depósito tampón (con 6 metros libres de diámetro) o los decantadores (de 39 metros de diámetro interior).

La figura 8.2 muestra la sección de un depósito de 40 metros, que debe contener una altura de agua ligeramente superior a los 10 metros. Para ello, se dispone de unos muros de 0.22 metros de espesor y unos armados según se muestran en la Figura 8.3.

Por otro lado, los depósitos tampón presentan dimensiones más reducidas mostrados en la Figura 8.5 y en su diseño se estableció un armado de acuerdo a la Figura 8.6.

Los depósitos reguladores ubicados de manera repartida por la geografía, disponen de una losa abovedada de hormigón armado como cubierta debido a aspectos relacionados con la salubridad. Estas cubiertas y las losas inferiores pueden ejecutarse mediante HRFA sin mayores dificultades, puesto que es un material más extendido hoy en día y existen referencias suficientes de su aplicación [Serna et al (2009)] [Maturana (2013)]. De acuerdo a la Figura 8.4, las uniones entre estos elementos y los muros pueden realizarse a modo de apoyo simple, sin necesidad de disponer armaduras, que garanticen la rigidez de la unión. Dado que su geometría es más regular, el depósito circular presenta un comportamiento frente a las cargas actuantes más favorable, pudiendo reducir su espesor en comparación con depósitos de contención rectangulares. Se reafirma, por tanto, la posibilidad de ejecutar tales estructuras en ausencia de barras corrugadas como refuerzo del hormigón. Esta diferencia respecto a otro tipo de muros empotrados en su base, repercute en una reducción del máximo valor absoluto del esfuerzo flector y el cortante, en detrimento de un ligero incremento del esfuerzo de tracción perimetral. Estas diferencias en los esfuerzos pueden apreciarse de manera muy clara en la Figura 8.7. La comparativa a realizar se centra, por tanto, en la ejecución del fuste del depósito mediante el HACRFA.

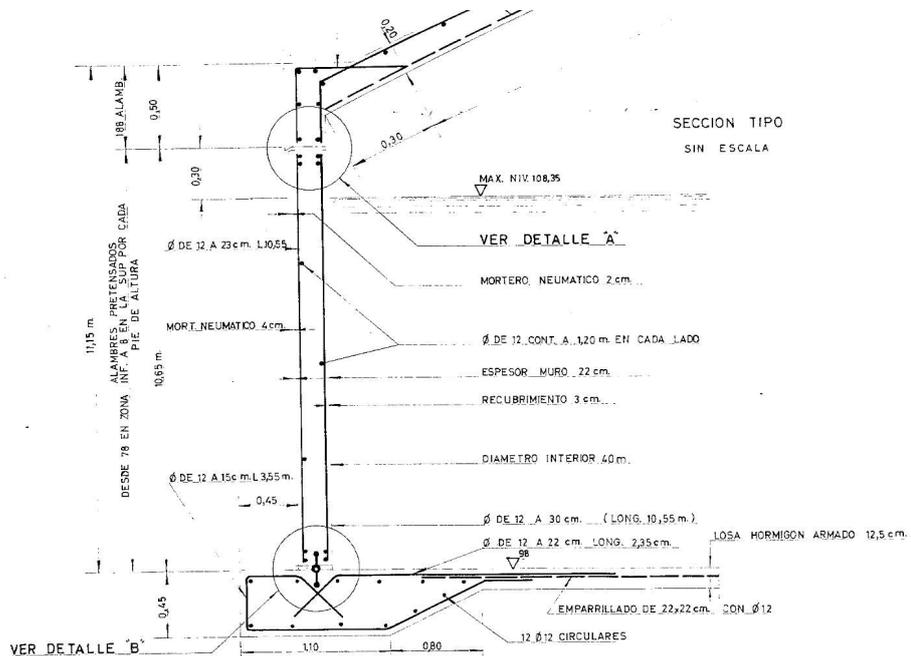


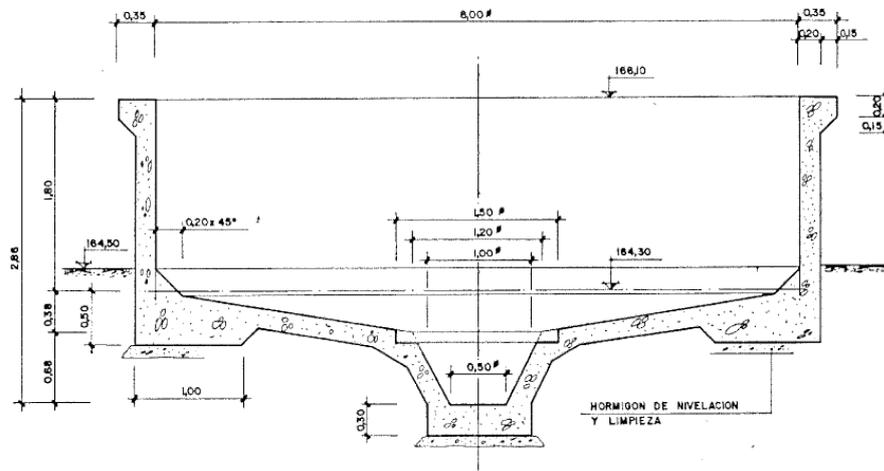
Figura 8.3: Armado de estructura tipo.



Figura 8.4: Detalles específicos de uniones y apoyos articulados.

El pretensado dispuesto en varias de estas estructuras, tiene como fin generar una compresión en el hormigón que reduzca cualquier posibilidad de filtración a través del propio material. Si no cabe duda, que las juntas deben ser correctamente impermeabilizadas, la puesta en obra del HACRFA requiere una adecuada atención y un suficiente curado, para aprovechar la elevada compacidad que puede proporcionar el hormigón autocompactante y el control de la fisuración gracias al continuo refuerzo de fibras.

En este aspecto se puede mencionar un interesante estudio realizado por [Riba (2005)], donde se concluye que los depósitos rectangulares solo pueden competir con los cilíndricos en capacidades reducidas. Así mismo, los depósitos circulares armados resultan interesantes para todo el rango de capacidades, sobre todo sin cubierta en el caso de grandes volúmenes ($>10.000 \text{ m}^3$). En esta situación, resulta interesante reducir el coste proporcional de la cubierta, ge-



SECCION A-A

ESC. 1:20

Figura 8.5: Definición geométrica del depósito tampón.

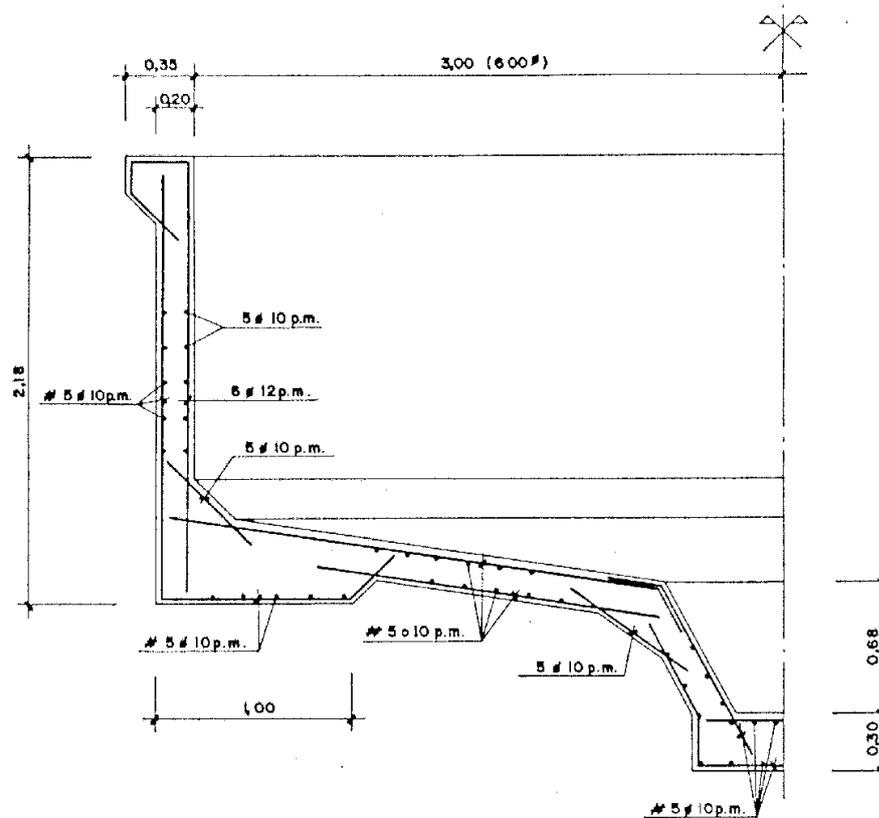


Figura 8.6: Armado requerido en la construcción del depósito tampón.

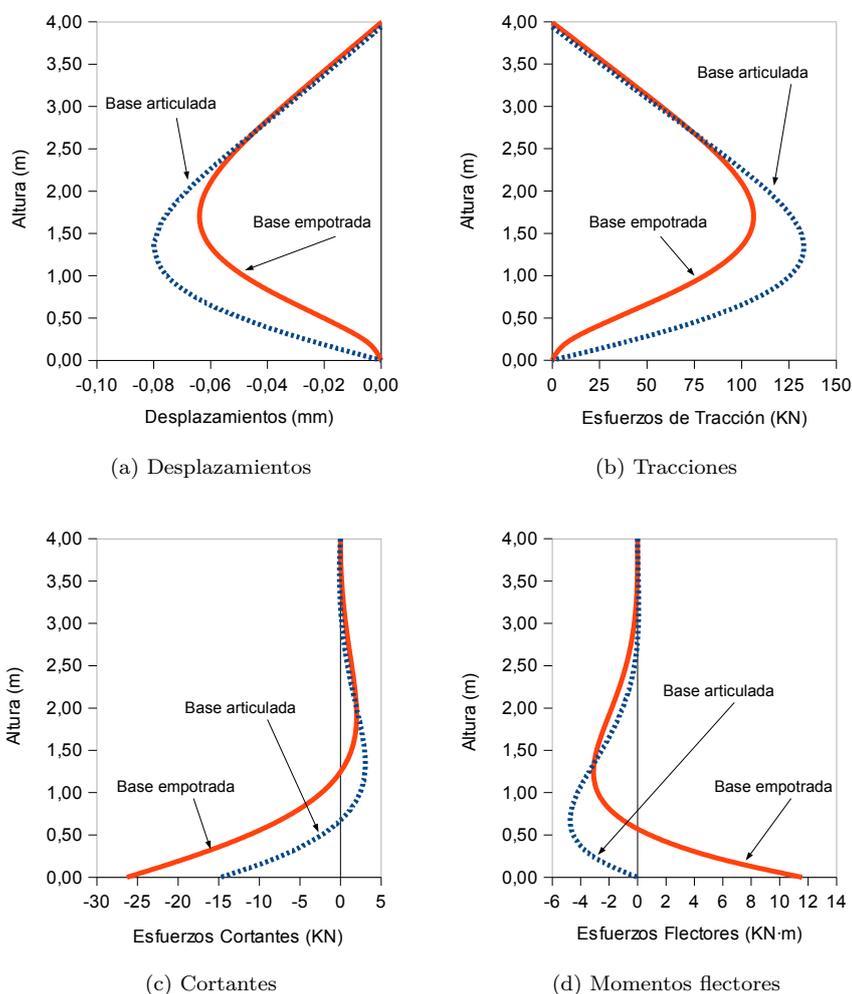


Figura 8.7: Diferencia de desplazamientos y esfuerzos en depósitos de base empotrada y articulada.

nerando el mismo volumen mediante un depósito de menor diámetro y mayor altura, lo que permite una mayor ventaja de los depósitos circulares pretensados. Por ello, la aplicación especificada en los siguientes apartados, se referirá a un depósito de un rango de volumen moderado.

8.3. Caso de estudio

Para establecer una comparativa cuantitativa desde el punto de vista económico, es necesario disponer de una estructura tipo que analizar y diseñar como si de un hormigón convencional o un HACRFA se tratara. De acuerdo a las estructuras mencionadas en el Apartado 8.2.1 se adopta como caso de estudio el de un depósito cilíndrico con base articulada de 10 metros de diámetro, 4 metros de altura y 0.25 metros de espesor.

Para contener un líquido potencialmente agresivo para el hormigón y la armadura, con densidad de 10 KN/m^3 , los esfuerzos originados en el fuste del muro se determinan por medio de la teoría de placas, en base a la resolución de la Ecuación (8.1) planteada por [Timoshenko and Woinosky-Krieger (1959)]. En dicha ecuación, x determina la altura de la sección que presenta un desplazamiento en dirección radial igual a δ en razón a una presión Z^* , ejercida sobre la cara interior de un depósito de radio R y espesor e , construido con una material cuyo módulo de deformación longitudinal es E .

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(D \frac{\partial^2 \delta}{\partial x^2} \right) + \frac{E \cdot e}{R^2} \cdot \delta = Z^* \quad (8.1)$$

En su forma simplificada para espesores de muro constante, la expresión se desarrolla obteniendo la Ecuación (8.2a). Las variables ya mencionadas se agrupan bajo las constantes λ y D , de acuerdo a las Ecuaciones (8.2b) y (8.2c) y que representan el coeficiente cilíndrico de forma y la rigidez a flexión de la lámina, respectivamente. Se introduce una nueva variable, que se corresponde con el coeficiente de Poisson del material.

$$\frac{\partial^4 \delta(x)}{\partial x^4} + 4\beta^4 \delta(x) = \frac{Z^*(x)}{D} \quad (8.2a)$$

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{E \cdot e}{4 \cdot R^2 \cdot D}} = \sqrt[4]{\frac{3 \cdot (1 - \nu^2)}{R^2 \cdot e^2}} \quad (8.2b)$$

$$D = \frac{E \cdot e^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)} \quad (8.2c)$$

La solución genérica para la Ecuación (8.2a) se plantea de la forma mostrada en la Ecuación (8.3), donde los parámetros A, B, C y D son constantes de integración dependientes de las condiciones de contorno. El último término se corresponde con una solución particular.

$$\begin{aligned} \delta(x) = & C_1 \cdot e^{\beta x} \cdot \cos(\beta x) + C_2 \cdot e^{\beta x} \cdot \sin(\beta x) + C_3 \cdot e^{-\beta x} \cdot \cos(\beta x) \\ & + C_4 \cdot e^{-\beta x} \cdot \sin(\beta x) - \frac{\rho \cdot (H - x) \cdot R^2}{E \cdot e} \end{aligned} \quad (8.3)$$

Aplicando las condiciones de contorno acordes a un apoyo articulado en la base y el extremo superior libre (desplazamientos y momentos nulos en la base, así como esfuerzos flectores y cortantes nulos en la coronación del mismo) resulta posible obtener la ley de desplazamientos en el fuste del muro. A partir de la misma, se calculan los esfuerzos de tracción y mediante sucesivas derivaciones los giros, las leyes de momentos flectores y los esfuerzos cortantes en cada sección. Los esfuerzos principales en las secciones más sometidas se muestran en la Tabla 8.2. De forma coherente a las condiciones externas impuestas, la base presenta un desplazamiento y flector nulo, mientras que el valor de los esfuerzos tangenciales es máximo. Por otro lado, a un tercio de la altura se alcanza el valor de tracción máximo, mientras que, ligeramente por debajo el momento flector, alcanza su valor más alto.

El procedimiento tradicional de cálculo [Arroyo et al (2009)], se basa fundamentalmente en el armado de barras corrugadas necesario para controlar la

| Altura (m) | Desplazamiento (mm) | Tracción (KN) | Cortante (KN) | Flector (KN · m) |
|---------------|------------------------|------------------|------------------|---------------------|
| 0 | 0 | 0 | -14.72 | 0 |
| 0.71 | 0.06 | 105.36 | 0.39 | -4.74 |
| 1.33 | 0.08 | 132.78 | 3.05 | -3.12 |

Tabla 8.2: Esfuerzos máximos.

fisuración. En cuanto a la armadura vertical, se tiende a comprobar mediante el denominado módulo de fisuración (k), cual es la cuantía mínima para mantener la abertura de fisura bajo valores reducidos. Por contra, la armadura horizontal se determina a partir del esfuerzo de tracción perimetral, reduciendo la tensión admisible del acero a 100 MPa. Esto conlleva un desperdicio de acero, sobre todo cuando lo habitual es emplear calidades superiores, con límite elásticos de 400 y 500 MPa (tendiendo más al segundo tipo de acero). Para garantizar la seguridad estructural, se plantea necesario disponer un armado convencional de ϕ 12 cada 0.20 m en dirección vertical y horizontal para el trasdós y el intradós del muro en el caso de hormigón convencional. Esta disposición de armado equivale a una cuantía de 70 kg/m³.

En cuanto al refuerzo de fibras respecta, se determina si la resistencia residual a tracción de cálculo ($f_{ctR,d}$) supera la tensión originada por el contenido. Siendo la tracción el esfuerzo principal y su valor máximo a un tercio de la altura del muro, se origina en la sección más solicitada una tensión normal en servicio, ligeramente superior a 0.50 MPa. Analizando la Tabla 6.7 y aplicando de manera simplificada el modelo rectangular promulgado en la [EHE-08 (2008)], partiendo de la resistencia residual a flexotracción ($f_{R,3}$), se observa que la mayoría de las probetas (sobre todo las localizadas a un tercio de la altura desde la base) superan la tensión de diseño calculada en base a la Tabla 8.2. Para el HACRFA, por tanto, parece razonable pensar, que una densidad de 50 KN/m³ puede ser suficiente para absorber los esfuerzos de tracción mencionados, en vista de los resultados del Apartado 6.6.3.

Desde el punto de vista del hormigón, la clase de exposición específica habitual en este tipo de estructuras (Q_a , Q_b o Q_c), exige un contenido mínimo de cemento entre 325 y 350 kg/m³. La estructura convencional se realizará con dicho mínimo contenido mientras que en el caso del HACRFA se han requerido 433 kg/m³. Es decir, para ambientes agresivos, donde por motivos de durabilidad se exige un elevado contenido mínimo de cemento y una reducida relación agua/cemento, las dosificaciones de los hormigones convencionales se acercan en cierta medida a los HAC, cuyas cuantías en los componentes son ya elevadas con objeto de proporcionar propiedades autocompactantes a la masa.

En cuanto a los áridos, el HACRFA requiere emplear un tamaño máximo de árido menor, hasta 11 mm, lo que en comparación con un tamaño máximo de 25 mm en el hormigón convencional, repercute en el coste del material. Así mismo, el incremento de aditivos a usar es junto con el cemento, la parte que influye, en mayor medida, en el precio del hormigón. La Tabla 8.3 muestra las dosificaciones empleadas para el hormigón convencional y el HACRFA.

| Componente | | Hormigón convencional | HACRFA |
|--------------------|-------------------|-----------------------|--------|
| Cemento | kg/m ³ | 350 | 430 |
| Arena 0/4 | kg/m ³ | 814 | 1100 |
| Grava 4/11 | kg/m ³ | 298 | 650 |
| Grava 11/22 | kg/m ³ | 764 | — |
| Agua | l/m ³ | 156 | 175 |
| Fibras HE 1/50 | kg/m ³ | — | 50 |
| Polifuncional | l/m ³ | 4.20 | 4.48 |
| Superplastificante | l/m ³ | — | 5.03 |

Tabla 8.3: Dosificaciones comparadas.

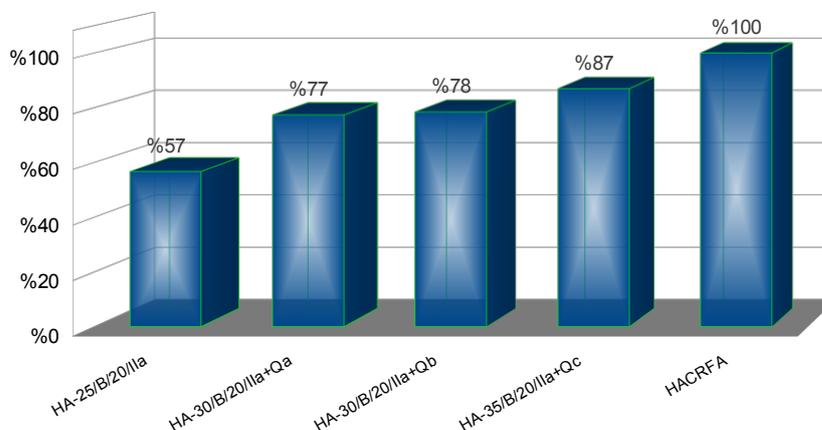


Figura 8.8: Precios de hormigones con diferentes exigencias de contenidos mínimos de cemento en base a diversas exposiciones genéricas y específicas.

8.3.1. Coste del producto

Desde el punto de vista del hormigón, es obvio que el HAC es más caro que un hormigón convencional. Sin embargo, en aplicaciones con clases de exposición específicas que requieran altos contenidos en cemento y bajas relaciones a/c, la diferencia se reduce notablemente. En vista de los materiales empleados y su coste en el mercado, este incremento ronda el 13%, siendo más abultado si el hormigón de referencia no presenta requerimientos tan estrictos respecto al contenido mínimo en cemento y la relación agua/cemento como ocurre en el presente caso (Figura 8.8). Los precios mostrados en el presente apartado, se corresponden con los dispuestos en las diversas bases de datos de precios de la construcción, puestos a disposición por la administración u otros organismos públicos o privados y empleados habitualmente por las empresas de ingeniería del entorno.

La Figura 8.9 muestra una comparativa del coste proporcional de los componentes de un hormigón convencional y el HACRFA para la aplicación propuesta. Tal y como se aprecia, la necesidad de emplear aditivos superplastificantes que

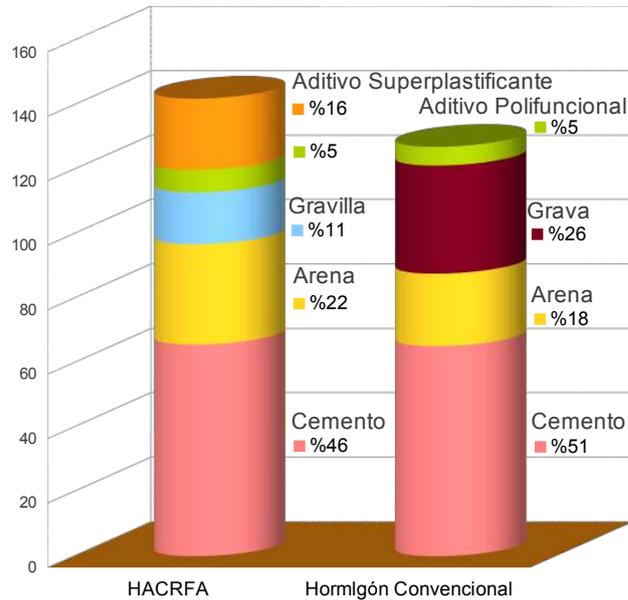


Figura 8.9: Diferencias en el coste porcentual de los componentes del hormigón con el mismo grado de exposición ambiental.

doten de mayor fluidez a la masa, altera la distribución adquiriendo mayor repercusión en el coste final. De la misma manera, la modificación del esqueleto granular, aumentando el contenido de arena, en detrimento del volumen de agregado grueso, modifica dicho reparto. Aún cuando se incrementa el uso de agregados con mayor grado de machaqueo, como son la arena y la gravilla, es interesante su utilización por su potencial aporte de finos, aunque origine un aumento del coste de esas materias primas. Proporcionalmente su contribución no es tan acusada por la irrupción de los aditivos cuyo coste es netamente superior a los de éstos. Si bien es cierto que el precio es superior a uno convencional, las diferencias se reducen notablemente en cuanto las dosificaciones de los hormigones convencionales se deben acomodar a ambientes muy agresivos.

Se debe destacar, que la diferencia de coste debido a las propiedades autocompactantes aportadas al hormigón, surge también de la repercusión que origina un cambio en los procedimientos establecidos en la planta de fabricación. Ello deriva en la necesidad de formar a los operarios e invertir en equipos, para el control de la humedad de las materias primas por ejemplo, de manera que se posibilite la fabricación optimizada de un hormigón más exigente.

En cuanto al refuerzo de acero, el precio de la fibra supera en un 18% al de la armadura corrugada, pero como se ha probado en este estudio, su cuantía se puede ver reducida, con lo que la diferencia se diluye en parte. Una visión más general del proceso constructivo sin embargo, pone de manifiesto que en ciertas situaciones resulta altamente competitivo, como es el caso propuesto. Además del propio coste del acero de las barras, la opción de las fibras elimina por completo las labores de montaje de la ferralla, obteniendo reducciones de

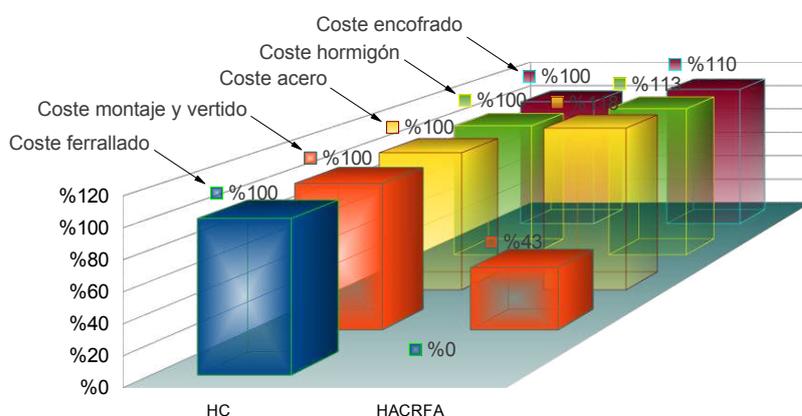


Figura 8.10: Diferencias porcentuales de los costes de la mano de obra y los materiales.

coste y plazo según se muestra en la Figura 8.10. El resto de mano de obra también se ve altamente reducido puesto que la operación de vertido se simplifica notablemente, realizándose de manera continua, sin necesidad de rellenar constantemente cubilotes, hormigonar por tongadas ni vibrar las mismas. En caso de comparar dos tipos de hormigones bombeados, la diferencia del coste de la mano de obra se reduciría aproximadamente un 15 %.

Además del coste de los materiales y la mano de obra, es posible analizar la influencia del nuevo material en los medios auxiliares necesarios para su ejecución. En cuanto respecta al encofrado, la mayor fluidez de los HAC origina un aumento del empuje, que éste ejerce sobre los encofrados. Habitualmente se equipara dicho empuje con una presión hidrostática ejercida por un líquido de densidad igual al del hormigón. Realmente, esto no es del todo cierto, habiéndose constatado casos con presiones muy por debajo, en función de la velocidad de vertido y el punto de vertido (parte inferior o superior) [Bramshuber and Uebachs (2003)], la rugosidad del encofrado [Arslan et al (2005)] [Tchamba et al (2008)] [Kwon et al (2011)], el desencofrante empleado [Djelal et al (2002)], temperatura [Assaad and Khayat (2006)], la armadura convencional [Perrot et al (2009)], los finos empleados [Kim et al (2012)], etc. En alturas reducidas (<3 metros), los sistemas convencionales de encofrado son capaces de contener dicho incremento del empuje. No obstante, en cuanto a depósitos circulares se refiere, es habitual emplear alturas superiores con lo cual, se deben emplear sistemas acordes a esfuerzos de mayor envergadura.

Dado que la dosificación será la necesaria para diseñar un hormigón con las propiedades requeridas (en estado fresco o endurecido), no se contempla reducir la presión ejercida en los encofrados por esa vía. Al mismo tiempo, la ausencia de armadura corrugada tampoco permite considerar dicha variable y el aumento de temperatura reduce las presiones, aunque parece jugar un papel más importante a lo largo del tiempo, que en los instantes iniciales [Assaad and Khayat (2006)].

La disposición de vertido junto con su velocidad y las características del propio encofrado parecen ser las variables que, en mayor medida, interesa modificar. La velocidad de vertido es fácil de modificar, mientras que la posición de vertido se recomienda que sea desde la parte inferior (mediante encofrado especiales o introduciendo la manguera de bombeo hasta el fondo). Ello induce a una reducción del aire que se puede ver atrapado dentro de la masa, aunque también esta constatado que aumenta la presión sobre los encofrados.

Dado que tampoco interesa emplear encofrados con elevada rugosidad, que aún reduciendo la presión ejercida sobre los encofrados, conlleva empeorar el buen acabado que puede proporcionar el HAC, se plantea emplear otra opción alternativa. Los Encofrados de Permeabilidad Controlada (CPF, en su siglas en inglés) consisten en disponer textiles sobre los encofrados habituales [Arslan (2002)], permitiendo drenar el exceso de agua y la salida de las burbujas de aire. Ya que mantienen las partículas de la pasta cementicias en la superficie reduciendo la relación agua/pasta, mejoran la durabilidad del elemento al aumentar su compacidad [Coutinho (2003)]. El filtro aporta la suficiente humedad a la pasta para garantizar su correcta hidratación. Al mismo tiempo, los CPF también reducen la presión que el hormigón ejerce sobre los encofrados [Coutinho (1998)].

Existen diversos tipos de CPF de acuerdo a [Price (2000)], entre los que se pueden mencionar los de tipo II, que consisten en una única capa que se deben tensar en la obra y los de tipo III, conformados por dos capas sobre una malla, pretensada durante su fabricación. El primer tipo es de un solo uso y su coste asciende a 5 €/m², mientras que el segundo, aún siendo más caro (10 €/m²) es posible usarlo hasta dos veces [Figueiras et al (2009)], de esta manera su coste relativo se ve reducido. De manera adicional, se origina un ahorro en el uso de desencofrantes, debido a que esta nueva solución no requiere de ellos. e incluso, se reduce la necesidad de reparar posibles coqueas, gracias a la mejora de su acabado superficial.

El planteamiento propuesto, por tanto, consiste en revertir el incremento del coste del encofrado, en una mejora de la calidad del acabado del material. Emplear encofrados más robustos para soportar el mayor empuje del hormigón, no añade ningún valor al elemento. Sin embargo, destinar parte de ese incremento al empleo de CPFs, permite seguir en cierta medida empleando encofrados comunes, debido a la reducción de presión que proporcionan, al tiempo que mejoran el acabado y, por ende, la durabilidad del material. Esta mejora de ciertos parámetros relativos a la durabilidad, se estima entre un 40 y un 50 % [Figueiras et al (2009)]. Futuros estudios o prototipos de la aplicación propuesta, pueden incluir dichos textiles en su diseño.

Esta opción, no obstante, quedará supeditada a futuros estudios en profundidad que aseguren un correcto comportamiento de las fibras en contacto con el encofrado, dado que puede quedar trabadas con el textil y generar un cierto o bloqueo o modificar la esperada orientación debido a los efectos pared.

8.3.2. Reducción de plazos

La principal ventaja del HACRFA radica en aunar la eliminación de todo de vibrado de la masa y la fase de ferrallado. En el primero de los casos, además de eliminar el tiempo y coste que ello conlleva, se obtienen ventajas desde el punto de vista de la seguridad y salud en la obra. La desaparición del ruido que

origina y el no tener que manipular equipos vibrantes por parte del operario, acarrea una mejora sustancial, aunque difícil de cuantificar, en sus condiciones laborales.

Aunque el vibrado en sí, no requiere de grandes tiempos, el empleo de hormigones autocompactantes posibilitan un hormigonado continuo del elemento. Evitar hormigonar por tongadas que deban ser vibradas, sin tener siquiera que desplazar el punto de vertido, acarrea una reducción del tiempo de vertido aproximado de un 65 % [Choi et al (2012)]. Esta diferencia se ve incrementa en caso de verter el hormigón convencional con cubilote en lugar de bombearlo.

Por otro lado, la geometría curva requiere que la armadura se amolde a ella, de manera más acusada cuanto menor sea el radio de curvatura. No disponer barras corrugadas como refuerzo y delegar esa responsabilidad sobre las fibras mezcladas con el hormigón, permite reducir el tiempo de preparación y realizar directamente el montaje del encofrado. De esta manera, es posible reducir los tiempos de ferrallado un 100 %.

8.4. Índice de sostenibilidad

Recientemente, se ha incrementado de manera notable, la sensibilización relativa a la huella medioambiental originada por el sector de la construcción. Se pretende con ello, tener en cuenta, potenciar y poner en valor los criterios sociales, medioambientales y económicos relacionados con la estructura. A raíz de ello, se han dado pasos en el campo normativo para estimar el impacto originado por las estructuras. La Instrucción de Hormigón Estructural [EHE-08 (2008)], por ejemplo, introduce un nuevo Apartado, el Anejo nº13, donde se establecen las bases para calcular el Índice de Contribución de la Estructura a la Sostenibilidad (ICES), en base al denominado Índice de Sostenibilidad Medioambiental (ISMA). La Instrucción de Acero Estructural [EAE-2011 (2011)] también incluye su respectivo Anejo, el número 11, relativo a la determinación del Índice de Contribución de la Estructura a la Sostenibilidad. Ambas Instrucciones establecen una serie de indicadores, que permiten realizar la comparación entre diferentes estructuras, de hormigón por un lado o de acero por el otro.

Analizando en detalle dichos indicadores, se observa que aquellos están diseñados para comparar dos soluciones estructurales, pero se realiza mayor hincapié en los aspectos relacionados con la posesión de distintivos o acreditaciones medioambientales por parte de los intervinientes en la obra o los suministradores de materiales. Es decir, se estiman índices de sostenibilidad para obras realizadas por diferentes empresas, en diferentes ubicaciones geográficas y/o con diferentes soluciones estructurales resueltas con el mismo material, indicando cuales aportan mayor valor añadido a la solución. Este procedimiento resulta mas simple de implantar puesto que sus aspectos son justificables de manera fácil y objetiva. La influencia de la solución constructiva y de los propios materiales empleados se ve, en cierta manera, diluida.

Debido a ello, en el presente apartado se plantea el establecimiento de unos nuevos indicadores, modificando en parte los recogidos en las mencionadas Instrucciones y adecuándolos al caso de estudio. De esta manera, se compara directamente la solución estructural y constructiva empleada, llevada a cabo por una misma empresa constructora, con los mismos suministradores de ma-

| Requerimiento medioambiental | Coeficiente de ponderación | | |
|--|----------------------------|-----------|------------|
| | α_i | β_i | γ_i |
| Optimización del cemento | | | 0.60 |
| Características de los agregados | | | 0.20 |
| Gestión del agua | 0.60 | 0.70 | 0.10 |
| Características de los aditivos químicos | | | 0.10 |
| Optimización del refuerzo | | 0.30 | 1.00 |
| Control de impactos | | 0.25 | 1.00 |
| Plazo de ejecución | 0.40 | | 0.40 |
| Nivel de control del material | | 0.75 | 0.60 |

Tabla 8.4: Coeficientes de ponderación planteados.

terial (fabricantes de barras corrugadas o fibras, así como el hormigón) y en la misma localización geográfica.

Estos indicadores se centran en el análisis de los consumos de recursos empleados, tanto desde el punto de vista económico como medioambiental. Es decir, se potencia la reducción de las mediciones de las partidas empleadas, pero de manera ponderada, en función de su impacto medioambiental durante su fabricación o por la gestión de sus residuos.

Por otro lado, los aspectos sociales relativos a las condiciones de trabajo de las personas que realizan dicha actividad, así como la de los residentes en las inmediaciones, también se ve representada mediante los criterios expuestos.

El cálculo del ISMA [(8.4a)] se realiza de una manera convencional, correspondiente a la ya utilizada en las Instrucciones de acero y hormigón, al igual que el ICES [(8.4b)].

$$ISMA = \sum_{i=1}^{i=n} \alpha_i \cdot \beta_i \cdot \gamma_i \cdot V_i \quad (8.4a)$$

$$ICES = A + B \cdot ISMA \quad (8.4b)$$

Los coeficientes α , β y γ ponderan los coeficientes de valor V_i en base a los parámetros establecidos en la Tabla 8.4. La relación y jerarquía de esos mismos coeficientes se representa de manera esquematizada en la Figura 8.11. Por un lado se encuentran los ligados a los materiales, dividiéndose éstos en hormigón y acero, mientras que por otro lado se relacionan los derivados directamente de la ejecución.

$$V_i = K_i \left(1 - e^{m_i \left(\frac{P_i}{A_i} \right)^{n_i}} \right) \quad (8.5)$$

Los diferentes coeficientes de valor para cada indicador, se calculan de acuerdo a la Ecuación (8.5). Donde los parámetros K_i , m_i , A_i y n_i son coeficientes ligados a cada indicador y recogidos en la Tabla 8.5. Estos parámetros alteran la influencia de cada indicador en la solución final, en base al valor que toma la función representativa en función de P_i .

En los siguientes apartados se establecen las funciones representativas de cada criterio medioambiental especificado. Se mencionan, así mismo, los criterios adoptados para la determinación de la forma, que adopta cada una de las mismas.

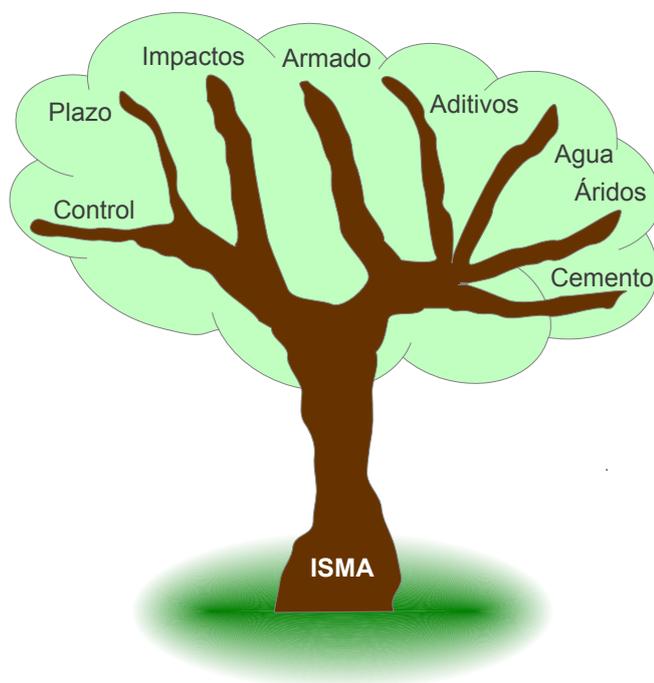


Figura 8.11: Esquema de los indicadores y su jerarquía para la determinación del ISMA.

| Requerimiento medioambiental | K_i | m_i | n_i | A_i |
|--|-------|--------|-------|-------|
| Optimización del cemento | 1.21 | -0.25 | 40 | 2.1 |
| Características de los agregados | 1.05 | -0.4 | 50 | 2.9 |
| Gestión del agua | 1.05 | -0.40 | 40 | 2.2 |
| Características de los aditivos químicos | 10.5 | -0.1 | 100 | 2.0 |
| Optimización del refuerzo | 1.20 | -0.4 | 55 | 2.5 |
| Control de impactos | 10.5 | -0.001 | 1 | 1.0 |
| Plazo de ejecución | 1.21 | -1.05 | 50 | 0.75 |
| Nivel de control del material | 1.21 | -0.40 | 40 | 1.6 |

Tabla 8.5: Coeficientes de ponderación.

8.4.1. Criterio medioambiental de optimización del cemento.

Este indicador valora la contribución medioambiental relativa al empleo de adiciones en el cemento y la reducción del contenido de cemento, limitado inferiormente, éste último, por los contenidos mínimos exigidos en la normativa en función de clases de exposición genéricas y específicas, según la Tabla 37.3.2.a de la EHE-08. Se potencia, por tanto, un menor empleo de cemento siempre en concordancia con los requisitos impuestos por la normativa de acuerdo al ambiente al que estará sometida la estructura. La función representativa de este indicador viene definida por la Ecuación (8.6).

| Clase de exposición | | $\lambda_{1,j}$ Cuantía de cemento kg/m ³ | | | | | | | | | | |
|---------------------|----------------|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Gen. | Esp. | 250 | 275 | 300 | 325 | 350 | 375 | 400 | 425 | 450 | 475 | 500 |
| I | | 100 | 90 | 80 | 70 | 60 | 50 | 40 | 30 | 20 | 10 | 0 |
| II _a | | — | 100 | 90 | 80 | 70 | 60 | 50 | 40 | 30 | 20 | 10 |
| II _b | | — | — | 100 | 90 | 80 | 70 | 60 | 50 | 40 | 30 | 20 |
| III _a | | — | — | 100 | 90 | 80 | 70 | 60 | 50 | 40 | 30 | 20 |
| III _b | | — | — | — | 100 | 90 | 80 | 70 | 60 | 50 | 40 | 30 |
| III _c | | — | — | — | — | 100 | 90 | 80 | 70 | 60 | 50 | 40 |
| IV | | — | — | — | 100 | 90 | 80 | 70 | 60 | 50 | 40 | 30 |
| | Q _a | — | — | — | 100 | 90 | 80 | 70 | 60 | 50 | 40 | 30 |
| | Q _b | — | — | — | — | 100 | 90 | 80 | 70 | 60 | 50 | 40 |
| | Q _c | — | — | — | — | 100 | 90 | 80 | 70 | 60 | 50 | 40 |
| | H | — | — | 100 | 90 | 80 | 70 | 60 | 50 | 40 | 30 | 20 |
| | F | — | — | — | 100 | 90 | 80 | 70 | 60 | 50 | 40 | 30 |
| | E | — | — | 100 | 90 | 98 | 70 | 60 | 50 | 40 | 30 | 20 |

Tabla 8.6: Optimización del contenido de cemento.

$$P_1 = \frac{1}{100} \sum_{j=1}^{j=n} p_{1,j} \cdot \lambda_{1,j} \quad (8.6)$$

En la Ecuación (8.6), $p_{1,j}$ representa el porcentaje de hormigón empleado respecto a la cantidad total y cuyo contenido en cemento esta ligado al parámetro $\lambda_{1,j}$ según la Tabla 8.6. Los valores correspondientes a las cantidades intermedias empleadas se pueden interpolar linealmente.

En la Figura 8.12 se muestra la función de valor con forma de curva ondulada (función sigmoide) y que muestra el crecimiento de la sensibilidad ambiental del proyecto de acuerdo al presente indicador. Los valores elevados de contenido en cemento se penalizan con unos reducidos o nulos valores de $\lambda_{1,j}$, aproximándose al valor máximo (100) cuanto más próximo se esté del contenido mínimo de cemento requerido por la normativa, para una clase de exposición concreta. El crecimiento inicial es aproximadamente exponencial hasta que se supera un valor crítico, que origina una disminución de la tasa de crecimiento. El crecimiento, aún reduciéndose paulatinamente, nunca llega a detenerse, puesto que hasta la saturación del criterio siempre resulta interesante medioambientalmente, la reducción del contenido de cemento. El valor representativo de este indicador debe alcanzar la cifra de 65, para que el coeficiente de valor adquiera, al menos, un valor de 0.50. Es decir, el punto de inflexión de la función sigmoide está desplazado hacia la derecha para motivar el menor uso de cemento. Se acota, por tanto, el exceso de cemento asumible, en función de cada tipo de exposición, a un valor intermedio entre el 25 % y el 35 % del contenido mínimo en cemento.

8.4.2. Criterio medioambiental de optimización de los áridos.

Este otro indicador, cuantifica la influencia medioambiental del tamaño de los áridos empleados en el hormigón. La reducción del tamaño máximo de

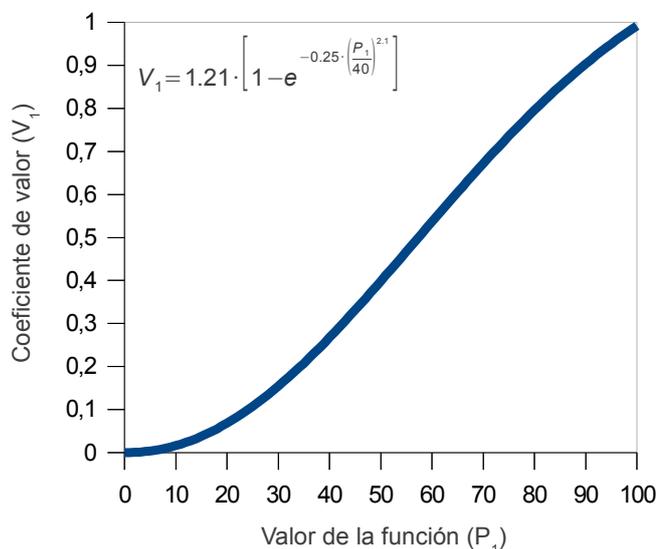


Figura 8.12: Función de valor de la optimización del cemento.

| Tamaño máximo de árido (mm) | 8 | 10 | 12 | 16 | 20 | 25 |
|-----------------------------|---|----|----|----|----|-----|
| $\lambda_{2,j}$ | 0 | 35 | 55 | 75 | 90 | 100 |

Tabla 8.7: Optimización del tamaño de los áridos.

árido grueso y el mayor empleo de áridos finos, requiere un mayor consumo de energía que se penaliza en el presente criterio. Este criterio presenta la función representativa mostrada en la Ecuación (8.7).

$$P_2 = \frac{1}{100} \sum_{j=1}^{j=n} p_{2,j} \cdot \lambda_{2,j} \quad (8.7)$$

En la Ecuación (8.7) los parámetros $p_{2,j}$ y $\lambda_{2,j}$ representan los porcentajes de hormigón amasados con tamaños máximos de áridos de acuerdo a la Tabla 8.7 y los coeficientes obtenidos de la misma.

En lo que a los agregados respecta, la función de valor presenta igualmente una curva sigmoide no simétrica, tal y como se puede apreciar en la Figura 8.13. De acuerdo al presente criterio, la sensibilidad medioambiental está ligada a un menor consumo energético en el machaqueo de los áridos. Debido a ello, los parámetros $\lambda_{2,j}$ oscilan entre un valor mínimo de 0 y un máximo de 100, para tamaños máximos de áridos comprendidos entre los 8 y los 25 mm, respectivamente. Se prima, por tanto, un menor contenido de árido fino con el uso simultaneo de árido grueso del mayor tamaño posible como se suele presentar en hormigones convencionales. La función de valor muestra, al igual que

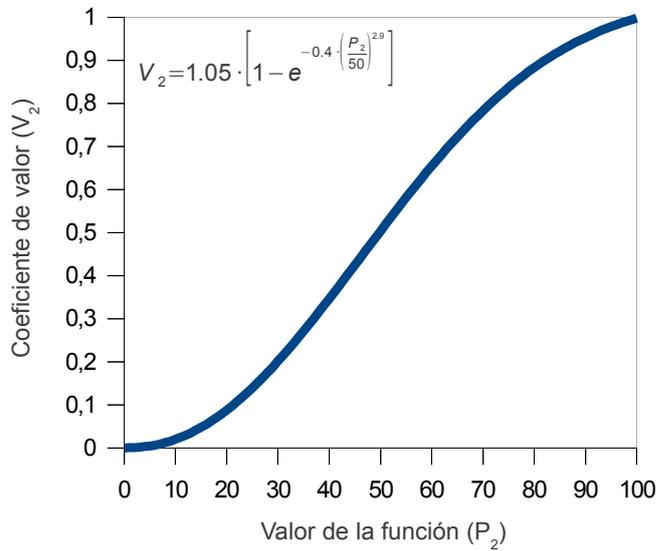


Figura 8.13: Función de valor de la optimización del tamaño de los agregados.

el caso anterior, un crecimiento inicial de manera exponencial hasta el punto de inflexión que origina una notable reducción. Debido a ello, las diferencias entre los tamaños de árido mayores no resultan elevadas, pero sí respecto a los tamaños menores. En esta tesitura se encuentra el HAC, que requiere de tamaños reducidos además de mayores proporciones de arena para formar la pasta necesaria, que aporte estabilidad y fluidez al conjunto. Resultará interesante también el aporte de materias primas procedentes de canteras con bancos de arena, a fin de reducir las labores de machaqueo.

8.4.3. Criterio medioambiental de optimización del agua de amasado.

Este criterio pretende establecer la correspondiente valoración en lo que respecta a la contribución medioambiental, en función de la optimización del consumo de agua de amasado. Dado que el agua es un recurso cada vez más escaso, resultan interesantes las dosificaciones que emplean un menor volumen, lo que también puede redundar, con los aditivos necesarios, en un hormigón más compacto y trabajable, resistente y durable. La función representativa de este indicador se muestra en la Ecuación (8.8).

$$P_3 = \frac{1}{100} \sum_{j=1}^{j=n} p_{3,j} \cdot \lambda_{3,j} \quad (8.8)$$

Los parámetros $p_{3,j}$ y $\lambda_{3,j}$ de la Ecuación (8.8) se corresponden con los porcentajes de hormigón amasados con distintas cantidades de agua y los coe-

| Clase de exposición | | $\lambda_{3,j}$ | | | | | | | | | | |
|---------------------|----------------|-------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | | Cuantía de agua l/m ³ | | | | | | | | | | |
| Gen. | Esp. | 145 | 150 | 155 | 160 | 165 | 170 | 175 | 180 | 185 | 190 | 195 |
| I | | 90 | 85 | 80 | 75 | 75 | 65 | 55 | 45 | 35 | 25 | 15 |
| II _a | | 95 | 90 | 85 | 80 | 75 | 65 | 55 | 45 | 35 | 25 | 15 |
| II _b | | 95 | 90 | 85 | 80 | 75 | 65 | 55 | 45 | 35 | 25 | 15 |
| III _a | | 75 | 75 | 65 | 55 | 45 | 35 | 25 | 15 | 5 | 0 | 0 |
| III _b | | 90 | 85 | 80 | 75 | 75 | 65 | 55 | 45 | 35 | 25 | 15 |
| III _c | | 85 | 80 | 75 | 75 | 65 | 55 | 45 | 35 | 25 | 15 | 5 |
| IV | | 90 | 85 | 80 | 75 | 75 | 65 | 55 | 45 | 35 | 25 | 15 |
| | Q _a | 90 | 85 | 80 | 75 | 75 | 65 | 55 | 45 | 35 | 25 | 15 |
| | Q _b | 100 | 100 | 95 | 90 | 85 | 80 | 75 | 65 | 55 | 45 | 35 |
| | Q _c | 85 | 80 | 75 | 75 | 65 | 55 | 45 | 35 | 25 | 15 | 5 |
| | H | 95 | 90 | 85 | 80 | 75 | 65 | 55 | 45 | 35 | 25 | 15 |
| | F | 90 | 85 | 80 | 75 | 75 | 65 | 55 | 45 | 35 | 25 | 15 |
| | E | 80 | 75 | 65 | 55 | 45 | 35 | 25 | 15 | 5 | 0 | 0 |

Tabla 8.8: Optimización del agua de amasado.

ficientes obtenidos de la Tabla 8.8.

La Figura 8.14 representa la función de valor correspondiente al presente indicador. Esta función sigmoide es totalmente simétrica, por lo que un valor representativo de 50, adopta un coeficiente de valor igual a 0.50. A la hora de establecer los valores de la Tabla 8.8, se ha establecido otorgar un valor de 75 al parámetro $\lambda_{3,j}$, cuando se emplee la cantidad de agua estrictamente necesaria correspondiente a la máxima relación a/c y al contenido mínimo en cemento exigido por la Instrucción. A partir de dicho valor, cualquier incremento de agua, perjudica la obtención de resultados mejores y viceversa. Al mismo tiempo, ello puede originar reducciones de resistencia y aumentos de la permeabilidad del hormigón, estando éste último aspecto muy ligado a su durabilidad y al fundamento de establecer los índices recogidos en el presente apartado.

8.4.4. Criterio medioambiental de optimización del uso de aditivos.

Este indicador muestra la contribución medioambiental relacionada con el uso de aditivos químicos en la dosificación de los hormigones empleados en la obra. Aunque estos productos pueden mejorar muchas propiedades en el estado fresco y endurecido del material, su empleo también presenta un riesgo inherente, aunque muy limitado debido a las pequeñas proporciones en las que se emplea. La función representativa de este criterio se muestra en la Ecuación (8.9).

$$P_4 = \frac{1}{6 \cdot 100} \sum_{j=1}^{j=n} p_{4,j} \cdot \lambda_{4,j} \quad (8.9)$$

En la Ecuación (8.9), $p_{4,j}$ representa el porcentaje de hormigón amasado con distintos aditivos, cuyos correspondientes valores del parámetro $\lambda_{4,j}$ se

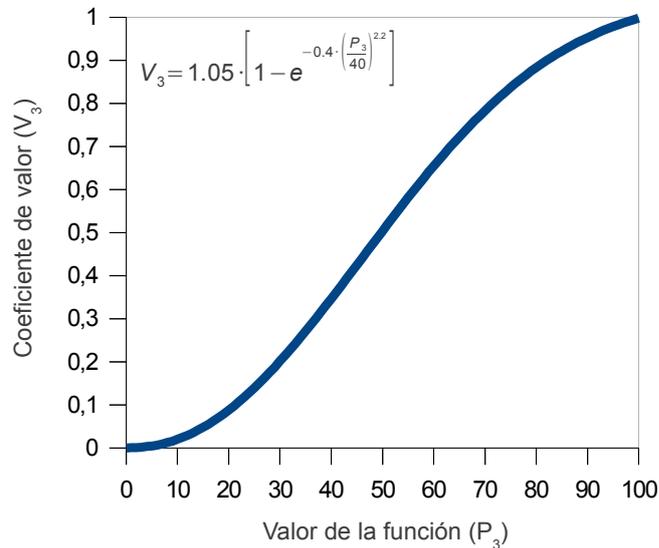


Figura 8.14: Función de valor de la optimización del agua de amasado.

muestran en la Tabla 8.9. Éstos se han determinado en función de la biodegradabilidad y peligrosidad de los principios activos en las soluciones acuosas. Los valores correspondientes a porcentajes de peso sobre cemento intermedios, se obtienen por interpolación lineal.

La función de valor mostrada en la Figura 8.15 presenta una forma cóncava de acuerdo a la dosificación de aditivos químicos empleados. En este caso, no existe un punto de inflexión que reduzca la tasa de crecimiento, considerándose un menor impacto cuanto menor sea su uso. Aún cuando el coeficiente de valor pueda adoptar valores entre 0 y 100, el límite inferior resulta prácticamente inalcanzable, puesto que exigiría un uso excesivo e inadecuado de los mismos. Evidentemente, existen mejoras ligadas al empleo de dichos componentes, pero éstas se cuantifican en sus correspondientes indicadores.

8.4.5. Criterio medioambiental de optimización del armado.

La optimización del armado y su contribución medioambiental se rige por el criterio expuesto en el presente apartado. Se impulsa la toma de medidas que optimicen las cuantías de acero empleadas, así como la simplificación y reducción de recursos empleados para su montaje en obra. La función representativa de este indicador se define en la Ecuación (8.10).

$$P_5 = \sum_{j=1}^{j=3} \lambda_{5,j} \quad (8.10)$$

Los valores de $\lambda_{5,j}$ se obtienen de la Tabla 8.10 en función de los tipos de

| Subcriterio | Dosis (% spc) | $\lambda_{4,1}$ | $\lambda_{4,2}$ | $\lambda_{4,3}$ | $\lambda_{4,4}$ | $\lambda_{4,5}$ | $\lambda_{4,6}$ |
|--------------------------------|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Plastificante Polifuncional | 0 | 100 | | | | | |
| | 0.25 | 90 | | | | | |
| | 0.50 | 80 | | | | | |
| | 0.75 | 65 | | | | | |
| | 1.00 | 40 | | | | | |
| | >1.25 | 0 | | | | | |
| Superplastificantes | 0 | | 100 | | | | |
| | 0.50 | | 80 | | | | |
| | 1.00 | | 60 | | | | |
| | 1.50 | | 40 | | | | |
| | 2.00 | | 20 | | | | |
| | >2.50 | | 0 | | | | |
| Retardantes | 0 | | | 100 | | | |
| | 0.50 | | | 90 | | | |
| | 1.00 | | | 80 | | | |
| | 1.50 | | | 65 | | | |
| | 2.00 | | | 40 | | | |
| | >2.50 | | | 0 | | | |
| Acelerantes | 0 | | | | 100 | | |
| | 3 | | | | 60 | | |
| | 5 | | | | 35 | | |
| | 7 | | | | 20 | | |
| | 9 | | | | 10 | | |
| | >12 | | | | 0 | | |
| Inclusores de aire | 0 | | | | | 100 | |
| | 0.05 | | | | | 90 | |
| | 0.10 | | | | | 80 | |
| | 0.15 | | | | | 65 | |
| | 0.20 | | | | | 40 | |
| | >0.25 | | | | | 0 | |
| Hidrofugantes | 0 | | | | | | 100 |
| | 0.50 | | | | | | 90 |
| | 1.00 | | | | | | 80 |
| | 1.50 | | | | | | 65 |
| | 2.00 | | | | | | 40 |
| | >2.50 | | | | | | 0 |

Tabla 8.9: Optimización de los aditivos químicos empleados en la dosificación.

armado empleados y sus características.

La Figura 8.16 representa la función de valor establecida para el presente criterio. De acuerdo a este indicador, se potencia el empleo de mallas de gran tamaño que no requieran de solapes en sus prolongaciones, lo que redundaría en un incremento del acero empleado. Los sistemas de unión entre armaduras corrugadas convencionales también se analizan potenciando uniones simples sin soldaduras. En este caso se realiza la diferenciación de los parámetros $\lambda_{5,j}$ en dos columnas, correspondientes al uso de una estructura de hormigón armado o la planteada mediante HACRFA, de acuerdo a la presente Tesis Doctoral. Ello se debe a que el refuerzo mediante fibras no requiere de ningún solape

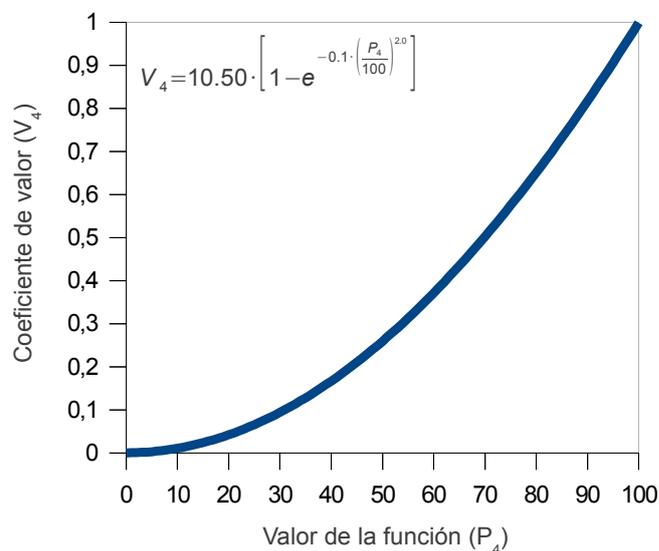


Figura 8.15: Función de valor de la optimización de la cantidad de aditivos empleados.

| Subcriterio | | Caso 1 | | | Caso 2 | | |
|---|----------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | Hormigón armado | | | HACRFA | | |
| | | $\lambda_{5,1}$ | $\lambda_{5,2}$ | $\lambda_{5,3}$ | $\lambda_{5,1}$ | $\lambda_{5,2}$ | $\lambda_{5,3}$ |
| n° de solapes horizontales y verticales | 0 | 34 | | | | | |
| | 1 | 28 | | | | | |
| | 2 | 21 | | | 34 | | |
| | 3 | 14 | | | | | |
| | 4 | 7 | | | | | |
| | 5 | 0 | | | | | |
| Sistema de unión | Soldadura | 0 | | | | | |
| | atado mecánico u otros similares | 32 | | | 32 | | |
| % de armaduras elaboradas con formas según UNE 36.831 | 0 | 0 | | | | | |
| | 20 | 7 | | | | | |
| | 40 | 14 | | | | | |
| | 60 | 21 | | | 34 | | |
| | 80 | 28 | | | | | |
| | 100 | 34 | | | | | |

Tabla 8.10: Optimización del armado.

ni elaboración de armadura adoptando directamente los valores máximos. La función sigmoide dispone de un punto de inflexión, que se encuentra desplazado hacia la derecha, dado que se minusvaloran las reducidas actuaciones de cara

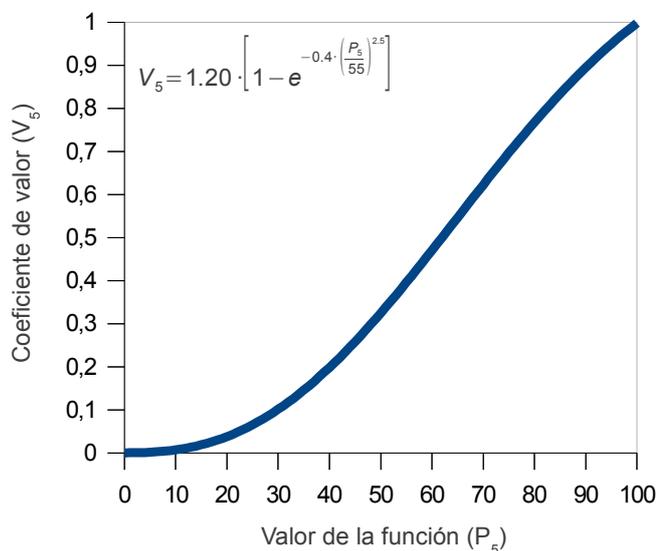


Figura 8.16: Función de valor de la optimización del armado.

a la mejora de su influencia medioambiental.

8.4.6. Criterio medioambiental de control de los impactos.

Los impactos originados por la obra sobre el medio ambiente y la salud de los operarios, en forma de reducción en el empleo de materiales plásticos, necesidad de posteriores trabajos manuales, contaminación acústica, riesgos de accidentes y salud laboral se valoran en el siguiente criterio. Los valores que adopta este criterio se determinan de acuerdo a la función representativa mostrada en la Ecuación (8.11).

$$P_6 = \sum_{j=1}^{j=6} p_{6,j} \cdot \lambda_{6,j} \quad (8.11)$$

Los parámetros $p_{6,j}$ y $\lambda_{6,j}$ de la Ecuación (8.11) se obtienen de la Tabla 8.11.

El impacto de los subcriterios establecidos en la Tabla 8.11 se han ponderado de acuerdo a su facilidad de implantación. Sin embargo, el valor representativo que se alcanza de acuerdo a ellos presenta una relación lineal con el coeficiente de valor (Figura 8.17). Cualquier medida adoptada en este sentido mejora de manera similar la intromisión de la obra en el entorno humano, el medio ambiente y la seguridad y salud de los trabajadores.

| Subcriterio | $p_{6,j}$ | $\lambda_{6,j}$ |
|--|-----------|-----------------|
| Reducción de elementos auxiliares (tapones de protección tipo seta, etc.) | 1 | 20 |
| Emplear sistemas que reduzcan la influencia del operario para evitar posteriores trabajos de reparación (coqueras, etc.) | 1 | 20 |
| Reducción de ruidos (supresión del vibrado) | 1 | 20 |
| Aumento de la seguridad (reducir riesgos de caídas, etc.) | 1 | 20 |
| Mejora de la salud laboral (afecciones a la piel, oídos, etc.) | 1 | 20 |

Tabla 8.11: Control de impactos.

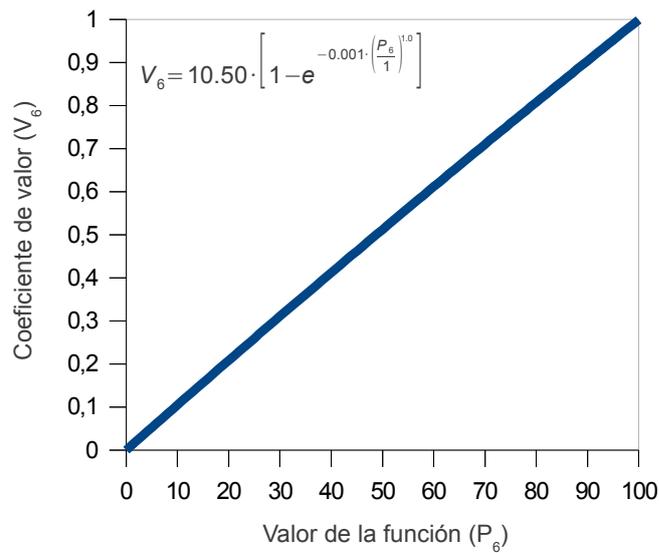


Figura 8.17: Función de valor del control de los impactos.

8.4.7. Criterio medioambiental relativo al plazo de construcción.

Este criterio pretende valorar la contribución medioambiental que aportan materiales o sistemas constructivos, que reduzcan los plazos de ejecución y, por ende, la totalidad de afecciones que dicha obra conlleva. Su cuantificación se realiza en base a la función representativa definida en la Ecuación (8.12).

| % | Empleo de sistemas prefabricados en la obra $\lambda_{7,1}$ | Empleo de otros sistemas que ahorren tiempo en la ejecución | |
|-----|--|---|-------------------------|
| | | HAC $\lambda_{7,2}$ | HRFA $\lambda_{7,3}$ |
| 0 | 0 | 10 | 10 |
| 20 | 20 | 10 | 10 |
| 40 | 40 | 10 | 10 |
| 60 | 60 | 10 | 10 |
| 80 | 80 | 10 | 10 |
| 100 | 100 | — | — |

Tabla 8.12: Reducción de tiempos de construcción.

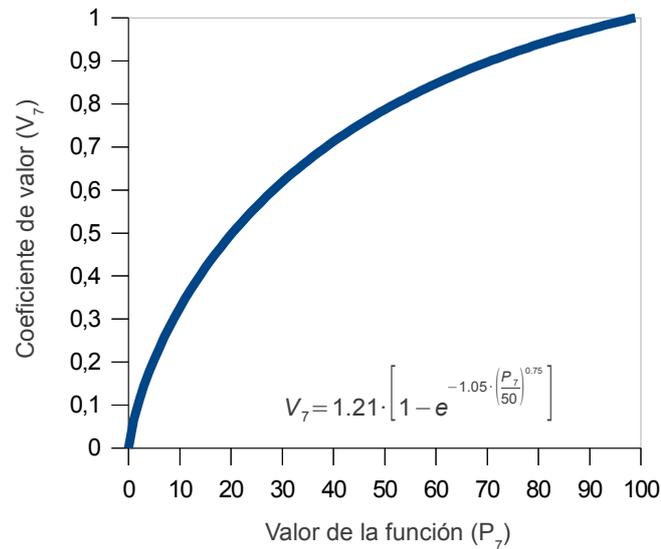


Figura 8.18: Función de valor del plazo de ejecución.

$$P_7 = \sum_{j=1}^{j=3} \lambda_{7,j} \quad (8.12)$$

La Tabla 8.12 recoge los valores de los coeficientes $\lambda_{7,j}$ a introducir en la Ecuación (8.12).

La Figura 8.18 muestra la forma convexa de la función de valor determinada para este criterio. En este caso se aprecia que cualquier mínima medida que se establezca para la reducción del plazo, repercute de manera muy positiva en el resultado final con un notable incremento del coeficiente de valor. La tasa de crecimiento de la curva se reduce sin detenerse a lo largo del rango analizado.

| Determinación de | | Hormigón Armado | | | HACRFA | | |
|--------------------------|------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | $\lambda_{8,1}$ | $\lambda_{8,2}$ | $\lambda_{8,3}$ | $\lambda_{8,1}$ | $\lambda_{8,2}$ | $\lambda_{8,3}$ |
| Resistencia a compresión | Probetas cilíndricas | 0 | | | 0 | | |
| | Probetas (150 mm) cúbicas (100 mm) | 60 | | | 30 | | |
| | | 100 | | | 40 | | |
| Contenido de fibras | Según UNE-EN 14721 | | | | 0 | | |
| | Métodos no destructivos | | | | 20 | | |
| Resistencia a tracción | Probetas prismáticas | | | | 0 | | |
| | Probetas cúbicas | | | | 30 | | |
| | Métodos no destructivos | | | | 40 | | |

Tabla 8.13: Ensayos de control de calidad efectuados.

8.4.8. Criterio medioambiental relativo al control del material.

Este criterio valora el impacto generado por el control a realizar sobre los materiales para asegurar su correcta ejecución. Como ejemplo, se indica la posibilidad de determinar la orientación y densidad de las fibras de acero dentro de la matriz de hormigón, por medios destructivos o mediante la realización de ensayos no destructivos, como los métodos magnéticos o la emisión y recepción de diversas señales u ondas. Así mismo, el control de las propiedades mecánicas se puede realizar por medio de probetas cúbicas, bien a compresión y tracción, que reduzcan el volumen de azufre y hormigón necesario. La propia Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08) permite el uso de probetas cúbicas de 10 cm de arista para hormigones de resistencia característica a compresión (f_{ck}) superior o igual a 50 MPa, siempre y cuando el tamaño máximo de árido no supere los 12 mm, lo cual coincide con las características del hormigón empleado. Por otro lado, el ensayo Barcelona puede ser ciertamente interesante para caracterizar la resistencia a tracción del HRFA [Pujadas (2013)] empleando una menor cantidad de material. Se premia el empleo de métodos no destructivos (NDT) para la determinación de sus características y propiedades. Este apartado más específico para los hormigones reforzados con fibras de acero (HRFA) puede aunarse con el criterio medioambiental de gestión de residuos promulgado en el Anejo 13 de la EHE-08. La función representativa de este criterio se define en la Ecuación (8.13).

$$P_8 = \sum_{j=1}^{j=3} \lambda_{8,j} \quad (8.13)$$

El valor del coeficiente $\lambda_{8,j}$ se obtiene de la Tabla 8.13. Al igual que en el criterio medioambiental de optimización del armado (Apartado 8.4.5), se han diferenciado dos casos, ligados al uso del hormigón armado y el HACRFA. En el primero, obviamente, no se caracteriza la resistencia a tracción de la matriz ni se determina el contenido de fibras (puesto que no las hay). En cualquiera de los dos casos, se prima el uso de probetas de tamaño más reducido o incluso, la determinación de las características y propiedades mecánicas de acuerdo a ensayos no destructivos, que redunden en un menor consumo de materiales para su control y, por consiguiente, de residuos.

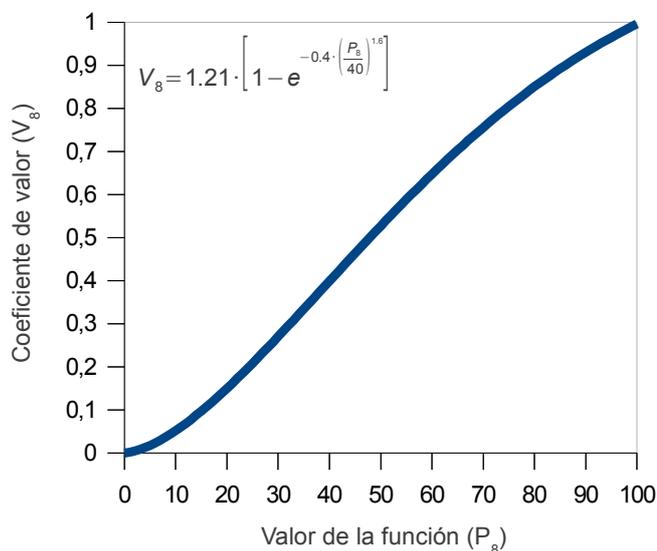


Figura 8.19: Función de valor de la optimización de los residuos generados.

La función de valor representada en la Figura 8.19, adquiere la forma de una curva sigmoide de crecimiento parecido en toda su longitud. Dado que el punto de inflexión está desplazado ligeramente hacia la izquierda, se potencia la adopción de unas cuantas medidas, sin la necesidad de cumplir todos los subcriterios.

8.4.9. Comparativa entre ambos casos de estudio.

De acuerdo a los datos aportados en el apartado 8.3, es posible establecer los valores del ISMA correspondientes a cada opción de diseño, lo cual redundará en un ICES diferente para las mismas situaciones de obra. Para muchos de los aspectos que no se definen habitualmente, se optará por adoptar situaciones favorables que no penalicen en exceso cualquiera de los dos casos, con motivo de no originar diferencias ficticias.

Se aprecia claramente que existen aspectos, como el mayor empleo de cemento, que repercuten considerablemente en el medioambiente. Sin embargo, la solución mediante HACRFA favorece otros condicionantes de manera que la contribución medioambiental de la solución final resulta similar o incluso mejor.

8.5. Consideraciones finales

En el presente Capítulo, se ha realizado el estudio de una aplicación posible para el hormigón autocompactante reforzado con fibras de acero (HACRFA). La disposición y respuesta del material, muestra un comportamiento adecuado

| Caso 1 Hormigón Armado | | | Criterio | Caso 2 HACRFA | | | | |
|---------------------------|-------|-------|----------|------------------|-----------------|-------|-------|------|
| ISMA | V_i | P_i | | $\lambda_{i,j}$ | $\lambda_{i,j}$ | P_i | V_i | ISMA |
| | | | 100 | $\lambda_{1,1}$ | 68 | | | |
| | | 100 | | P_1 | | 68 | | |
| | 1.00 | | | V_1 | | | 0.65 | |
| | | | 95 | $\lambda_{2,1}$ | 45 | | | |
| | | 95 | | P_2 | | 45 | | |
| | 0.98 | | | V_2 | | | 0.44 | |
| | | | 75 | $\lambda_{3,1}$ | 40 | | | |
| | | 75 | | P_3 | | 40 | | |
| | 0.84 | | | V_3 | | | 0.35 | |
| | | | 90 | $\lambda_{4,1}$ | 60 | | | |
| | | | 100 | $\lambda_{4,2}$ | 40 | | | |
| | | | 100 | $\lambda_{4,3}$ | 100 | | | |
| | | | 100 | $\lambda_{4,4}$ | 100 | | | |
| | | | 100 | $\lambda_{4,5}$ | 100 | | | |
| | | | 100 | $\lambda_{4,6}$ | 100 | | | |
| | | 98.3 | | P_4 | | 83.3 | | |
| | 0.97 | | | V_4 | | | 0.70 | |
| | | | 28 | $\lambda_{5,1}$ | 34 | | | |
| | | | 32 | $\lambda_{5,2}$ | 32 | | | |
| | | | 34 | $\lambda_{5,3}$ | 34 | | | |
| | | 96 | | P_5 | | 100 | | |
| | 0.96 | | | V_5 | | | 1.00 | |
| | | | 0 | $\lambda_{6,1}$ | 20 | | | |
| | | | 0 | $\lambda_{6,2}$ | 20 | | | |
| | | | 0 | $\lambda_{6,3}$ | 20 | | | |
| | | | 0 | $\lambda_{6,4}$ | 20 | | | |
| | | | 0 | $\lambda_{6,5}$ | 20 | | | |
| | | 0 | | P_6 | | 100 | | |
| | 0.00 | | | V_6 | | | 1.00 | |
| | | | 0 | $\lambda_{7,1}$ | 0 | | | |
| | | | 0 | $\lambda_{7,2}$ | 10 | | | |
| | | | 0 | $\lambda_{7,3}$ | 10 | | | |
| | | 0 | | P_7 | | 20 | | |
| | 0.00 | | | V_7 | | | 0.50 | |
| | | | 0 | $\lambda_{8,1}$ | 20 | | | |
| | | | — | $\lambda_{8,2}$ | 30 | | | |
| | | | — | $\lambda_{8,3}$ | 0 | | | |
| | | 0 | | P_8 | | 50 | | |
| | 0.00 | | | V_8 | | | 0.53 | |
| 0.58 | | | | ISMA | | | | 0.68 |

Tabla 8.14: Comparativa de los casos de estudio.

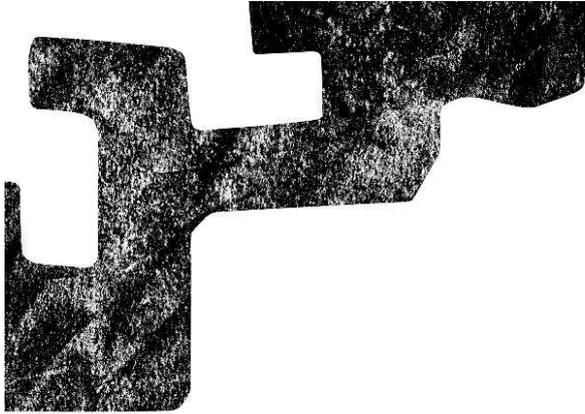
para su empleo en la construcción de depósitos circulares de contención no enterrados.

Para apoyar su potencial empleo, además de los aspectos reológicos y resistentes, se realiza un estudio comparativo de un caso real en su construcción mediante un hormigón convencional y el HACRFA. Desde el punto de vista

económico, temporal y de calidad, el material estudiado compite e incluso, en ciertas situaciones, destaca frente a una solución tradicional, amén de la mejora de las condiciones sostenibles.

El incremento en el coste del hormigón y el acero, se ve atenuado por la posible reducción en el futuro del coste de las fibras y la notable disminución de la mano de obra y tiempos necesarios para la construcción. El incremento del coste también se ve atenuado para estructuras, que expuestas a ambientes agresivos, requieren de contenidos en cemento elevados. Además, la mejora de la calidad (compacidad, acabado, impermeabilidad) del elemento estructural redundará en una mayor durabilidad.

Sumado a la vertiente económica, el aspecto medioambiental del empleo del material origina un aumento del índice de contribución de la estructura a la sostenibilidad, en comparación con un armado y un hormigón convencionales. El aspecto negativo debido al incremento en el uso de ciertos materiales como el cemento, se ve compensado con la reducción de impactos, disminuyendo el nivel de ruido y la duración del impacto global que genera la obra. Al mismo tiempo, el empleo de nuevos métodos de ensayo no destructivo junto con el desarrollo de métodos de ensayo (Ensayo Barcelona), que generen menores volúmenes de residuos resulta, igualmente, beneficioso.



PARTE VII

Conclusiones finales

CAPÍTULO 9

Conclusiones y perspectivas futuras

9.1. Conclusiones

El presente apartado, resume las principales aportaciones y conclusiones recogidas a lo largo de la Tesis Doctoral. En este estudio se recoge el conocimiento adquirido del hormigón autocompactante reforzado con fibras de acero (HACRFA) en aras a su utilización en una aplicación muy concreta, que se centra en el diseño y construcción de depósitos no enterrados de contención cilíndricos con base articulada, sin que esto sea óbice para su utilización en situaciones estructurales constructivas donde predominen otro tipo de esfuerzos.

El documento refleja de manera cronológica las fases de la investigación desarrolladas. No cabe duda, que la práctica real de la ejecución del elemento estructural y la preparación y utilización del material supone una programación un tanto inversa en el orden experimentado, partiendo de la estimación de la orientación de las fibras en función del movimiento de la masa fresca de hormigón; en segundo lugar, estableciendo posteriormente las cuantías necesarias para obtener la respuesta mecánica deseada, para poder determinar la dosificación óptima que garantice la autocompactabilidad y la ausencia de segregación, finalizando con alguna de las técnicas de control, preferiblemente basadas en ensayos no destructivos (NDT).

Son de sobra conocidas las ventajas que aportan las tecnologías del hormigón relativas a su refuerzo mediante fibras (HRFA en el caso del acero) y su elevada fluidez (HAC). Este estudio se ha enfocado con el fin de potenciar las ventajas de ambas tecnologías en base a la sinergia, que su empleo combinado aporta. La mayor contribución del estudio es la propia experiencia recopilada durante las fases de diseño y ejecución de un elemento estructural de gran envergadura, lo que ha posibilitado la obtención de probetas para su ensayo a escala 1:1. Al mismo tiempo, se establecen una serie de pautas para su diseño y se contrastan diversos métodos de control de calidad de la estructura.

A lo largo del Capítulo 2, se realiza una recopilación del estado del arte relativo a ambos materiales (HRFA y HAC) por separado. Las experiencias

con el denominado HACRFA, resultan notablemente más escasas. El desconocimiento de muchos de los proyectistas del comportamiento y la ausencia de una normativa e instrucción específicas para su comprobación y puesta en obra, así como los beneficios que acarrear dichas tecnologías, hace difícil superar sus reticencias respecto al material. De este estudio pormenorizado se destacan ciertos aspectos que, a día de hoy y con el estudio del arte del que disponemos, no facilitan su aplicabilidad.

- Existen diversas configuraciones de ensayo no normalizadas para estimar la respuesta a arrancamiento de las fibras de acero embebidas en la matriz de hormigón de manera individual, pero su interés radica en el estudio de los fenómenos que se producen durante el proceso de deslizamiento de la fibra sin que sirvan como base de cálculo de elementos estructurales, debiendo establecerse el comportamiento del material compuesto de manera íntegra y no aislada.
- De igual manera, los ensayos de flexotracción se normalizan de manera diversa a la par que sus resultados se interpretan de distinta manera, de acuerdo al código o instrucción adoptado para el diseño. Resulta, por tanto, necesario el establecimiento de un modelo constitutivo consensuado, más comprensible y, a ser posible de carácter predictivo, que aporte una mayor seguridad al proyectista de cara a su correcta aplicación y potencia, al mismo tiempo, su uso.
- Establecidas las posibles casuísticas de la orientación de las fibras, queda claro que deben desarrollarse técnicas de predicción y control posterior que la determinen fehacientemente, sin optar por valores generalistas, que no tienen en consideración variaciones localizadas debido al movimiento real de la masa, efectos de elementos de compactación, etc.

En cuanto al HAC se refiere, queda latente el interés por sus ventajas, pero, entre otros, su sensible dosificación sigue siendo un handicap:

- Los métodos de dosificación no son generalizables, puesto que la mayoría de ellos se adecuan a la idiosincrasia de los países donde se han desarrollado, debido a aspectos como la costumbre en el uso y la accesibilidad de los distintos materiales.
- Igualmente, no todas las plantas de hormigón, por ejemplo, de nuestro entorno próximo, están, actualmente, dotadas de los equipos necesarios para dosificar HAC debido a la influencia que la humedad de los componentes tienen sobre el comportamiento del conjunto. Esto resulta especialmente importante en amasadas reales en planta, puesto que los materiales suministrados no siempre presentan las mismas características entre sí, ni respecto a la dosificación teórica de laboratorio.
- Resulta imposible de determinar de antemano, la reología que presentarán diferentes dosificaciones, desde el punto de vista de la viscosidad y la tensión de corte. Para ello, resulta imprescindible emplear ensayos normalizados que pueden resultar ciertamente subjetivos, en cuanto a la medición de los tiempos de flujo se refiere.

- Dichos parámetros reológicos son cuantificables mediante el empleo de viscosímetros o reómetros, pero los valores registrados en cada aparato no son comparables, presentando cada uno de ellos una escala o rango de medición realmente dispar.

La combinación de ambas tecnologías, converge en lo que se ha denominado el HACRFA. Este material presenta las ventajas anteriormente mencionadas, a costa de un ligero incremento de la complejidad de su dosificación:

- Un nuevo agregado esbelto como son las fibras, repercute en la dosificación necesaria para garantizar la elevada fluidez, sin que se originen segregación o bloqueos de las fibras. Dicha dificultad se puede solventar con un adecuado estudio de la dosificación y de la aportación de la proporción de fibras adoptadas, según forma y dimensiones de las mismas.
- La gran fluidez del material, origina una orientación de las fibras predominante en dirección paralela al movimiento de la masa. Aunque los métodos de CFD, con sus múltiples variantes, se presentan potencialmente interesantes para determinar dicha orientación, hasta el momento no se han realizado ensayos sobre elementos de gran envergadura para contrastar su validez.

El Capítulo 3 presenta una simple metodología para la elección del tipo de fibra más adecuado a la aplicación propuesta. Los resultados de arrancamiento de fibras individuales, junto con las observaciones recogidas en el capítulo, establecen las pautas a seguir para optar por una fibra u otra, habiéndonos decantado finalmente por fibras de extremos conformados, y por el diseño de una dosificación de hormigón acorde a su utilización de manera conjunta, como el hormigón autocompactante definido. Al mismo tiempo, se establece la estrategia para definir la dosificación del hormigón:

- Se establece una simple metodología, que partiendo de las materias primas cercanas y habituales en nuestro entorno, permite dosificar un HACRFA que cumpla todos los requisitos exigidos.
- La dosificación propuesta puede aún ser optimizada económicamente reduciendo el contenido en cemento hasta el mínimo exigido por la normativa vigente (EHE-08) y sustituirlo por algún otro tipo de adición (filler mineral, humo de sílice, etc.). Sin embargo, en ambientes agresivos la diferencia no es tan notable.

La cuarta parte de la presente tesis doctoral, engloba los capítulos correspondientes a la propia ejecución del muro (Capítulo 4) y los consiguientes ensayos no destructivos (Capítulo 5) y a rotura (Capítulo 6) realizados tras su corte. La experiencia adquirida durante la elaboración de la Tesis nos obliga a poner en evidencia que:

- Tal y como ha sido el caso, el continuo consumo y suministro de materias primas de características muy diversas en la producción de hormigones en planta, origina la necesidad de modificar la dosificación determinada en laboratorio, para ajustarse a nuevas granulometrías y/o humedades de los áridos principalmente.

- Se deben tener muy en cuenta las alteraciones, que puede sufrir la masa durante su transporte y la puesta en obra. Dado, que la elevada fluidez de la masa permite su fácil bombeo, es necesario estudiar diferentes métodos de cebado de aquel, que eviten el bloqueo en la manguera. Se debe analizar la posibilidad de cebar la manguera directamente con el hormigón autocompactante, en lugar de emplear una lechada que aporte mayor contenido en agua y que origine la potenciación de la segregación de la masa como ha ocurrido en la presente investigación. Esta situación adversa puede originar el completo rechazo del elemento estructural ejecutado. Cabría la posibilidad de prescindir de la utilización de la primera fracción del hormigón bombeado.
- El procedimiento de puesta en obra debe ser detenidamente analizado, puesto que se ha probado que la forma y posición del vertido condiciona la orientación que adoptarán las fibras. Refuerzos incorrectos, en forma de fibras totalmente desalineadas con los esfuerzos de tracción, pueden originar puntos débiles en la estructura, que lo hagan inaceptable para el uso previsto. Los métodos de simulación CFD permiten analizar dichas variables hasta determinar el procedimiento adecuado.
- Se constata que el tiempo y coste de ejecución del muro en la constitución y características estructurales definidas en la Tesis, incluyendo los trabajos de ferrallado y encofrado, se reducen considerablemente. Ello se traduce en una importante reducción de costes.
- Con el fin de respaldar las afirmaciones vertidas a lo largo del documento, se establecen una serie de ensayos en un número de probetas lo suficientemente representativo como para poder extrapolar los resultados al conjunto del muro. Las probetas analizadas mediante los diversos métodos no destructivos son prácticamente la totalidad, es decir, el 100 % del muro. Mientras que a lo que ensayos destructivos se refiere, las probetas prismáticas estudiadas, superan las 70 unidades, y las cúbicas analizadas, son 34. En total, la superficie de muro analizada se corresponde con más de un 40 % del mismo.
- De entre los ensayos no destructivos empleados, pocos son los que, a día de hoy, se pueden aplicar directamente sobre el elemento estructural para determinar la densidad y/o orientación de las fibras. Los diferentes métodos empleados, presentan diferentes grados de adecuación al caso de estudio:
 - La medición de la velocidad de los impulsos ultrasónicos no aporta información interesante en relación a la densidad de fibras y las orientaciones que adquieren en las zonas analizadas.
 - Los métodos estereológicos concuerdan con las orientaciones estimadas de acuerdo a otros NDT, pero resultan ser una ardua tarea de contar fibras seccionadas en las caras de corte y/o machacar y extraer las fibras, de probetas de reducido tamaño.
 - La tomografía axial computerizada aporta una información muy precisa pero su coste e imposibilidad de implantación en el sistema de

control *in situ*, obligan a descartarla como medida sistemática de control.

- Los métodos magnéticos se muestran los más interesantes debido a su simplicidad, fiabilidad y repetibilidad. La medida de la variación de la inductancia aporta información precisa sobre la orientación, densidad e incluso posible respuesta mecánica del material. Como contrapunto, la configuración empleada no permite el estudio directo sobre el elemento estructural, sino en probetas cúbicas. Se constata la proporcionalidad lineal de las medidas entre diverso instrumental, lo que abre la vía de establecer patrones de calibración para cada tipo de fibra. Así mismo, se establece una metodología para relacionar las medidas sobre probetas prismáticas y cúbicas para posteriores formulaciones predictivas de las resistencias residuales.
 - La metodología de dosificación empleada permite formular un HACRFA, que presenta una buena adecuación a la aplicación propuesta, en base a la baja permeabilidad que muestra, lo que evita posibles filtraciones en los depósitos planteados.
- Los diversos ensayos a rotura realizados sobre probetas ubicadas en distintas posiciones del muro, muestran una elevada discrepancia en las características mecánicas a tracción del material debido a la segregación originada y las diferentes orientaciones debido al movimiento de la masa. Sin embargo, las zonas con una disposición de fibras similar a la prevista demuestran, que sería posible garantizar la seguridad estructural del conjunto en futuras realizaciones, dado que se han obtenido valores medios de las resistencias residuales superiores a lo requerido.
- La resistencia característica a compresión del hormigón resulta uniforme, y de reducida desviación, en cualquier punto del muro siendo, por tanto, independiente del grado de refuerzo y orientación que adoptan las fibras en cada probeta ensayada. Al contrario de lo esperado, los valores de resistencia obtenidos en las probetas cúbicas extraídas del muro y las probetas cilíndricas moldeadas con el mismo material aportan valores similares. En vista a las dosificaciones necesarias para garantizar la durabilidad y la fluidez y comparando la resistencia característica a compresión alcanzada con las habituales de los HAC, se puede afirmar que la dosificación empleada se encuadra en un rango de resistencias moderadas.
 - La resistencia a tracción se ha determinado en base a diferentes procedimientos de ensayo, determinando unas relaciones entre el ensayo Barcelona y el ensayo Brasileño, que por ejemplo, que permiten correlacionar los resultados de uno a otro. El ensayo Barcelona aporta valores más reducidos que el ensayo Brasileño, pero suficientes y con escasa desviación. Si bien la resistencia a tracción de la matriz de hormigón no se ve influenciada en gran medida por el refuerzo de fibras, la tenacidad que presentan las diversas probetas depende de su orientación y cuantía. Se observan diversos patrones de rotura en los casos donde los ejes traccionados presentan una orientación dispar o similar, generando en la primera de las situaciones planos

de rotura paralelos al eje con mayor orientación. Si la orientación es similar para ambos ejes, los planos de rotura se forman a lo largo de la diagonal de la probeta cúbica.

- No se han obtenido resultados concluyentes respecto a la relación entre el contenido y orientación de las fibras y la resistencia frente a esfuerzos tangenciales. Sin embargo, la resistencia determinada resulta mayor que las sollicitaciones de la aplicación propuesta.
- Los ensayos de flexotracción proporcionan valores muy diversos de resistencias residuales en base a los errores de ejecución ya comentados. Sin embargo, se alcanzan adecuados niveles de comportamiento mecánico con cuantías de fibras no excesivamente elevadas gracias a una orientación forzada. Se establecen relaciones entre la resistencias residuales y el número de fibras contadas en la sección de corte o la variación de inductancia medida, presentando buenos ajustes para las primeras resistencias residuales e incrementándose la desviación en las posteriores. Se establece incluso una metodología para predecir la respuesta del material frente al ensayo a flexotracción y la ley constitutiva (según EHE-08) en base a los datos recabados de los métodos magnéticos no destructivos en forma de función exponencial cuadruple. El desarrollo de estos últimos métodos podría dar lugar a determinar las propiedades mecánicas del material estudiado sobre la propia estructura.

La quinta parte comprende uno de los estudios más ambiciosos que se han desarrollado sobre la simulación del hormigonado mediante los métodos CFD. En el Capítulo 7, se muestra la metodología empleada para establecer los datos de entrada y su contrastación con los resultados de los métodos no destructivos:

- Frente a la carencia de equipos de medición de las propiedades reológicas, pero en vista de las discrepancias que afloran entre los diversos aparatos, se procede a establecer satisfactoriamente un rango de valores aceptable para el software empleado en base a la contrastación de ensayos de escurrimiento reales y simulados.
- Los resultados de la simulación, transformando los campos de velocidades en ángulos de orientación de las fibras, se cotejan con las orientaciones detectadas mediante el método magnético observando una notable similitud.
- De manera añadida, se establece una metodología para predecir el comportamiento mecánico del material en base a las orientaciones previstas en la simulación en forma de función exponencial cuadruple, con el consiguiente interés de poder conocer el comportamiento de la totalidad de la estructura de manera previa, detectar puntos débiles y establecer los procedimientos de hormigonado más adecuados, por ejemplo, utilización o no de más de una manguera en función de la dimensión de la pieza, conveniencia o no de elevar la manguera en razón a la altura del elemento estructural a hormigonar, etc.
- Se constata una notable reducción de las resistencias residuales para ángulos de inclinación de las fibras superiores a 50° , lo que requeriría una

reorientación de las fibras de modo que se alineen de acuerdo a los principales esfuerzos de tracción.

Por último, en la sexta parte (Capítulo 8) se realiza una comparativa económica y medioambiental entre un depósito de contención cilíndrico construido mediante hormigón armado tradicional y la solución propuesta de HACRFA.

- Resulta evidente el incremento de coste unitario debido a los materiales (cemento y fibras, principalmente), aunque cuantitativamente no resulta tan elevado puesto que se plantea incluso la reducción de la cuantía total de acero y los ambientes agresivos requieren de por sí elevados contenidos en cemento, además de poder todavía, optimizar más la dosificación.
- El resultado global tampoco se ve encarecido ya que existen ahorros en la mano de obra (ferrallado, vibrado, etc.) y reducciones en los plazos de ejecución. Según las dimensiones de las piezas a hormigonar podría producirse un encarecimiento del encofrado sometido a presiones hidrostáticas dadas las características del material.
- Esta investigación no obstante, establece nuevos indicadores de medición de la contribución de la estructura a la sostenibilidad, de acuerdo a los cuales las penalizaciones por el mayor empleo de cemento se ven contrarrestadas por la mejora de otros aspectos, muchos ya mencionados a lo largo del presente documento.

9.2. Nuevas líneas de investigación

Dado que se ha demostrado la potencial utilidad del material para construir, por ejemplo, depósitos de contención cilíndricos de las características estructurales señaladas, de aquí en adelante es necesario potenciar ciertos aspectos que han generado problemas durante la elaboración y redacción de esta Tesis Doctoral, pero que ha demostrado que en su estado incipiente se han probado como material, procedimiento y aplicaciones, totalmente válidos.

- Se debe estudiar la mejora del anclaje mecánico de las nuevas fibras disponibles en el mercado, que presentan los extremos conformados de manera doble o, incluso, triple, para determinar si en una situación parecida a la presentada en el presente trabajo, se adquiere una mayor resistencia residual y si se modifica el mecanismo de fallo, siendo éste la rotura de la fibra en lugar de su deslizamiento, lo que podría reducir su ductilidad.
- Se deben establecer metodologías para extrapolar las dosificaciones teóricas estudiadas a nivel de laboratorio a una producción en escala, determinando cómo proceder frente a cambios en los materiales suministrados, e incluso en relación con la temperatura ambiente, de una manera sistemática.
- Se considera necesario que los fabricantes establezcan unos patrones de calibración a los que referirse con el fin de determinar la orientación y la cuantía de fibras de una manera fiable y no destructiva.

- Viendo la adecuada predicción del comportamiento mecánico en base a los métodos magnéticos, éstos deben ser desarrollados para su implementación como control de calidad en la obra, sobre la propia estructura y con equipos portátiles, empleando los patrones de calibración ya mencionados.
- Resulta interesante ahondar en el estudio del ensayo Barcelona, como posible sustituto del ensayo Brasileño para determinar la resistencia a tracción del material y del ensayo a flexotracción para determinar las resistencias residuales. Actualmente, nos encontramos analizando la relación entre la densidad y orientación de las fibras respecto a la tenacidad aportada y medida en dicho ensayo.
- Además de todos los controles de calidad posteriores a la ejecución, lo prioritario, si se quiere acometer el estudio de grandes elementos y debido al coste que suponen, es desarrollar los métodos computacionales adecuados para determinar de manera previa la orientación de las fibras y su distribución. Las simulaciones con fluidos homogéneos deben emplearse para diversas configuraciones geométricas y de vertido, mientras que paralelamente se debe analizar la potencialidad de simulaciones más complejas, donde partículas lagrangianas pueden representar a las propias fibras y obtener información de la distribución, además de la orientación. Esto podría dar lugar a limitar los valores de las propiedades reológicas del material (o clases de autocompactabilidad) para la aplicación del HACRFA.

Y en vista de todo lo expuesto en la presente Tesis Doctoral, parece razonable indicar que resulta necesario el superar la fase de laboratorio, que ya ha demostrado que el material es muy capaz de adaptarse a diversos usos y aplicaciones, y proceder con el estudio a nivel estructural sobre elementos de mayores dimensiones, donde se deben todavía establecer procedimientos, que permitan aprovechar al máximo su capacidad resistente con total seguridad. Esta fase debería culminar con la elaboración de la correspondiente norma o instrucción que proporcione al proyectista los instrumentos de comprobación y fiabilidad de la tecnología que reduzca la actual reticencia a la utilización de un material y tecnología, que entendemos se ha abierto con las aportaciones de esta Tesis Doctoral y los fundamentos adelantados y que se muestran en el estado del arte.

Referencias

- ACHE (1999) Manual de tecnología del hormigón reforzado con fibras de acero. Tech. rep., Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural
- ACHE (2008) Hormigón autocompactante: Diseño y aplicación. Tech. rep., Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural
- Aïtcin PC, Mehta P (1990) Principles underlying production of high-performance concrete. *Journal of Cement, Concrete and Aggregates* 12(2):70–78
- Arroyo JC, Cabré FM, Álvaro García Meseguer (2009) Jiménez Montoya - Hormigón Armado, 15th edn
- Arslan M (2002) Effects of drainer formworks on concrete lateral pressure. *Construction and Building Materials* 16(5):253–259
- Arslan M, Simsek O, Serkasi S (2005) Effects of formwork surface materials on concrete lateral pressure. *Construction and Building Materials* 19(4):319–325
- Assaad JJ, Khayat KH (2006) Effect of viscosity-enhancing admixtures on formwork pressure and thixotropy of self-consolidating concrete. *ACI materials journal* 103(4):280–287
- Barr B, Lee M, Barragán B, Dupont D, Gettu R, Olesen J, Stang H, Vandewalle L (2003a) Round-robin analysis of the RILEM TC 162-TDF uni-axial tensile test: Part 1. *Materials and Structures* 36:265–274
- Barr B, Lee M, de Place Hansen E, Dupont D, Erdem E, Schaerlaekens S, Schnütgen B, Stang H, Vandewalle L (2003b) Round-robin analysis of the RILEM TC 162-TDF beam-bending test: Part 1—Test method evaluation. *Materials and Structures* 36:609–620
- Barragán BE (2002) Failure and toughness of steel fiber reinforced concrete under tension and shear. PhD thesis, Universitat Politècnica de Catalunya
- Bartos P (1993) Assessment of properties of underwater concrete by the orimet test. In: *Proceedings of the International RILEM workshop on Special Concretes. Workability and Mixing.*, pp 181–192
- Bartos P, Duris M (1994) Inclined tensile strength of steel fibres in a cement-based composite. *Composites* 25(10):945 – 952

- Belleze T, Fratesi R, Failla C (2004) Effect of chemical-physical interaction between galvanized steel fibres and concrete. In: Prisco MD, Felicetti R, Plizzari GA (eds) Proceedings of the Sixth International RILEM Symposium on Fibre-Reinforced Concretes (FRC) - BEFIB 2004, RILEM, vol Volume 1, pp 239–248
- Bencardino F, Rizzuti L, Spadea G, Swamy RN (2008) Stress-strain behavior of steel fiber-reinforced concrete in compression. *Journal of Materials In Civil Engineering* 20(3):255–263
- Bernard E (2000) Behaviour of round steel fibre reinforced concrete panels under point loads. *Materials and Structures* 33:181–188
- Billberg P (1999) *Self-compacting Concrete for Civil Engineering Structures: The Swedish Experience*
- Blanco A, Pujadas P, de la Fuente A, Cavalaro S, Aguado A (2013) Application of constitutive models in european codes to rc–frc. *Construction and Building Materials* 40(0):246 – 259
- Blanco Álvarez A, Pujadas Álvarez P, de la Fuente Antequera A, Aguado de Cea A (2010) Análisis comparativo de los modelos constitutivos del hormigón reforzado con fibras. *Hormigón y Acero* 61(256):83–101
- Boulekbache B, Hamrat M, Chemrouk M, Amziane S (2012) Influence of yield stress and compressive strength on direct shear behaviour of steel fibre-reinforced concrete. *Construction and Building Materials* 27(1):6 – 14
- Bramshuber W, Uebachs S (2003) Investigation on the formwork pressure using self-compacting concrete. In: 3rd International Symposium on Self-Compacting Concrete
- Bui V, Akkaya Y, Shah S (2002) Rheological model for self-consolidating concrete. *ACI Materials Journal* 99(6):549–559
- Chen WF (1970) Double punch test for tensile strength of concrete. *ACI Materials Journal* 67(2):993–995
- Choi Y, Lee H, Chu S, Cheong S, Jung W (2012) Shear behavior and performance of deep beams made with self-compacting concrete. *International Journal of Concrete Structures and Materials* 6(2):65–78
- Chu H, Machida A (1998) Experimental Evaluation and Theoretical Simulation of Self Compacting Concrete by the Modified Distinct Element Method (MDEM). In: Recent advances in concrete technology, fourth CAN-MET/ACI/JCI international conference, vol 179, pp 691–714
- Chu H, Machida A, Suzuki N (1997) Experimental Investigation and DEM Simulation of Filling Capacity of Fresh Concrete. *Transactions of the Japan Concrete Institute* 18:9–14
- CNR-DT 200/2004 (2008) *Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione ed il controllo di strutture fibrorinforz*

- Coutinho JS (2003) The combined benefits of CPF and RHA in improving the durability of concrete structures. *Cement and Concrete Composites* 25(1):51 – 59
- Coutinho MJARdS (1998) Melhoria da durabilidade dos betões por tratamento em cofragem. PhD thesis, Engenharia Civil. Faculdade de Engenharia. Universidade do Porto
- Cunha VMCF (2010) Steel fibre reinforced self-compacting concrete (from micromechanics to composite behavior). PhD thesis, Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, Azurém, 4800-058 Guimaraes, Portugal
- Cunha VMCF, Barros JAO, Sena-Cruz JM (2010) Pullout behavior of steel fibers in self-compacting concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering* 22(1):1–9
- DBV-Stahlfaserbeton (2001) Merkblatt stahlfaserbeton
- Djelal C, Vanhove Y, De Caro P, Magnin A (2002) Role of demoulding agents during self-compacting concrete casting in formwork. *Materials and Structures* 35(252):470–476
- Domone P (2006) Self-compacting concrete: An analysis of 11 years of case studies. *Cement and Concrete Composites* 28(2):197 – 208
- Domone PL, Jin J, Chai HW (1999) Optimum mix proportioning of self-compacting concrete. In: *Proceedings of International Conference on Innovation in Concrete Structures: Design and Construction*, Thomas Telford, pp 277–285
- Dufour F, Pijaudier-Cabot G (2005) Numerical modelling of concrete flow: homogeneous approach. *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics* 29:395–416
- Dupont D, Vandewalle L (2005) Distribution of steel fibres in rectangular sections. *Cement and Concrete Composites* 27(3):391 – 398
- EAE-2011 (2011) Instrucción de Acero Estructural EAE 2011
- Edgington J, Hannant D (1972) Steel fibre reinforced concrete. the effect on fibre orientation of compaction by vibration. *Materials and Structures* 5:41–44
- EHE-08 (2008) Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08
- Faifer M, Ottoboni R, Toscani S, Ferrara L (2011) Nondestructive testing of steel-fiber-reinforced concrete using a magnetic approach 60(5):1709–1717
- Farhat F, Nicolaidis D, Kanellopoulos A, Karihaloo B (2007) High performance fibre-reinforced cementitious composite (CARDIFRC) – Performance and application to retrofitting. *Engineering Fracture Mechanics* 74(1–2):151 – 167
- Ferrara L, Park YD, Shah SP (2007) A method for mix-design of fiber-reinforced self-compacting concrete. *Cement and Concrete Research* 37(6):957 – 971

- Ferrara L, Park Y, Shah S (2008) Correlation among fresh state behavior, fiber dispersion, and toughness properties of sfrcs. *J Mater Civ Eng* 20(7):493–501
- Ferrara L, Faifer M, Toscani S (2012) A magnetic method for non destructive monitoring of fiber dispersion and orientation in steel fiber reinforced cementitious composites—part 1: method calibration. *Materials and Structures* 45:575–589
- Ferraris CF, deLarrard NS F and; Martys (2001) Fresh concrete rheology - recent developments. In: *Materials Science of Concrete VI. Proceedings. American Ceramic Society.*, pp 215–241
- Ferraris CF, Brower LE, Banfill P, Beaupré D, Chapdelaine F, de Larrard F, Domone P, Nachbaur L, Sedran T, Wallevik O, Wallevik JE (2001) Comparison of concrete rheometers: International tests at LCPC. Tech. rep., National Institute of Standards and Technology
- Feys D, Verhoeven R, Schutter GD (2007) Evaluation of time independent rheological models applicable to fresh self-compacting concrete. *Applied Rheology* 17(5):56,244–1/56,244–10
- Feys D, Verhoeven R, Schutter GD (2009) Why is fresh self-compacting concrete shear thickening? *Cement and Concrete Research* 39(6):510 – 523
- Figueiras H, Nunes S, Coutinho JS, Figueiras J (2009) Combined effect of two sustainable technologies: Self-compacting concrete (SCC) and controlled permeability formwork (CPF). *Construction and Building Materials* 23(7):2518 – 2526
- Fortin J, Millet O, de Saxcé G (2005) Numerical simulation of granular materials by an improved discrete element method. *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 62(5):639–663
- Gagne R, Pigeon M (1990) Deicer salt scaling resistance of high-performance concrete. *ACI-SP* pp 29–44
- Garcia J (2004) Diseño de hormigones dirigido a la aplicación. Master's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya
- Garrido L (2004) Hormigones Autocompactantes, chap Introducción: Razón de ser del hormigón autocompactante, pp 5–38
- Gettu R, Barragán BE, Zerbino LAR, Cruz C, Bravo M, Bernad C (2004) Hormigones Autocompactantes, chap Repetibilidad y reproducibilidad de los ensayos para el hormigón autocompactable, pp 119–149
- Gettu R, Gardner D, Saldivar H, Barragan B (2005) Study of the distribution and orientation of fibers in sfrc specimens. *Materials and Structures* 38(275):31–37
- Gomes PCC, Gettu R, Agulló BC L And (2001) Experimental optimization of high-strength self-compacting concrete. In: *Second Int. Symp. on Self-Compacting Concrete*, pp 377–386

- Gram A, Silfwerbrand J (2011) Numerical simulation of fresh scc flow: applications. *Materials and Structures* 44:805–813
- Groth P (2000) Fibre reinforced concrete: fracture mechanics methods applied on self-compacting concrete and energetically modified binders. PhD thesis, Luleå University of Technology
- Grünewald S (2004) Performance-based design of self-compacting fibre reinforced concrete. PhD thesis, Technische Universiteit Delft
- Heirman G, Hendrickx R, Vandewalle L, Gemert DV, Feys D, Schutter GD, Desmet B, Vantomme J (2009) Integration approach of the couette inverse problem of powder type self-compacting concrete in a wide-gap concentric cylinder rheometer: Part ii. influence of mineral additions and chemical admixtures on the shear thickening flow behaviour. *Cement and Concrete Research* 39(3):171 – 181
- Hillerborg A, Modéer M, Petersson PE (1976) Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements. *Cement and Concrete Research* 6(6):773 – 781
- Hirt C, Nichols B (1981) Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *Journal of Computational Physics* 39(1):201 – 225
- Homrich JR, Naaman AE (1988) Stress-strain properties of SIFCON in uniaxial compression and tension. Tech. rep., University of Michigan
- Hoogerbrugge PJ, Koelman JMVA (1992) Simulating microscopic hydrodynamic phenomena with dissipative particle dynamics. *EPL (Europhysics Letters)* 19(3):155
- Hu C (1995) Rheologie des betons fluides. PhD thesis, L'Ecole Nationale Des Ponts Et Chaussees
- Johnston C (1996) Proportioning, mixing and placement of fibre-reinforced cements and concretes. In: Barros P, Marrs D, Cleland D (eds) *Production methods and workability of concrete*. Proceedings of the International RILEM Conference, RILEM, pp 155–180
- Khayat KH, Omran A (2007) State-of-the-art review of form pressure exerted by self-consolidating concrete. Tech. rep., Université de Sherbrooke
- Kim JH, Noemi N, Shah SP (2012) Effect of powder materials on the rheology and formwork pressure of self-consolidating concrete. *Cement and Concrete Composites* 34(6):746 – 753
- Klein NS, de la Fuente A, Aguado A, Masó D (2011) Hormigón ligero auto-compactante con fibras para rehabilitación de forjados. *Materiales de Construcción* 61(302):239–256
- Kokado T, Hosoda T, Miyagawa T, Fuji M (1997) Study on a method of obtaining yield values of fresh concrete from slump flow test. *JSCE* 37:29–42
- Kooiman AG (2000) Modelling steel fibre reinforced concrete for structural design. PhD thesis, Delft University

- Kooiman AG, der Veen CV, Djorai M (1999) Steel fibre reinforced concrete segments in the second heinenoord tunnel. In: Proceedings of the fib symposium
- Krenchel H (1975) Fibre spacing and specific fibre surface. In: Proceedings of the RILEM symposium on fibre reinforced cement and concrete, pp 66–79
- Kulasegaram S, Karihaloo BL (2012) Fibre-reinforced, self-compacting concrete flow modelled by smooth particle hydrodynamics. *Engineering and Computation Mechanics* 106(1):22–31
- Kwon SH, Phung QT, Park HY, Kim JH, Shah SP (2011) Effect of wall friction on variation of formwork pressure over time in self-consolidating concrete. *Cement and Concrete Research* 41(1):90 – 101
- König G, Kützing L (1999) Modelling the increase of ductility of HPC under compressive forces - A fracture mechanics approach. In: Third International RILEM Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cement Composites, RILEM, pp 251–259
- Lagrée PY, Staron L, Popinet S (2011) The granular column collapse as a continuum: validity of a two-dimensional Navier–Stokes model with a $\mu(I)$ -rheology. *Journal of Fluid Mechanics* 686:378–408
- Laranjeira F (2011) Design-oriented constitutive model for steel fibre reinforced concrete. PhD thesis, UPC
- Laranjeira F, Aguado A, Molins C (2010) Predicting the pullout response of inclined straight steel fibers. *Materials and Structures* 43:875–895
- Laranjeira F, Grunewald S, Walraven J, Blom C, Molins C, Aguado A (2011) Characterization of the orientation profile of steel fiber reinforced concrete. *Materials and Structures* 44(6):1093–1111
- de Larrard F, Ferraris C, Sedran T (1998) Fresh concrete: A Herschel-Bulkley material. *Materials and Structures* 31:494–498
- Lataste J, Behloul M, Breyse D (2008) Characterisation of fibres distribution in a steel fibre reinforced concrete with electrical resistivity measurements. *NDT; E International* 41(8):638 – 647
- Laure P, Silva L, Coupez T, Toussaint F (2007) Numerical modelling of concrete flow with rigid fibers. In: 10th ESAFORM conference on material forming, American Institute of Physics, vol 907, pp 1390–1395
- Lee M, Barr B (2004) A four-exponential model to describe the behaviour of fibre reinforced concrete. *Materials and Structures* 37:464–471
- Lewis RW, Navti SE, Taylor C (1997) A mixed lagrangian–eulerian approach to modelling fluid flow during mould filling. *International Journal for Numerical Methods in Fluids* 25(8):931–952
- Li V, Stang H, Krenchel H (1993) Micromechanics of crack bridging in fibre-reinforced concrete. *Materials and Structures* 26:486–494

- Luoma J, Voller V (2000) An explicit scheme for tracking the filling front during polymer mold filling. *Applied Mathematical Modelling* 24(8-9):575 – 590
- Maidl B (1995) *Steel Fibre Reinforced Concrete*. John Wiley & Sons
- Marković I (2006) High-performance hybrid-fibre concrete: development and utilisation. PhD thesis, Delft University of Technology
- Martys NS, Ferraris CF (2002) Simulation of SCC flow. In: *First North American Conference on Design and Use of Self-Consolidation Concrete.*, pp 27–30
- Maturana A (2013) Estudio teórico-experimental de la aplicabilidad del hormigón reforzado con fibras de acero a losas de forjado multidireccionales. PhD thesis
- May M (2008) Änderung des arbeitsverhaltens von stahlfaserbetonen mit hochfesten stahlfasern. Projektarbeiten, Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden
- Michels J, Waldmann D, Maas S, Zuerbes A (2012) Steel fibers as only reinforcement for flat slab construction - experimental investigation and design. *Construction and Building Materials* 26(1):145–155
- van Mier J, van Vliet M (2002) Uniaxial tension test for the determination of fracture parameters of concrete: state of the art. *Engineering Fracture Mechanics* 69(2):235 – 247
- Mlekusch B (1999) Fibre orientation in short-fibre-reinforced thermoplastics II. Quantitative measurements by image analysis. *Composites Science and Technology* 59(4):547 – 560
- Molins C, Aguado A, Saludes S (2009) Double Punch Test to control the energy dissipation in tension of FRC (Barcelona test). *Materials and Structures* 42(4):415–425
- Mora F (2008) Distribución y orientación de fibras en dovelas, aplicando el ensayo barcelona. PhD thesis, UPC
- Moreno A (2013) Diseño e implementación de un sistema de medidas para la caracterización de hormigón reforzado con fibras de acero. PFC - Universidad del País Vasco / Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU)
- Moresi L, Dufour F, Mühlhaus HB (2003) A Lagrangian integration point finite element method for large deformation modeling of viscoelastic geomaterials. *J Comput Phys* 184(2):476–497
- Mori H, Tanigawa Y (1992) Simulation methods for fluidity of fresh concrete. 71-134 44(1), Nagoya University
- Naaman A, Najm H (1991) Bond-slip mechanisms of steel fibers in concrete. *ACI Materials Journal* 88(2):135–145
- Naaman A, Reinhardt H (2006) Proposed classification of HPFRC composites based on their tensile response. *Materials and Structures* 39:547–555

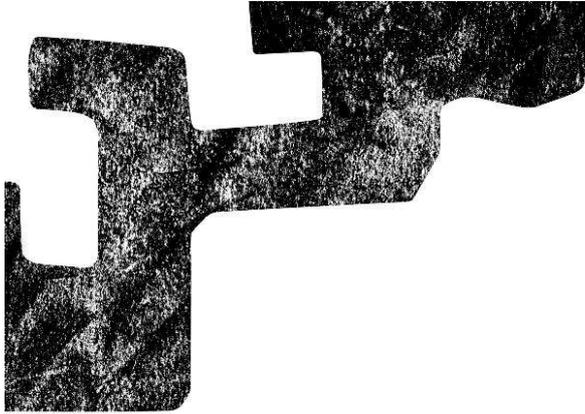
- Nemegeer D (1999) Zelfverdichtend staalvezelbeton. In: Proceedings Constructeursmiddag Betonvereniging
- Noor M, Uomoto T (1999) Three-dimensional discrete element simulation of rheology tests of self-compacting concrete. In: Å Skarendahl, Petersson O (eds) First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, RILEM, pp 35–46
- Okamura H, Ouchi M (2003) Self-compacting concrete. *Journal of advanced concrete technology* 1(1):5–15
- Orbe A, Cuadrado J, Losada R, Rojí E (2012) Framework for the design and analysis of steel fiber reinforced self-compacting concrete structures. *Construction and Building Materials* 35(0):676 – 686
- Ozawa K, Maekawa K, Kunishima M, Okamura H (1989) Development of high performance concrete based on the durability design of concrete structures. In: Proceeding of the 2nd East-Asia and Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC-2), pp 445–450
- Ozyurt N, Mason TO, Shah SP (2006a) Non-destructive monitoring of fiber orientation using AC-IS: An industrial-scale application. *Cement and Concrete Research* 36(9):1653 – 1660
- Ozyurt N, Woo LY, Mason TO, Shah SP (2006b) Monitoring fiber dispersion in fiber-reinforced cementitious materials: Comparison of ac-impedance spectroscopy and image analysis. *ACI Materials Journal* 103(5):340–347
- Papanastasiou TC (1986) Flows of materials with yield. *Journal of Rheology* 31(5):385–404
- Parmentier B, De Grove E, Vandewalle L, Van Rickstal F (2008) Dispersion of the mechanical properties of FRC investigated by different bending tests. In: Proceedings of the fib Symposium "Tailor Made Concrete Structures", fib Symposium "Tailor Made Concrete Structures", Taylor & Francis Group, pp 507–512
- Perrot A, Amziane S, Ovarlez G, Roussel N (2009) SCC formwork pressure: Influence of steel rebars. *Cement and Concrete Research* 39(6):524 – 528
- Petersson O (2003) Simulation of self-compacting concrete laboratory experiments and numerical modeling of testing methods, J-ring and L-box tests. In: Wallevik O, Nielsson I (eds) Proceedings of the third International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, pp 202–207
- Petersson O, Hakami H (2001) Simulation of SCC laboratory experiments and numerical modeling of slump flow and L-box tests. In: Ozawa K, Ouchi M (eds) Proceedings of the Second International Symposium on Self-Compacting Concrete, pp 79–88
- Petersson O, Billberg P, Van B (1996) A model for self-compacting concrete. In: Bartos P, Marrs D, Cleland D (eds) Production Methods and Workability of Concrete, Proceedings of the International RILEM conference, RILEM, 32, pp 483–492

- Popinet S (2003) Gerris: A tree-based adaptive solver for the incompressible euler equations in complex geometries. *J Comp Phys* 190:572–600
- Price W (2000) Controlled permeability formwork. Tech. rep., CIRIA
- di Prisco M, Colombo M (2006) Measuring, Monitoring and Modeling Concrete Properties, Springer, chap FRC and HPFRC composites: From constitutive behaviour to structural applications, p 10
- Pujadas P (2013) Caracterización y diseño del hormigón reforzado con fibras plásticas. PhD thesis, Universitat Politècnica de Catalunya Departament d'Enginyeria de la Construcció
- Pujadas P, blanco A, Cavalaro SHP, Aguado A (2011) Método para la caracterización multidireccional del HRF. In: científico-técnica del hormigón estructural A (ed) V Congreso de ACHE, Asociación científico-técnica del hormigón estructural, pp 289–290
- Rao CK (1979) Effectiveness of random fibres in composites. *Cement and Concrete Research* 9(6):685 – 693
- Redon C, Chermant L, Chermant JL, Coster M (1999) Automatic image analysis and morphology of fibre reinforced concrete. *Cement and Concrete Composites* 21(5-6):403 – 412
- Riba E (2005) Cálculo y elección óptima de un depósito de agua. Universitat Politècnica de Catalunya - Minor Thesis
- Robins P, Austin S, Jones P (2002) Pull-out behaviour of hooked steel fibres. *Materials and Structures* 35:434–442
- Robins P, Austin S, Jones P (2003) Spatial distribution of steel fibres in sprayed and cast concrete. *Magazine of Concrete Research* 55(3):225–235
- Roelfstra PE, Wittmann FH (1986) Fracture Toughness and Fracture Energy of Concrete, Elsevier Scientific Publishing Company, chap Numerical method to link strain softening with failure of concrete, p 163.175
- Rokugo K, Kanda T, Yokota H, Sakata N (2009) Applications and recommendations of high performance fiber reinforced cement composites with multiple fine cracking (HPFRCC) in Japan. *Materials and Structures* 42:1197–1208
- Roqueta G, Jofre L, Romeu J, Blanch S (2010) Broadband propagative microwave imaging of steel fiber reinforced concrete wall structures. *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on* 59(12):3102 –3110
- Roussel N (2006) Correlation between yield stress and slump: Comparison between numerical simulations and concrete rheometers results. *Materials and Structures* 39:501–509
- Roussel N (2007a) Rheology of fresh concrete: from measurements to predictions of casting processes. *Materials and Structures* 40:1001–1012
- Roussel N (2007b) The LCPC BOX: a cheap and simple technique for yield stress measurements of SCC. *Materials and Structures* 40:889–896

- Roussel N, Coussot P (2005) "fifty-cent rheometer" for yield stress measurements: From slump to spreading flow. *Journal of Rheology* 49(3):705–718
- Saeed K (1995) Technique of multi-step concrete mixing. *Materials and Structures* 28:230–234
- Satoh A, Majima T (2005) Comparison between theoretical values and simulation results of viscosity for the dissipative particle dynamics method. *Journal of Colloid And Interface Science* 283(1):251–266
- Schölin K (1988) Ermittlung der orientierung, menge und verteilung der fasern in faserbewehrtem beton. *Beton- und Stahlbetonbau* 63(6):168–171
- Sedran T, de Larrard F (1999) Optimization of self-compacting concrete thanks to packing model. In: Å Skarendahl, Petersson O (eds) *First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, RILEM, pp 321–332
- Self-Compacting Concrete European Project Group (2005) *The european guidelines for self-compacting concrete. specification, production and use*. Tech. rep., EFNARC
- Serna P, Arango S, Ribeiro T, Núñez A, Garcia-Taengua E (2009) Structural cast-in-place SFRC: technology, control criteria and recent applications in spain. *Materials and Structures* 42:1233–1246
- Skarendahl A (2003) The present - the future. In: Wallevik O, Nielsson I (eds) *International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, pp 6–14
- Slater E, Moni M, Alam MS (2012) Predicting the shear strength of steel fiber reinforced concrete beams. *Construction and Building Materials* 26(1):423 – 436
- Soroushian P, Lee CD (1990) Distribution and orientation of fibers in steel fiber reinforced concrete. *ACI Materials Journal* 87(5):433–439
- Stang H, Li V, Krenchel H (1995) Design and structural applications of stress-crack width relations in fibre reinforced concrete. *Materials and Structures* 28:210–219
- Stroeven P (2009) Stereological principles of spatial modeling applied to steel fiber-reinforced concrete in tension. *ACI Materisls Journal* 106(3):213 – 222
- Stroeven P, Shah SP (1978) Use of radiography-image analysis fos steel fibre reinforced concrete. In: *Proceedings of the RiLEM symposium on Testing and Test Methods of Fibre Reinforced Composites*, pp 275–288
- Stähli P, Custer R, van Mier J (2008) On flow properties, fibre distribution, fibre orientation and flexural behaviour of FRC. *Materials and Structures* 41:189–196
- Tanigawa Y, Mori H (1986) Rheological analysis of slumping behavior of fresh concrete. In: *Proceedings of the 29th Japan congress on materials research*, p 129

- Tchamba J, Amziane S, Ovarlez G, Roussel N (2008) Lateral stress exerted by fresh cement paste on formwork: Laboratory experiments. *Cement and Concrete Research* 38(4):459 – 466
- Thrane LN (2007) Form filling with self-compacting concrete. PhD thesis, Technical University of Denmark
- Tie G, Dequn L, Huamin Z (2006) Three-dimensional finite element method for the filling simulation of injection molding. *Engineering with Computers* 21:289–295
- Timoshenko S, Woinosky-Krieger S (1959) *Theory of plates and shells*. McGraw-Hill, New York
- Toralles-Carbonari BM, Gettu R, Agullo L, Carbonari G (2003) Analysis of production factors in high performance concrete. *Ciências Exatas e Tecnológicas* 24:49–58
- Torrents J, Blanco A, Pujadas P, Aguado A, Juan-García P, Sánchez-Moragues M (2012) Inductive method for assessing the amount and orientation of steel fibers in concrete. *Materials and Structures* pp 1–16
- Tschegg EK, Linsbauer HN (1986) Prüfeinrichtung zur ermittlung von bruchmechanische kennwerten sowie hierfür geeignete prüfkörper.
- Van Damme S, Franchois A, Taerwe L (2004) Comparison of two coaxial probes for the non-destructive evaluation of a steel fiber reinforced concrete layer. In: *Proc. 21st IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conf. IMTC 04*, vol 1, pp 579–582
- Vandewalle L, Heirman G, van Rickstal F (2008) Fibre orientation in self-compacting fibre reinforced concrete. In: Gettu R (ed) *BEFIB 2008: 7th RILEM International Symposium on Fibre Reinforced Concrete*, RILEM Publications SARL, pp 719–728
- Švec O, Skoček J, Stang H, Geiker MR, Roussel N (2012) Free surface flow of a suspension of rigid particles in a non-newtonian fluid: A lattice boltzmann approach. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* 179–180(0):32 – 42
- Vu-Quoc L, Zhang X, Walton O (2000) A 3-D discrete-element method for dry granular flows of ellipsoidal particles. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 187(3–4):483 – 528
- Wallevik O (2003) Rheology - a scientific approach to develop self-compacting concrete. In: Wallevik O, Nielsson I (eds) *Proceedings of the 3rd International RILEM symposium on Self-Compacting Concrete*, RILEM, pp 23–32
- Wallevik O, Gjorv O (1990) Development of a coaxial cylinder viscosimeter for fresh concrete. In: *Proceedings of the RILEM colloquium on properties of fresh concrete*, RILEM, Chapman and Hall, pp 213–224
- Wei S, Mandel JA, Said S (1986) Study of the interface strength in steel fiber-reinforced cement-based composites. *ACI Journal* 83(4):597–605

-
- Wendt JF (2009) Computational Fluid Dynamics. An introduction., 3rd edn. Springer
- Wille K, Kim DJ, Naaman AE (2011) Strain-hardening UHP-FRC with low fiber contents. *Materials and Structures* 44(3):583–598
- Wolinski S, Hordijk DA, Reinhardt HW, Cornelissen HA (1987) Influence of aggregate size on fracture mechanics parameters of concrete. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete* 9(2):95 – 103
- Yurugi M, Sakai G (1998) A proven QA system for flowable concrete. *Concrete International* 20(10):44–48
- Zerbino R, Barragán B, Garcia T, Agulló L, Gettu R (2009) Workability tests and rheological parameters in self-compacting concrete. *Materials and Structures* 42:947–960



Anejos

Velocidad de impulsos ultrasónicos

A.1. Mediciones completas

En las siguientes tablas, se resumen todas las medidas realizadas mediante el método de impulsos ultrasónicos. Como ya se ha venido comentado a lo largo del documento, los valores resultan muy dispares y no concuerdan con el resto de resultados obtenidos en base a otros métodos no destructivos. La numeración de la cuadrícula dibujada sobre le propio muro para determinar la ubicación de los puntos de posicionamiento de los palpadores se ilustra en la Figura A.1.

Sin embargo, se debe mencionar que no se ha seguido el procedimiento establecido en la norma para obtener la velocidad de los impulsos, dado que como se puede apreciar en la Figura A.2, aun cuando las mediciones entre los puntos de las cuadrículas 68 y 69 aportan valores más reducidos en tiempo, la pendiente de la línea por tanto es mayor, y la velocidad estimada menor, que la obtenida entre los puntos 71 y 72.

Las Tablas A.1 y A.2 recogen todos los datos de la medición de impulsos ultrasónicos y las velocidades estimadas como la simple división de la distancia y el tiempo transcurridos, que en muchos de los casos difieren notablemente de

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 |
| 41 | 42 | 43 | 44 | 45 | 46 | 47 | 48 | 49 | 50 | 51 | 52 | 53 | 54 | 55 | 56 | 57 | 58 | 59 | 60 |
| 61 | 62 | 63 | 64 | 65 | 66 | 67 | 68 | 69 | 70 | 71 | 72 | 73 | 74 | 75 | 76 | 77 | 78 | 79 | 80 |
| 81 | 82 | 83 | 84 | 85 | 86 | 87 | 88 | 89 | 90 | 91 | 92 | 93 | 94 | 95 | 96 | 97 | 98 | 99 | 100 |
| 101 | 102 | 103 | 104 | 105 | 106 | 107 | 108 | 109 | 110 | 111 | 112 | 113 | 114 | 115 | 116 | 117 | 118 | 119 | 120 |
| 121 | 122 | 123 | 124 | 125 | 126 | 127 | 128 | 129 | 130 | 131 | 132 | 133 | 134 | 135 | 136 | 137 | 138 | 139 | 140 |
| 141 | 142 | 143 | 144 | 145 | 146 | 147 | 148 | 149 | 150 | 151 | 152 | 153 | 154 | 155 | 156 | 157 | 158 | 159 | 160 |
| 161 | 162 | 163 | 164 | 165 | 166 | 167 | 168 | 169 | 170 | 171 | 172 | 173 | 174 | 175 | 176 | 177 | 178 | 179 | 180 |
| 181 | 182 | 183 | 184 | 185 | 186 | 187 | 188 | 189 | 190 | 191 | 192 | 193 | 194 | 195 | 196 | 197 | 198 | 199 | 200 |

(a) Medidas horizontales

(b) Medidas verticales

Figura A.1: Representación de la cuadrícula y las mediciones efectuadas.

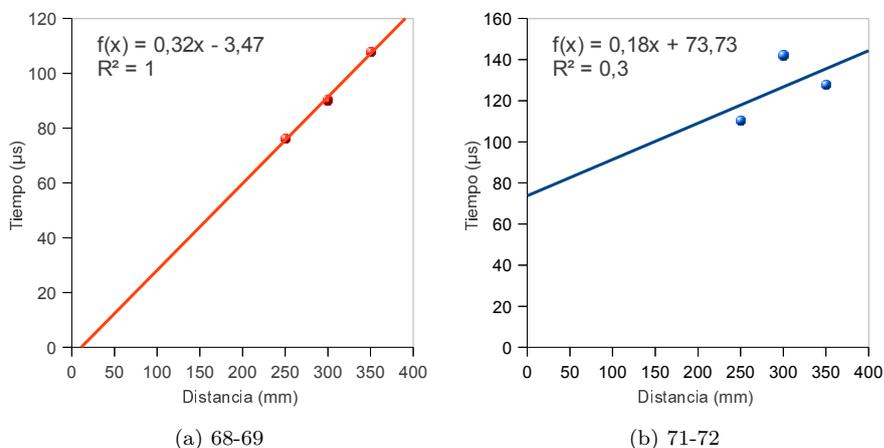


Figura A.2: Líneas de regresión que mejor se ajustan a las medidas recogidas.

las que se obtendrían según el procedimiento de la norma. También se incluye la numeración de la cuadrícula a la que corresponden y la de las probetas que posteriormente se han extraído aproximadamente de dichas ubicaciones.

| Probetas | Cuadrícula | Medición | Tiempo (μ s) | Distantzia (mm) | Velocidad (km/s) | |
|--------------|------------|----------|----------------------|--------------------|---------------------|------|
| 2-3 21-22 | 1 | 2 | 1 | 82,7 | 250 | 3,02 |
| | | | 2 | 97,2 | 300 | 3,09 |
| | | | 3 | 108,4 | 350 | 3,23 |
| | | | 4 | 85,2 | 250 | 2,93 |
| | | | 5 | 96,7 | 300 | 3,10 |
| | | | 6 | 108,6 | 350 | 3,22 |
| 4 23 | 4 | 5 | 1 | 84,4 | 250 | 2,96 |
| | | | 2 | 95,7 | 300 | 3,13 |
| | | | 3 | 92,4 | 350 | 3,79 |
| | | | 4 | 82,3 | 250 | 3,04 |
| | | | 5 | 74,0 | 300 | 4,05 |
| | | | 6 | 85,4 | 350 | 4,10 |
| 4-5 23-24 | 5 | 6 | 1 | 64,7 | 250 | 3,86 |
| | | | 2 | 90,7 | 300 | 3,31 |
| | | | 3 | 87,2 | 350 | 4,01 |
| | | | 4 | 64,6 | 250 | 3,87 |
| | | | 5 | 78,2 | 300 | 3,84 |
| | | | 6 | 85,7 | 350 | 4,08 |
| 5 24 | 6 | 7 | 1 | 101,5 | 250 | 2,46 |
| | | | 2 | 78,0 | 300 | 3,85 |
| | | | 3 | 108,7 | 350 | 3,22 |
| | | | 4 | 105,2 | 250 | 2,38 |
| | | | 5 | 94,1 | 300 | 3,19 |
| | | | 6 | 105,4 | 350 | 3,32 |

Continúa en la siguiente página

Tabla A.1 – continúa de la página anterior

| Probetas | Cuadrícula | Medición | Tiempo (μ s) | Distantzia (mm) | Velocidad (km/s) | |
|--------------------|------------|----------|----------------------|--------------------|---------------------|------|
| 5-6 24-25 | 7 | 8 | 1 | 71,2 | 250 | 3,51 |
| | | | 2 | 79,2 | 300 | 3,79 |
| | | | 3 | 89,7 | 350 | 3,90 |
| | | | 4 | 67,7 | 250 | 3,69 |
| | | | 5 | 75,7 | 300 | 3,96 |
| | | | 6 | 97,5 | 350 | 3,59 |
| 116-117 135-136 | 61 | 62 | 1 | 84,4 | 250 | 2,96 |
| | | | 2 | 76,7 | 300 | 3,91 |
| | | | 3 | 103,6 | 350 | 3,38 |
| | | | 4 | 84,2 | 250 | 2,97 |
| | | | 5 | 99,4 | 300 | 3,02 |
| | | | 6 | 110,4 | 350 | 3,17 |
| 117 136 | 62 | 63 | 1 | 94,7 | 250 | 2,64 |
| | | | 2 | 142,7 | 300 | 2,10 |
| | | | 3 | 111,2 | 350 | 3,15 |
| | | | 4 | 99,9 | 250 | 2,50 |
| | | | 5 | 115,6 | 300 | 2,60 |
| | | | 6 | 152,1 | 350 | 2,30 |
| 117-118 136-137 | 63 | 64 | 1 | 71,2 | 250 | 3,51 |
| | | | 2 | 83,6 | 300 | 3,59 |
| | | | 3 | 103,6 | 350 | 3,38 |
| | | | 4 | 66,0 | 250 | 3,79 |
| | | | 5 | 100,1 | 300 | 3,00 |
| | | | 6 | 110,2 | 350 | 3,18 |
| 118 137 | 64 | 65 | 1 | 61,6 | 250 | 4,06 |
| | | | 2 | 78,0 | 300 | 3,85 |
| | | | 3 | 95,5 | 350 | 3,66 |
| | | | 4 | 84,0 | 250 | 2,98 |
| | | | 5 | 101,2 | 300 | 2,96 |
| | | | 6 | 108,8 | 350 | 3,22 |
| 118-119 137-138 | 65 | 66 | 1 | 81,2 | 250 | 3,08 |
| | | | 2 | 79,7 | 300 | 3,76 |
| | | | 3 | 85,2 | 350 | 4,11 |
| | | | 4 | 70,3 | 250 | 3,56 |
| | | | 5 | 92,2 | 300 | 3,25 |
| | | | 6 | 112,7 | 350 | 3,11 |
| 119 138 | 66 | 67 | 1 | 71,7 | 250 | 3,49 |
| | | | 2 | 82,8 | 300 | 3,62 |
| | | | 3 | 97,7 | 350 | 3,58 |
| | | | 4 | 72,8 | 250 | 3,43 |
| | | | 5 | 86,3 | 300 | 3,48 |
| | | | 6 | 108,2 | 350 | 3,23 |
| 119-120 138-139 | 67 | 68 | 1 | 81,2 | 250 | 3,08 |
| | | | 2 | 90,2 | 300 | 3,33 |
| | | | 3 | 106,5 | 350 | 3,29 |
| | | | 4 | 83,3 | 250 | 3,00 |
| | | | 5 | 74,2 | 300 | 4,04 |
| | | | 6 | 105,6 | 350 | 3,31 |

Continúa en la siguiente página

Tabla A.1 – continúa de la página anterior

| Probetas | Cuadrícula | Medición | Tiempo (μ s) | Distantzia (mm) | Velocidad (km/s) | |
|--------------------|------------|----------|----------------------|--------------------|---------------------|------|
| 121-122 140-141 | 68 | 69 | 1 | 84,5 | 250 | 2,96 |
| | | | 2 | 96,6 | 300 | 3,11 |
| | | | 3 | 106,8 | 350 | 3,28 |
| | | | 4 | 67,8 | 250 | 3,69 |
| | | | 5 | 83,6 | 300 | 3,59 |
| | | | 6 | 108,7 | 350 | 3,22 |
| 122 141 | 69 | 70 | 1 | 82,1 | 250 | 3,05 |
| | | | 2 | 108,7 | 300 | 2,76 |
| | | | 3 | 109,5 | 350 | 3,20 |
| | | | 4 | 83,2 | 250 | 3,00 |
| | | | 5 | 124,8 | 300 | 2,40 |
| | | | 6 | 110,8 | 350 | 3,16 |
| 122-123 141-142 | 70 | 71 | 1 | 95,2 | 250 | 2,63 |
| | | | 2 | 146,8 | 300 | 2,04 |
| | | | 3 | 148,6 | 350 | 2,36 |
| | | | 4 | 117,4 | 250 | 2,13 |
| | | | 5 | 142,2 | 300 | 2,11 |
| | | | 6 | 150,1 | 350 | 2,33 |
| 124-125 143-144 | 71 | 72 | 1 | 115,2 | 250 | 2,17 |
| | | | 2 | 147,6 | 300 | 2,03 |
| | | | 3 | 107,4 | 350 | 3,26 |
| | | | 4 | 105,1 | 250 | 2,38 |
| | | | 5 | 136,6 | 300 | 2,20 |
| | | | 6 | 148,2 | 350 | 2,36 |
| 125 144 | 72 | 73 | 1 | 127,7 | 250 | 1,96 |
| | | | 2 | 150,2 | 300 | 2,00 |
| | | | 3 | 172,7 | 350 | 2,03 |
| | | | 4 | 130,5 | 250 | 1,92 |
| | | | 5 | 155,4 | 300 | 1,93 |
| | | | 6 | 174,4 | 350 | 2,01 |
| 125-126 144-145 | 73 | 74 | 1 | 84,4 | 250 | 2,96 |
| | | | 2 | 98,4 | 300 | 3,05 |
| | | | 3 | 110,5 | 350 | 3,17 |
| | | | 4 | 86,0 | 250 | 2,91 |
| | | | 5 | 98,5 | 300 | 3,05 |
| | | | 6 | 107,7 | 350 | 3,25 |
| 127-128 146-147 | 74 | 75 | 1 | 83,2 | 250 | 3,00 |
| | | | 2 | 151,3 | 300 | 1,98 |
| | | | 3 | 108,2 | 350 | 3,23 |
| | | | 4 | 100,1 | 250 | 2,50 |
| | | | 5 | 152,1 | 300 | 1,97 |
| | | | 6 | 108,6 | 350 | 3,22 |
| 129-130 148-149 | 75 | 76 | 1 | 130,2 | 250 | 1,92 |
| | | | 2 | 150,7 | 300 | 1,99 |
| | | | 3 | 173,2 | 350 | 2,02 |
| | | | 4 | 130,7 | 250 | 1,91 |
| | | | 5 | 152,2 | 300 | 1,97 |
| | | | 6 | 172,7 | 350 | 2,03 |

Continúa en la siguiente página

Tabla A.1 – continúa de la página anterior

| Probetas | Cuadrícula | Medición | Tiempo (μ s) | Distantzia (mm) | Velocidad (km/s) | |
|--------------------|------------|----------|----------------------|--------------------|---------------------|------|
| 130 149 | 76 | 77 | 1 | 86,9 | 250 | 2,88 |
| | | | 2 | 83,7 | 300 | 3,58 |
| | | | 3 | 110,0 | 350 | 3,18 |
| | | | 4 | 105,4 | 250 | 2,37 |
| | | | 5 | 101,4 | 300 | 2,96 |
| | | | 6 | 114,2 | 350 | 3,06 |
| 130-131 149-150 | 77 | 78 | 1 | 111,2 | 250 | 2,25 |
| | | | 2 | 100,6 | 300 | 2,98 |
| | | | 3 | 115,3 | 350 | 3,04 |
| | | | 4 | 77,9 | 250 | 3,21 |
| | | | 5 | 90,1 | 300 | 3,33 |
| | | | 6 | 114,3 | 350 | 3,06 |
| 131 150 | 78 | 79 | 1 | 86,7 | 250 | 2,88 |
| | | | 2 | 101,2 | 300 | 2,96 |
| | | | 3 | 111,7 | 350 | 3,13 |
| | | | 4 | 88,9 | 250 | 2,81 |
| | | | 5 | 105,7 | 300 | 2,84 |
| | | | 6 | 114,3 | 350 | 3,06 |
| 131-132 150-151 | 79 | 80 | 1 | 118,3 | 250 | 2,11 |
| | | | 2 | 137,4 | 300 | 2,18 |
| | | | 3 | 163,6 | 350 | 2,14 |
| | | | 4 | 87,5 | 250 | 2,86 |
| | | | 5 | 143,1 | 300 | 2,10 |
| | | | 6 | 154,5 | 350 | 2,27 |
| 192-193 211-212 | 101 | 102 | 1 | 64,1 | 250 | 3,90 |
| | | | 2 | 71,1 | 300 | 4,22 |
| | | | 3 | 83,1 | 350 | 4,21 |
| | | | 4 | 64,4 | 250 | 3,88 |
| | | | 5 | 81,1 | 300 | 3,70 |
| | | | 6 | 106,2 | 350 | 3,30 |
| 193 212 | 102 | 103 | 1 | 63,0 | 250 | 3,97 |
| | | | 2 | 78,7 | 300 | 3,81 |
| | | | 3 | 86,2 | 350 | 4,06 |
| | | | 4 | 64,5 | 250 | 3,88 |
| | | | 5 | 84,7 | 300 | 3,54 |
| | | | 6 | 91,9 | 350 | 3,81 |
| 193-194 212-213 | 103 | 104 | 1 | 65,0 | 250 | 3,85 |
| | | | 2 | 73,5 | 300 | 4,08 |
| | | | 3 | 84,4 | 350 | 4,15 |
| | | | 4 | 67,5 | 250 | 3,70 |
| | | | 5 | 78,2 | 300 | 3,84 |
| | | | 6 | 80,2 | 350 | 4,36 |
| 194 213 | 104 | 105 | 1 | 62,8 | 250 | 3,98 |
| | | | 2 | 73,1 | 300 | 4,10 |
| | | | 3 | 151,4 | 350 | 2,31 |
| | | | 4 | 65,2 | 250 | 3,83 |
| | | | 5 | 76,4 | 300 | 3,93 |
| | | | 6 | 89,0 | 350 | 3,93 |

Continúa en la siguiente página

Tabla A.1 – continúa de la página anterior

| Probetas | Cuadrícula | Medición | Tiempo (μ s) | Distantzia (mm) | Velocidad (km/s) | |
|--------------------|------------|----------|----------------------|--------------------|---------------------|------|
| 194-195 213-214 | 105 | 106 | 1 | 72,7 | 250 | 3,44 |
| | | | 2 | 85,0 | 300 | 3,53 |
| | | | 3 | 83,2 | 350 | 4,21 |
| | | | 4 | 64,0 | 250 | 3,91 |
| | | | 5 | 77,0 | 300 | 3,90 |
| | | | 6 | 87,1 | 350 | 4,02 |
| 195 214 | 106 | 107 | 1 | 63,2 | 250 | 3,96 |
| | | | 2 | 73,2 | 300 | 4,10 |
| | | | 3 | 89,1 | 350 | 3,93 |
| | | | 4 | 64,2 | 250 | 3,89 |
| | | | 5 | 78,6 | 300 | 3,82 |
| | | | 6 | 87,3 | 350 | 4,01 |
| 195-196 214-215 | 107 | 108 | 1 | 68,2 | 250 | 3,67 |
| | | | 2 | 72,2 | 300 | 4,16 |
| | | | 3 | 86,6 | 350 | 4,04 |
| | | | 4 | 68,3 | 250 | 3,66 |
| | | | 5 | 76,2 | 300 | 3,94 |
| | | | 6 | 83,7 | 350 | 4,18 |
| 197-198 216-217 | 108 | 109 | 1 | 61,2 | 250 | 4,08 |
| | | | 2 | 74,7 | 300 | 4,02 |
| | | | 3 | 102,2 | 350 | 3,42 |
| | | | 4 | 64,8 | 250 | 3,86 |
| | | | 5 | 75,1 | 300 | 3,99 |
| | | | 6 | 82,8 | 350 | 4,23 |
| 198 217 | 109 | 110 | 1 | 64,7 | 250 | 3,86 |
| | | | 2 | 72,2 | 300 | 4,16 |
| | | | 3 | 89,5 | 350 | 3,91 |
| | | | 4 | 64,2 | 250 | 3,89 |
| | | | 5 | 73,6 | 300 | 4,08 |
| | | | 6 | 83,5 | 350 | 4,19 |
| 198-199 217-218 | 110 | 111 | 1 | 64,7 | 250 | 3,86 |
| | | | 2 | 71,6 | 300 | 4,19 |
| | | | 3 | 82,4 | 350 | 4,25 |
| | | | 4 | 61,7 | 250 | 4,05 |
| | | | 5 | 77,7 | 300 | 3,86 |
| | | | 6 | 82,7 | 350 | 4,23 |
| 200-201 219-220 | 111 | 112 | 1 | 64,7 | 250 | 3,86 |
| | | | 2 | 75,2 | 300 | 3,99 |
| | | | 3 | 83,5 | 350 | 4,19 |
| | | | 4 | 61,0 | 250 | 4,10 |
| | | | 5 | 72,0 | 300 | 4,17 |
| | | | 6 | 82,2 | 350 | 4,26 |
| 201 220 | 112 | 113 | 1 | 84,4 | 250 | 2,96 |
| | | | 2 | 83,5 | 300 | 3,59 |
| | | | 3 | 81,7 | 350 | 4,28 |
| | | | 4 | 79,7 | 250 | 3,14 |
| | | | 5 | 66,2 | 300 | 4,53 |
| | | | 6 | 83,2 | 350 | 4,21 |

Continúa en la siguiente página

Tabla A.1 – continúa de la página anterior

| Probetas | Cuadrícula | Medición | Tiempo (μ s) | Distantzia (mm) | Velocidad (km/s) | |
|--------------------|------------|----------|----------------------|--------------------|---------------------|------|
| 201-202 220-221 | 113 | 114 | 1 | 102,2 | 250 | 2,45 |
| | | | 2 | 71,7 | 300 | 4,18 |
| | | | 3 | 85,2 | 350 | 4,11 |
| | | | 4 | 72,1 | 250 | 3,47 |
| | | | 5 | 72,5 | 300 | 4,14 |
| | | | 6 | 87,7 | 350 | 3,99 |
| 203-204 222-223 | 114 | 115 | 1 | 81,7 | 250 | 3,06 |
| | | | 2 | 95,3 | 300 | 3,15 |
| | | | 3 | 150,0 | 350 | 2,33 |
| | | | 4 | 81,2 | 250 | 3,08 |
| | | | 5 | 73,2 | 300 | 4,10 |
| | | | 6 | 89,5 | 350 | 3,91 |
| 205-206 224-225 | 115 | 116 | 1 | 66,2 | 250 | 3,78 |
| | | | 2 | 75,2 | 300 | 3,99 |
| | | | 3 | 106,1 | 350 | 3,30 |
| | | | 4 | 73,3 | 250 | 3,41 |
| | | | 5 | 77,4 | 300 | 3,88 |
| | | | 6 | 105,0 | 350 | 3,33 |
| 206 225 | 116 | 117 | 1 | 65,0 | 250 | 3,85 |
| | | | 2 | 92,3 | 300 | 3,25 |
| | | | 3 | 103,3 | 350 | 3,39 |
| | | | 4 | 81,3 | 250 | 3,08 |
| | | | 5 | 93,6 | 300 | 3,21 |
| | | | 6 | 102,6 | 350 | 3,41 |
| 206-207 225-226 | 117 | 118 | 1 | 79,8 | 250 | 3,13 |
| | | | 2 | 94,5 | 300 | 3,17 |
| | | | 3 | 103,4 | 350 | 3,38 |
| | | | 4 | 69,9 | 250 | 3,58 |
| | | | 5 | 93,8 | 300 | 3,20 |
| | | | 6 | 96,2 | 350 | 3,64 |
| 207 226 | 118 | 119 | 1 | 64,3 | 250 | 3,89 |
| | | | 2 | 97,0 | 300 | 3,09 |
| | | | 3 | 95,2 | 350 | 3,68 |
| | | | 4 | 73,2 | 250 | 3,42 |
| | | | 5 | 94,4 | 300 | 3,18 |
| | | | 6 | 95,6 | 350 | 3,66 |
| 207-208 226-227 | 119 | 120 | 1 | 69,3 | 250 | 3,61 |
| | | | 2 | 83,2 | 300 | 3,61 |
| | | | 3 | 146,3 | 350 | 2,39 |
| | | | 4 | 78,6 | 250 | 3,18 |
| | | | 5 | 80,7 | 300 | 3,72 |
| | | | 6 | 124,2 | 350 | 2,82 |
| 306-307 325-326 | 161 | 162 | 1 | 63,3 | 250 | 3,95 |
| | | | 2 | 72,7 | 300 | 4,13 |
| | | | 3 | 84,4 | 350 | 4,15 |
| | | | 4 | 66,1 | 250 | 3,78 |
| | | | 5 | 75,2 | 300 | 3,99 |
| | | | 6 | 100,3 | 350 | 3,49 |

Continúa en la siguiente página

Tabla A.1 – continúa de la página anterior

| Probetas | Cuadrícula | Medición | Tiempo (μ s) | Distantzia (mm) | Velocidad (km/s) | |
|--------------------|------------|----------|----------------------|--------------------|---------------------|------|
| 307 326 | 162 | 163 | 1 | 71,5 | 250 | 3,50 |
| | | | 2 | 79,7 | 300 | 3,76 |
| | | | 3 | 86,8 | 350 | 4,03 |
| | | | 4 | 60,3 | 250 | 4,15 |
| | | | 5 | 74,4 | 300 | 4,03 |
| | | | 6 | 85,7 | 350 | 4,08 |
| 307-308 326-327 | 163 | 164 | 1 | 68,2 | 250 | 3,67 |
| | | | 2 | 74,1 | 300 | 4,05 |
| | | | 3 | 85,2 | 350 | 4,11 |
| | | | 4 | 63,9 | 250 | 3,91 |
| | | | 5 | 75,6 | 300 | 3,97 |
| | | | 6 | 85,3 | 350 | 4,10 |
| 308 327 | 164 | 165 | 1 | 61,2 | 250 | 4,08 |
| | | | 2 | 71,6 | 300 | 4,19 |
| | | | 3 | 82,1 | 350 | 4,26 |
| | | | 4 | 62,7 | 250 | 3,99 |
| | | | 5 | 70,0 | 300 | 4,29 |
| | | | 6 | 81,8 | 350 | 4,28 |
| 308-309 327-328 | 165 | 166 | 1 | 60,7 | 250 | 4,12 |
| | | | 2 | 69,9 | 300 | 4,29 |
| | | | 3 | 81,2 | 350 | 4,31 |
| | | | 4 | 60,3 | 250 | 4,15 |
| | | | 5 | 70,4 | 300 | 4,26 |
| | | | 6 | 82,2 | 350 | 4,26 |
| 309 328 | 166 | 167 | 1 | 60,8 | 250 | 4,11 |
| | | | 2 | 72,2 | 300 | 4,16 |
| | | | 3 | 81,2 | 350 | 4,31 |
| | | | 4 | 62,0 | 250 | 4,03 |
| | | | 5 | 71,9 | 300 | 4,17 |
| | | | 6 | 83,3 | 350 | 4,20 |
| 309-310 328-329 | 167 | 168 | 1 | 61,7 | 250 | 4,05 |
| | | | 2 | 69,3 | 300 | 4,33 |
| | | | 3 | 82,3 | 350 | 4,25 |
| | | | 4 | 59,4 | 250 | 4,21 |
| | | | 5 | 70,7 | 300 | 4,24 |
| | | | 6 | 81,5 | 350 | 4,29 |
| 311-312 330-331 | 168 | 169 | 1 | 59,6 | 250 | 4,19 |
| | | | 2 | 74,3 | 300 | 4,04 |
| | | | 3 | 105,7 | 350 | 3,31 |
| | | | 4 | 66,0 | 250 | 3,79 |
| | | | 5 | 75,2 | 300 | 3,99 |
| | | | 6 | 106,2 | 350 | 3,30 |
| 312 331 | 169 | 170 | 1 | 60,7 | 250 | 4,12 |
| | | | 2 | 69,2 | 300 | 4,34 |
| | | | 3 | 81,3 | 350 | 4,31 |
| | | | 4 | 61,4 | 250 | 4,07 |
| | | | 5 | 70,7 | 300 | 4,24 |
| | | | 6 | 85,4 | 350 | 4,10 |

Continúa en la siguiente página

Tabla A.1 – continúa de la página anterior

| Probetas | Cuadrícula | Medición | Tiempo (μ s) | Distantzia (mm) | Velocidad (km/s) | |
|--------------------|------------|----------|----------------------|--------------------|---------------------|------|
| 312-313 331-332 | 170 | 171 | 1 | 84,2 | 250 | 2,97 |
| | | | 2 | 83,7 | 300 | 3,58 |
| | | | 3 | 96,9 | 350 | 3,61 |
| | | | 4 | 73,6 | 250 | 3,40 |
| | | | 5 | 84,2 | 300 | 3,56 |
| | | | 6 | 108,7 | 350 | 3,22 |
| 314-315 333-334 | 171 | 172 | 1 | 69,8 | 250 | 3,58 |
| | | | 2 | 71,2 | 300 | 4,21 |
| | | | 3 | 82,6 | 350 | 4,24 |
| | | | 4 | 60,4 | 250 | 4,14 |
| | | | 5 | 70,8 | 300 | 4,24 |
| | | | 6 | 82,1 | 350 | 4,26 |
| 315 334 | 172 | 173 | 1 | 83,6 | 250 | 2,99 |
| | | | 2 | 74,4 | 300 | 4,03 |
| | | | 3 | 112,2 | 350 | 3,12 |
| | | | 4 | 84,2 | 250 | 2,97 |
| | | | 5 | 74,7 | 300 | 4,02 |
| | | | 6 | 111,2 | 350 | 3,15 |
| 315-316 334-335 | 173 | 174 | 1 | 79,7 | 250 | 3,14 |
| | | | 2 | 87,1 | 300 | 3,44 |
| | | | 3 | 90,2 | 350 | 3,88 |
| | | | 4 | 83,6 | 250 | 2,99 |
| | | | 5 | 72,9 | 300 | 4,12 |
| | | | 6 | 91,9 | 350 | 3,81 |
| 317-318 336-337 | 174 | 175 | 1 | 70,4 | 250 | 3,55 |
| | | | 2 | 93,4 | 300 | 3,21 |
| | | | 3 | 105,6 | 350 | 3,31 |
| | | | 4 | 70,2 | 250 | 3,56 |
| | | | 5 | 93,4 | 300 | 3,21 |
| | | | 6 | 103,8 | 350 | 3,37 |
| 319-320 338-339 | 175 | 176 | 1 | 83,4 | 250 | 3,00 |
| | | | 2 | 92,7 | 300 | 3,24 |
| | | | 3 | 108,2 | 350 | 3,23 |
| | | | 4 | 83,2 | 250 | 3,00 |
| | | | 5 | 96,2 | 300 | 3,12 |
| | | | 6 | 110,9 | 350 | 3,16 |
| 320 339 | 176 | 177 | 1 | 80,9 | 250 | 3,09 |
| | | | 2 | 94,6 | 300 | 3,17 |
| | | | 3 | 106,5 | 350 | 3,29 |
| | | | 4 | 65,6 | 250 | 3,81 |
| | | | 5 | 90,5 | 300 | 3,31 |
| | | | 6 | 125,1 | 350 | 2,80 |
| 320-321 339-340 | 177 | 178 | 1 | 81,5 | 250 | 3,07 |
| | | | 2 | 93,7 | 300 | 3,20 |
| | | | 3 | 150,7 | 350 | 2,32 |
| | | | 4 | 83,4 | 250 | 3,00 |
| | | | 5 | 93,5 | 300 | 3,21 |
| | | | 6 | 149,8 | 350 | 2,34 |

Continúa en la siguiente página

Tabla A.1 – continúa de la página anterior

| Probetas | Cuadrícula | Medición | Tiempo (μs) | Distantzia (mm) | Velocidad (km/s) | |
|--------------------|------------|----------|-----------------------------|--------------------|---------------------|------|
| 321 340 | 178 | 179 | 1 | 78,5 | 250 | 3,18 |
| | | | 2 | 147,5 | 300 | 2,03 |
| | | | 3 | 108,8 | 350 | 3,22 |
| | | | 4 | 77,7 | 250 | 3,22 |
| | | | 5 | 99,1 | 300 | 3,03 |
| | | | 6 | 110,1 | 350 | 3,18 |
| 321-322 340-341 | 179 | 180 | 1 | 101,3 | 250 | 2,47 |
| | | | 2 | 88,1 | 300 | 3,41 |
| | | | 3 | 140,5 | 350 | 2,49 |
| | | | 4 | 91,3 | 250 | 2,74 |
| | | | 5 | 88,0 | 300 | 3,41 |
| | | | 6 | 119,7 | 350 | 2,92 |
| 344-345 363-364 | 181 | 182 | 1 | | 250 | N/A |
| | | | 2 | 0,0 | 300 | N/A |
| | | | 3 | 140,2 | 350 | 2,50 |
| | | | 4 | | 250 | N/A |
| | | | 5 | 90,2 | 300 | 3,33 |
| | | | 6 | 104,2 | 350 | 3,36 |
| 345 364 | 182 | 183 | 1 | 0,0 | 250 | N/A |
| | | | 2 | 0,0 | 300 | N/A |
| | | | 3 | 166,3 | 350 | 2,10 |
| | | | 4 | 0,0 | 250 | N/A |
| | | | 5 | 0,0 | 300 | N/A |
| | | | 6 | 164,7 | 350 | 2,13 |
| 345-346 364-365 | 183 | 184 | 1 | 127,2 | 250 | 1,97 |
| | | | 2 | 132,1 | 300 | 2,27 |
| | | | 3 | 163,7 | 350 | 2,14 |
| | | | 4 | 126,2 | 250 | 1,98 |
| | | | 5 | 92,2 | 300 | 3,25 |
| | | | 6 | 145,2 | 350 | 2,41 |
| 346 365 | 184 | 185 | 1 | 106,6 | 250 | 2,35 |
| | | | 2 | 128,6 | 300 | 2,33 |
| | | | 3 | 0,0 | 350 | N/A |
| | | | 4 | | 250 | N/A |
| | | | 5 | | 300 | N/A |
| | | | 6 | | 350 | N/A |

Tabla A.1: Medidas completas del ensayo mediante pulsos ultrasónicos (dirección horizontal).

| Probetas | Cuadrícula | Medición | Tiempo (μs) | Distantzia (mm) | Velocidad (km/s) | |
|----------|------------|----------|-----------------------------|--------------------|---------------------|------|
| 22-41 | 2 | 22 | 1 | 83,7 | 250 | 2,99 |
| | | | 2 | 144,0 | 300 | 2,08 |
| | | | 3 | 170,2 | 350 | 2,06 |
| | | | 4 | 124,9 | 250 | 2,00 |
| | | | 5 | 113,2 | 300 | 2,65 |
| | | | 6 | 174,2 | 350 | 2,01 |

Continúa en la siguiente página

Tabla A.2 – continúa de la página anterior

| Probetas | Cuadrícula | Medición | Tiempo (μ s) | Distantzia (mm) | Velocidad (km/s) | |
|----------|------------|----------|----------------------|--------------------|---------------------|------|
| 60-79 | 22 | 42 | 1 | 87,2 | 250 | 2,87 |
| | | | 2 | 150,7 | 300 | 1,99 |
| | | | 3 | 108,5 | 350 | 3,23 |
| | | | 4 | 104,2 | 250 | 2,40 |
| | | | 5 | 104,6 | 300 | 2,87 |
| | | | 6 | 149,3 | 350 | 2,34 |
| 98-117 | 42 | 62 | 1 | 116,3 | 250 | 2,15 |
| | | | 2 | 147,0 | 300 | 2,04 |
| | | | 3 | 179,3 | 350 | 1,95 |
| | | | 4 | 94,7 | 250 | 2,64 |
| | | | 5 | 144,6 | 300 | 2,07 |
| | | | 6 | 173,7 | 350 | 2,01 |
| 136-155 | 62 | 82 | 1 | 79,5 | 250 | 3,14 |
| | | | 2 | 89,3 | 300 | 3,36 |
| | | | 3 | 145,6 | 350 | 2,40 |
| | | | 4 | 114,1 | 250 | 2,19 |
| | | | 5 | 96,7 | 300 | 3,10 |
| | | | 6 | 110,4 | 350 | 3,17 |
| 174-193 | 82 | 102 | 1 | 83,7 | 250 | 2,99 |
| | | | 2 | 100,2 | 300 | 2,99 |
| | | | 3 | 119,5 | 350 | 2,93 |
| | | | 4 | 88,1 | 250 | 2,84 |
| | | | 5 | 101,0 | 300 | 2,97 |
| | | | 6 | 117,7 | 350 | 2,97 |
| 212-231 | 102 | 122 | 1 | 65,7 | 250 | 3,81 |
| | | | 2 | 86,6 | 300 | 3,46 |
| | | | 3 | 108,6 | 350 | 3,22 |
| | | | 4 | 84,0 | 250 | 2,98 |
| | | | 5 | 90,9 | 300 | 3,30 |
| | | | 6 | 109,6 | 350 | 3,19 |
| 250-269 | 122 | 142 | 1 | 107,3 | 250 | 2,33 |
| | | | 2 | 97,8 | 300 | 3,07 |
| | | | 3 | 114,5 | 350 | 3,06 |
| | | | 4 | 69,0 | 250 | 3,62 |
| | | | 5 | 97,5 | 300 | 3,08 |
| | | | 6 | 110,6 | 350 | 3,16 |
| 288-307 | 142 | 162 | 1 | 74,7 | 250 | 3,35 |
| | | | 2 | 83,5 | 300 | 3,59 |
| | | | 3 | 109,2 | 350 | 3,21 |
| | | | 4 | 65,4 | 250 | 3,82 |
| | | | 5 | 80,8 | 300 | 3,71 |
| | | | 6 | 106,2 | 350 | 3,30 |
| 326-345 | 162 | 182 | 1 | 60,7 | 250 | 4,12 |
| | | | 2 | 131,1 | 300 | 2,29 |
| | | | 3 | 104,4 | 350 | 3,35 |
| | | | 4 | 58,2 | 250 | 4,30 |
| | | | 5 | 108,1 | 300 | 2,78 |
| | | | 6 | 97,6 | 350 | 3,59 |

Continúa en la siguiente página

Tabla A.2 – continúa de la página anterior

| Probetas | Cuadrícula | Medición | Tiempo (μ s) | Distantzia (mm) | Velocidad (km/s) | |
|--------------------|------------|----------|----------------------|--------------------|---------------------|------|
| 25-44 26-45 | 8 | 28 | 1 | 74,5 | 250 | 3,36 |
| | | | 2 | 74,6 | 300 | 4,02 |
| | | | 3 | 83,8 | 350 | 4,18 |
| | | | 4 | 80,6 | 250 | 3,10 |
| | | | 5 | 78,9 | 300 | 3,80 |
| | | | 6 | 86,1 | 350 | 4,07 |
| 63-82 64-83 | 28 | 48 | 1 | 77,5 | 250 | 3,23 |
| | | | 2 | 81,7 | 300 | 3,67 |
| | | | 3 | 91,2 | 350 | 3,84 |
| | | | 4 | 70,2 | 250 | 3,56 |
| | | | 5 | 80,7 | 300 | 3,72 |
| | | | 6 | 81,7 | 350 | 4,28 |
| 101-120 102-121 | 48 | 68 | 1 | 62,2 | 250 | 4,02 |
| | | | 2 | 73,4 | 300 | 4,09 |
| | | | 3 | 81,2 | 350 | 4,31 |
| | | | 4 | 61,7 | 250 | 4,05 |
| | | | 5 | 72,3 | 300 | 4,15 |
| | | | 6 | 82,7 | 350 | 4,23 |
| 139-158 140-159 | 68 | 88 | 1 | 64,4 | 250 | 3,88 |
| | | | 2 | 76,5 | 300 | 3,92 |
| | | | 3 | 82,6 | 350 | 4,24 |
| | | | 4 | 67,0 | 250 | 3,73 |
| | | | 5 | 75,2 | 300 | 3,99 |
| | | | 6 | | 350 | N/A |
| 177-196 178-197 | 88 | 108 | 1 | 69,7 | 250 | 3,59 |
| | | | 2 | 74,0 | 300 | 4,05 |
| | | | 3 | 89,8 | 350 | 3,90 |
| | | | 4 | 82,2 | 250 | 3,04 |
| | | | 5 | 74,3 | 300 | 4,04 |
| | | | 6 | 81,3 | 350 | 4,31 |
| 215-234 216-235 | 108 | 128 | 1 | 67,7 | 250 | 3,69 |
| | | | 2 | 73,2 | 300 | 4,10 |
| | | | 3 | 81,5 | 350 | 4,29 |
| | | | 4 | 63,5 | 250 | 3,94 |
| | | | 5 | 66,4 | 300 | 4,52 |
| | | | 6 | 86,6 | 350 | 4,04 |
| 253-272 254-273 | 128 | 148 | 1 | 66,1 | 250 | 3,78 |
| | | | 2 | 73,3 | 300 | 4,09 |
| | | | 3 | 82,7 | 350 | 4,23 |
| | | | 4 | 64,4 | 250 | 3,88 |
| | | | 5 | 74,4 | 300 | 4,03 |
| | | | 6 | 84,2 | 350 | 4,16 |
| 291-310 292-311 | 148 | 168 | 1 | 62,7 | 250 | 3,99 |
| | | | 2 | 88,6 | 300 | 3,39 |
| | | | 3 | 104,2 | 350 | 3,36 |
| | | | 4 | 61,2 | 250 | 4,08 |
| | | | 5 | 80,7 | 300 | 3,72 |
| | | | 6 | 92,4 | 350 | 3,79 |

Continúa en la siguiente página

Tabla A.2 – continúa de la página anterior

| Probetas | Cuadrícula | Medición | Tiempo (μ s) | Distantzia (mm) | Velocidad (km/s) | |
|--------------------|------------|----------|----------------------|--------------------|---------------------|------|
| 329-348 330-349 | 168 | 188 | 1 | 61,5 | 250 | 4,07 |
| | | | 2 | 75,8 | 300 | 3,96 |
| | | | 3 | 91,3 | 350 | 3,83 |
| | | | 4 | 68,7 | 250 | 3,64 |
| | | | 5 | 78,9 | 300 | 3,80 |
| | | | 6 | 92,2 | 350 | 3,80 |
| 28-47 29-48 | 11 | 31 | 1 | 134,5 | 250 | 1,86 |
| | | | 2 | 155,3 | 300 | 1,93 |
| | | | 3 | 184,2 | 350 | 1,90 |
| | | | 4 | 132,9 | 250 | 1,88 |
| | | | 5 | 138,4 | 300 | 2,17 |
| | | | 6 | 176,3 | 350 | 1,99 |
| 66-85 67-86 | 31 | 51 | 1 | 114,3 | 250 | 2,19 |
| | | | 2 | 130,8 | 300 | 2,29 |
| | | | 3 | 106,7 | 350 | 3,28 |
| | | | 4 | 99,6 | 250 | 2,51 |
| | | | 5 | 104,5 | 300 | 2,87 |
| | | | 6 | 120,6 | 350 | 2,90 |
| 104-123 105-124 | 51 | 71 | 1 | 102,0 | 250 | 2,45 |
| | | | 2 | 133,3 | 300 | 2,25 |
| | | | 3 | 170,9 | 350 | 2,05 |
| | | | 4 | 112,0 | 250 | 2,23 |
| | | | 5 | 137,2 | 300 | 2,19 |
| | | | 6 | 148,2 | 350 | 2,36 |
| 142-161 143-162 | 71 | 91 | 1 | 111,1 | 250 | 2,25 |
| | | | 2 | 125,2 | 300 | 2,40 |
| | | | 3 | 139,7 | 350 | 2,51 |
| | | | 4 | 108,6 | 250 | 2,30 |
| | | | 5 | 111,7 | 300 | 2,69 |
| | | | 6 | 152,3 | 350 | 2,30 |
| 180-199 181-200 | 91 | 111 | 1 | 116,9 | 250 | 2,14 |
| | | | 2 | 112,0 | 300 | 2,68 |
| | | | 3 | 160,4 | 350 | 2,18 |
| | | | 4 | 122,2 | 250 | 2,05 |
| | | | 5 | 116,5 | 300 | 2,58 |
| | | | 6 | 114,5 | 350 | 3,06 |
| 218-237 219-238 | 111 | 131 | 1 | 94,2 | 250 | 2,65 |
| | | | 2 | 114,3 | 300 | 2,62 |
| | | | 3 | 114,3 | 350 | 3,06 |
| | | | 4 | 74,9 | 250 | 3,34 |
| | | | 5 | 99,9 | 300 | 3,00 |
| | | | 6 | 114,4 | 350 | 3,06 |
| 256-275 257-276 | 131 | 151 | 1 | 84,2 | 250 | 2,97 |
| | | | 2 | 124,1 | 300 | 2,42 |
| | | | 3 | 110,6 | 350 | 3,16 |
| | | | 4 | 93,2 | 250 | 2,68 |
| | | | 5 | 143,9 | 300 | 2,08 |
| | | | 6 | 111,9 | 350 | 3,13 |

Continúa en la siguiente página

Tabla A.2 – continúa de la página anterior

| Probetas | Cuadrícula | Medición | Tiempo (μ s) | Distantzia (mm) | Velocidad (km/s) | |
|--------------------|------------|----------|----------------------|--------------------|---------------------|------|
| 294-313 295-314 | 151 | 171 | 1 | 119,9 | 250 | 2,09 |
| | | | 2 | 98,2 | 300 | 3,05 |
| | | | 3 | 150,2 | 350 | 2,33 |
| | | | 4 | 116,8 | 250 | 2,14 |
| | | | 5 | 150,0 | 300 | 2,00 |
| | | | 6 | 104,2 | 350 | 3,36 |
| 332-351 333-352 | 171 | 191 | 1 | 82,6 | 250 | 3,03 |
| | | | 2 | 136,2 | 300 | 2,20 |
| | | | 3 | 103,1 | 350 | 3,39 |
| | | | 4 | 82,7 | 250 | 3,02 |
| | | | 5 | 131,2 | 300 | 2,29 |
| | | | 6 | 106,3 | 350 | 3,29 |
| 35-54 | 16 | 36 | 1 | 129,3 | 250 | 1,93 |
| | | | 2 | 153,7 | 300 | 1,95 |
| | | | 3 | 152,5 | 350 | 2,30 |
| | | | 4 | 123,2 | 250 | 2,03 |
| | | | 5 | 142,1 | 300 | 2,11 |
| | | | 6 | 114,5 | 350 | 3,06 |
| 73-92 | 36 | 56 | 1 | 133,5 | 250 | 1,87 |
| | | | 2 | 113,9 | 300 | 2,63 |
| | | | 3 | 170,9 | 350 | 2,05 |
| | | | 4 | 132,1 | 250 | 1,89 |
| | | | 5 | 99,8 | 300 | 3,01 |
| | | | 6 | 171,4 | 350 | 2,04 |
| 111-130 | 56 | 76 | 1 | 100,2 | 250 | 2,50 |
| | | | 2 | 121,3 | 300 | 2,47 |
| | | | 3 | 149,7 | 350 | 2,34 |
| | | | 4 | 66,7 | 250 | 3,75 |
| | | | 5 | 82,2 | 300 | 3,65 |
| | | | 6 | 103,7 | 350 | 3,38 |
| 149-168 | 76 | 96 | 1 | 105,8 | 250 | 2,36 |
| | | | 2 | 97,5 | 300 | 3,08 |
| | | | 3 | 163,8 | 350 | 2,14 |
| | | | 4 | 106,2 | 250 | 2,35 |
| | | | 5 | 98,4 | 300 | 3,05 |
| | | | 6 | 112,1 | 350 | 3,12 |
| 187-206 | 96 | 116 | 1 | 87,2 | 250 | 2,87 |
| | | | 2 | 105,7 | 300 | 2,84 |
| | | | 3 | 127,7 | 350 | 2,74 |
| | | | 4 | 81,7 | 250 | 3,06 |
| | | | 5 | 121,2 | 300 | 2,48 |
| | | | 6 | 111,6 | 350 | 3,14 |
| 225-244 | 116 | 136 | 1 | 131,2 | 250 | 1,91 |
| | | | 2 | 148,2 | 300 | 2,02 |
| | | | 3 | 192,5 | 350 | 1,82 |
| | | | 4 | 120,3 | 250 | 2,08 |
| | | | 5 | 147,4 | 300 | 2,04 |
| | | | 6 | 171,7 | 350 | 2,04 |

Continúa en la siguiente página

Tabla A.2 – continúa de la página anterior

| Probetas | Cuadrícula | Medición | Tiempo (μs) | Distantzia (mm) | Velocidad (km/s) | |
|----------|------------|----------|-----------------------------|--------------------|---------------------|------|
| 263-282 | 136 | 156 | 1 | 127,3 | 250 | 1,96 |
| | | | 2 | 161,2 | 300 | 1,86 |
| | | | 3 | 206,7 | 350 | 1,69 |
| | | | 4 | 139,2 | 250 | 1,80 |
| | | | 5 | 162,0 | 300 | 1,85 |
| | | | 6 | 204,6 | 350 | 1,71 |
| 301-320 | 156 | 176 | 1 | 122,3 | 250 | 2,04 |
| | | | 2 | 154,8 | 300 | 1,94 |
| | | | 3 | 180,2 | 350 | 1,94 |
| | | | 4 | 120,2 | 250 | 2,08 |
| | | | 5 | 151,7 | 300 | 1,98 |
| | | | 6 | 175,3 | 350 | 2,00 |
| 339-358 | 176 | 196 | 1 | 106,4 | 250 | 2,35 |
| | | | 2 | 138,9 | 300 | 2,16 |
| | | | 3 | 176,9 | 350 | 1,98 |
| | | | 4 | 116,1 | 250 | 2,15 |
| | | | 5 | 150,2 | 300 | 2,00 |
| | | | 6 | 173,3 | 350 | 2,02 |

Tabla A.2: Medidas completas del ensayo mediante pulsos ultrasónicos (dirección vertical).

Método magnético

B.1. Resultados completos del método magnético

En el presente apartado se recopilan las mediciones realizadas a las probetas, bien sean éstas cúbicas o prismáticas. Como ya se ha expuesto en el Apartado 5.4, en el caso de las probetas cúbicas se han realizado tres mediciones, una por cada eje principal; mientras que en la probetas prismáticas, únicamente se puede medir la dirección longitudinal, correspondiente al eje X, en cada uno de los cuartos que conforman el mismo.

Posteriormente, se han vuelto a realizar diversas medidas en las probetas cúbicas con diversos equipos y bobinas con el fin de contrastar la relación entre los valores en función de la variación de los parámetros del estudio. Se debe destacar, que las mediciones sucesivas con todas las bobinas no se han podido realizar en la totalidad de las probetas, puesto que varias de ellas se habían empleado para realizar ensayos destructivos y, por tanto, han resultado inservibles para las posteriores mediciones.

| N° | Bobina 1 | | | Bobina 2 | | | Bobina 3 | | |
|----|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | ΔLx (H) | ΔLy (H) | ΔLz (H) | ΔLx (H) | ΔLy (H) | ΔLz (H) | ΔLx (H) | ΔLy (H) | ΔLz (H) |
| 1 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,00 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 2 | 0,000 | 0,000 | 0,008 | 0,00 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 14 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,00 | 0,030 | 0,002 | 0,001 | 0,01 | N/A |
| 15 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,00 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 18 | 0,000 | 0,009 | 0,000 | 0,00 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 20 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,00 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 21 | 0,047 | 0,002 | 0,000 | 0,02 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 26 | N/A | N/A | N/A | 0,026 | 0,001 | 0,000 | 0,01 | N/A | N/A |
| 28 | 0,000 | 0,000 | 0,002 | 0,00 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 31 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,00 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 32 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,00 | 0,006 | 0,001 | 0,001 | 0,00 | -0,006 |
| 33 | 0,000 | 0,001 | 0,001 | 0,00 | 0,025 | 0,015 | 0,059 | 0,03 | -0,006 |
| 37 | 0,027 | 0,008 | 0,008 | 0,01 | N/A | N/A | N/A | N/A | 0 |
| 39 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,00 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 40 | 0,105 | 0,009 | 0,012 | 0,04 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 44 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,00 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 45 | N/A | N/A | N/A | 0,070 | 0,051 | 0,023 | 0,05 | 0,003 | 0,003 |
| 47 | 0,001 | 0,004 | 0,000 | 0,00 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 48 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,00 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 50 | 0,000 | 0,001 | 0,000 | 0,00 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 51 | 0,001 | 0,001 | 0,004 | 0,00 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 52 | 0,000 | 0,000 | 0,001 | 0,00 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 53 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,00 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 56 | 0,029 | 0,010 | 0,007 | 0,02 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 58 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,00 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 59 | 0,118 | 0,026 | 0,045 | 0,06 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 63 | 0,205 | 0,071 | 0,143 | 0,14 | 0,242 | 0,131 | 0,148 | 0,17 | 0,131 |
| 64 | N/A | N/A | N/A | N/A | 0,244 | 0,080 | 0,111 | 0,15 | N/A |
| 66 | 0,093 | 0,033 | 0,061 | 0,06 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 67 | 0,067 | 0,031 | 0,039 | 0,05 | 0,072 | 0,008 | 0,034 | 0,04 | 0,045 |
| 69 | 0,020 | 0,012 | 0,010 | 0,01 | 0,028 | 0,007 | 0,005 | 0,01 | 0,008 |
| 70 | N/A | N/A | N/A | N/A | 0,021 | 0,029 | 0,027 | 0,03 | N/A |
| 71 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,00 | 0,040 | 0,042 | 0,012 | 0,03 | 0,011 |
| 72 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,00 | 0,038 | 0,026 | 0,007 | 0,02 | -0,008 |
| 75 | 0,036 | 0,011 | 0,004 | 0,02 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 77 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,00 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 78 | 0,165 | 0,075 | 0,182 | 0,14 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 82 | 0,661 | 0,229 | 0,411 | 0,43 | 0,742 | 0,293 | 0,487 | 0,51 | 0,433 |
| 83 | N/A | N/A | N/A | N/A | 0,762 | 0,174 | 0,359 | 0,43 | 0,276 |
| 85 | 0,299 | 0,104 | 0,255 | 0,22 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 88 | 0,113 | 0,047 | 0,074 | 0,08 | 0,146 | 0,059 | 0,109 | 0,11 | 0,075 |
| 89 | 0,076 | 0,039 | 0,039 | 0,05 | 0,101 | 0,054 | 0,084 | 0,08 | 0,043 |

Continúa en la siguiente página

Tabla B.1 – continúa de la página anterior

| N° | Bobina 1 | | | Bobina 2 | | | Bobina 3 | | | |
|-----|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | ΔL_x (H) | ΔL_y (H) | ΔL_z (H) | ΔL_x (H) | ΔL_y (H) | ΔL_z (H) | ΔL_x (H) | ΔL_y (H) | ΔL_z (H) | ΔL_m (H) |
| 90 | 0.034 | 0.014 | 0.021 | 0.078 | 0.047 | 0.037 | 0.05 | 0.007 | 0.008 | 0.01 |
| 94 | 0.066 | 0.011 | 0.005 | N/A |
| 95 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | N/A |
| 96 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | N/A |
| 97 | 0.356 | 0.231 | 0.372 | N/A |
| 101 | 1.085 | 0.413 | 0.532 | 1.203 | 0.460 | 0.594 | 0.75 | 0.283 | 0.358 | 0.46 |
| 102 | 0.719 | N/A | N/A | 0.967 | 0.319 | 0.540 | 0.61 | N/A | N/A | N/A |
| 104 | 0.680 | 0.183 | 0.297 | 0.737 | 0.186 | 0.320 | 0.41 | 0.125 | 0.198 | 0.26 |
| 105 | 0.218 | 0.076 | 0.148 | 0.15 | 0.284 | 0.097 | 0.146 | 0.147 | 0.049 | 0.092 |
| 107 | 0.212 | 0.055 | 0.122 | 0.13 | 0.274 | 0.087 | 0.125 | 0.140 | 0.034 | 0.079 |
| 108 | 0.227 | 0.067 | 0.124 | 0.14 | 0.294 | 0.107 | 0.186 | 0.149 | 0.040 | 0.083 |
| 109 | 0.177 | 0.048 | 0.130 | 0.12 | 0.229 | 0.070 | 0.165 | 0.113 | 0.038 | 0.076 |
| 110 | 0.006 | 0.008 | 0.007 | 0.01 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 113 | 0.001 | 0.001 | 0.003 | 0.00 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 114 | 0.441 | 0.313 | 0.676 | 0.48 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 116 | 0.821 | 0.217 | 0.328 | 0.46 | 0.933 | 0.238 | 0.341 | 0.549 | 0.142 | 0.206 |
| 120 | 0.902 | 0.342 | 0.636 | 0.63 | 1.001 | 0.375 | 0.703 | 0.608 | 0.230 | 0.424 |
| 121 | 0.815 | 0.273 | 0.404 | 0.50 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 123 | 0.680 | 0.270 | 0.545 | 0.50 | 0.780 | 0.320 | 0.620 | 0.473 | 0.180 | 0.383 |
| 124 | 0.354 | 0.159 | 0.352 | 0.29 | 0.405 | 0.215 | 0.402 | 0.228 | 0.108 | 0.231 |
| 126 | 0.342 | 0.178 | 0.357 | 0.29 | 0.348 | 0.197 | 0.358 | 0.221 | 0.114 | 0.233 |
| 127 | 0.388 | 0.178 | 0.354 | 0.31 | 0.455 | 0.185 | 0.390 | 0.255 | 0.134 | 0.232 |
| 128 | 0.348 | 0.144 | 0.330 | 0.27 | 0.412 | 0.135 | 0.372 | 0.232 | 0.105 | 0.216 |
| 129 | 0.064 | 0.014 | 0.017 | 0.03 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 132 | 0.642 | 0.404 | 0.617 | 0.55 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 135 | 0.878 | 0.199 | 0.456 | 0.51 | 0.928 | 0.238 | 0.488 | 0.591 | 0.134 | 0.296 |
| 139 | 1.282 | 0.225 | 0.421 | 0.64 | 1.378 | 0.258 | 0.413 | 0.872 | 0.147 | 0.279 |
| 140 | 1.023 | 0.363 | 0.500 | 0.63 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 142 | N/A | N/A | N/A | N/A | 0.992 | 0.434 | 0.63 | N/A | N/A | N/A |
| 143 | 0.654 | 0.325 | 0.534 | 0.50 | 0.704 | 0.373 | 0.609 | 0.437 | 0.221 | 0.351 |
| 145 | 0.542 | 0.274 | 0.446 | 0.42 | 0.604 | 0.260 | 0.480 | 0.354 | 0.181 | 0.296 |
| 146 | 0.415 | 0.256 | 0.485 | 0.39 | 0.488 | 0.296 | 0.586 | 0.270 | 0.170 | 0.322 |
| 147 | 0.058 | 0.028 | 0.048 | 0.05 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 151 | 0.568 | 0.465 | 0.965 | 0.67 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 154 | 0.759 | 0.173 | 0.482 | 0.47 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 158 | N/A | N/A | N/A | N/A | 0.933 | 0.282 | 0.212 | N/A | N/A | N/A |
| 159 | 1.249 | 0.273 | 0.370 | 0.63 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 161 | 1.131 | 0.287 | 0.468 | 0.63 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 162 | 0.790 | 0.355 | 0.655 | 0.60 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 164 | 0.815 | 0.302 | 0.646 | 0.59 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 165 | 0.636 | 0.304 | 0.668 | 0.54 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 166 | | | | | | | | | | |

Continúa en la siguiente página

Tabla B.1 – continúa de la página anterior

| Nº | Bobina 1 | | | Bobina 2 | | | Bobina 3 | | |
|-----|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | ΔLx (H) | ΔLy (H) | ΔLz (H) | ΔLx (H) | ΔLy (H) | ΔLz (H) | ΔLx (H) | ΔLy (H) | ΔLz (H) |
| 167 | 0,674 | 0,324 | 0,546 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 170 | 0,025 | 0,018 | 0,131 | 0,06 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 171 | 0,000 | 0,000 | 0,010 | 0,00 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 173 | 0,667 | 0,242 | 0,810 | 0,57 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 177 | 0,294 | 0,141 | 0,767 | 0,40 | 0,431 | 0,163 | 0,831 | 0,48 | 0,208 |
| 178 | N/A | N/A | N/A | N/A | 1,342 | 0,250 | 0,424 | 0,67 | N/A |
| 180 | 1,263 | 0,243 | 0,393 | 0,63 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 181 | 1,323 | 0,257 | 0,399 | 0,66 | 1,501 | 0,306 | 0,430 | 0,75 | 0,894 |
| 183 | 0,937 | 0,315 | 0,440 | 0,56 | 1,050 | 0,321 | 0,475 | 0,62 | 0,619 |
| 184 | 0,964 | 0,326 | 0,597 | 0,63 | 1,089 | 0,361 | 0,543 | 0,66 | 0,628 |
| 185 | 0,915 | 0,306 | 0,500 | 0,57 | 1,005 | 0,332 | 0,585 | 0,64 | 0,602 |
| 186 | 1,062 | 0,286 | 0,489 | 0,61 | 1,204 | 0,358 | 0,558 | 0,71 | 0,706 |
| 189 | 0,090 | 0,066 | 0,255 | 0,14 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 190 | 0,030 | 0,009 | 0,012 | 0,02 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 192 | 0,726 | 0,286 | 1,064 | 0,69 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 197 | N/A | N/A | N/A | N/A | 1,116 | 0,302 | 0,426 | 0,62 | N/A |
| 199 | 0,780 | 0,206 | 0,618 | 0,54 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 202 | 1,089 | 0,301 | 0,623 | 0,67 | 1,156 | 0,316 | 0,701 | 0,72 | 0,728 |
| 203 | 1,096 | 0,260 | 0,603 | 0,65 | 1,133 | 0,303 | 0,662 | 0,70 | 0,724 |
| 204 | 1,092 | 0,331 | 0,553 | 0,66 | 1,160 | 0,318 | 0,553 | 0,68 | 0,732 |
| 208 | 0,171 | 0,185 | 0,495 | 0,28 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 211 | 0,390 | 0,177 | 0,813 | 0,46 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 215 | 0,281 | 0,193 | 1,076 | 0,52 | 0,317 | 0,243 | 1,201 | 0,59 | 0,189 |
| 216 | N/A | N/A | N/A | N/A | 1,065 | 0,245 | 0,592 | 0,63 | N/A |
| 218 | 0,916 | 0,234 | 0,477 | 0,54 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 219 | 0,818 | 0,250 | 0,322 | 0,46 | 0,892 | 0,286 | 0,350 | 0,51 | 0,548 |
| 221 | 1,071 | 0,205 | 0,468 | 0,58 | 1,233 | 0,255 | 0,550 | 0,68 | 0,705 |
| 222 | 0,700 | 0,228 | 0,532 | 0,49 | 0,733 | 0,236 | 0,553 | 0,51 | 0,465 |
| 223 | 0,814 | 0,288 | 0,666 | 0,59 | 0,876 | 0,305 | 0,774 | 0,65 | 0,544 |
| 224 | 0,755 | 0,251 | 0,809 | 0,61 | 0,881 | 0,298 | 0,901 | 0,69 | 0,502 |
| 227 | 0,255 | 0,229 | 0,681 | 0,39 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 230 | 0,418 | 0,225 | 0,879 | 0,51 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 234 | 0,331 | 0,174 | 0,831 | 0,45 | 0,381 | 0,231 | 0,927 | 0,51 | 0,224 |
| 235 | N/A | N/A | N/A | N/A | 0,683 | 0,260 | 0,686 | 0,54 | N/A |
| 237 | 0,631 | 0,154 | 0,464 | 0,42 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 238 | 0,807 | 0,158 | 0,425 | 0,46 | 0,940 | 0,167 | 0,337 | 0,48 | 0,555 |
| 240 | 0,890 | 0,203 | 0,418 | 0,50 | 0,980 | 0,273 | 0,442 | 0,57 | 0,596 |
| 241 | 0,873 | 0,206 | 0,456 | 0,51 | 0,929 | 0,192 | 0,477 | 0,53 | 0,573 |
| 242 | 0,804 | 0,299 | 0,654 | 0,59 | 0,708 | 0,308 | 0,598 | 0,54 | 0,529 |
| 243 | 0,883 | 0,225 | 0,618 | 0,58 | 0,971 | 0,290 | 0,637 | 0,63 | 0,585 |
| 246 | 0,302 | 0,204 | 0,740 | 0,42 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 249 | 0,787 | 0,404 | 1,306 | 0,83 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |

Continúa en la siguiente página

Tabla B.1 – continúa de la página anterior

| N° | Bobina 1 | | | | Bobina 2 | | | | Bobina 3 | | | |
|-----|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | ΔL_x (H) | ΔL_y (H) | ΔL_z (H) | ΔL_m (H) | ΔL_x (H) | ΔL_y (H) | ΔL_z (H) | ΔL_m (H) | ΔL_x (H) | ΔL_y (H) | ΔL_z (H) | ΔL_m (H) |
| 253 | N/A | N/A | N/A | N/A | 0.616 | 0.733 | 0.748 | 0.70 | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 254 | N/A | N/A | N/A | N/A | 0.815 | 0.168 | 0.617 | 0.53 | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 256 | 0.792 | 0.224 | 0.645 | 0.55 | N/A |
| 257 | N/A | N/A | N/A | N/A | 1.424 | 0.232 | 0.546 | 0.73 | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 259 | 1.172 | 0.204 | 0.300 | 0.56 | 1.348 | 0.222 | 0.393 | 0.65 | 0.785 | 0.131 | 0.203 | 0.37 |
| 260 | 1.178 | 0.229 | 0.418 | 0.61 | 1.356 | 0.299 | 0.451 | 0.70 | 0.784 | 0.154 | 0.276 | 0.4 |
| 261 | 1.258 | 0.245 | 0.521 | 0.67 | 1.346 | 0.270 | 0.494 | 0.70 | 0.829 | 0.156 | 0.348 | 0.44 |
| 262 | N/A | N/A | N/A | N/A | 1.108 | 0.288 | 0.531 | 0.64 | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 265 | 0.302 | 0.240 | 0.709 | 0.42 | N/A |
| 268 | 1.033 | 0.456 | 1.100 | 0.86 | N/A |
| 272 | 0.888 | 0.183 | 0.258 | 0.44 | N/A |
| 273 | 0.953 | 0.202 | 0.311 | 0.49 | N/A |
| 275 | 0.992 | 0.215 | 0.340 | 0.52 | N/A |
| 276 | 1.016 | 0.160 | 0.201 | 0.46 | N/A |
| 278 | 1.291 | 0.275 | 0.304 | 0.62 | N/A |
| 279 | 1.401 | 0.272 | 0.231 | 0.64 | N/A |
| 280 | 1.423 | 0.279 | 0.316 | 0.67 | N/A |
| 281 | 1.075 | 0.209 | 0.282 | 0.52 | N/A |
| 284 | 0.401 | 0.237 | 0.756 | 0.47 | N/A |
| 285 | 0.013 | 0.005 | 0.101 | 0.04 | N/A |
| 287 | 0.668 | 0.343 | 0.548 | 0.52 | N/A |
| 291 | 0.849 | 0.315 | 0.491 | 0.55 | 0.951 | 0.382 | 0.574 | 0.64 | 0.581 | 0.218 | 0.320 | 0.37 |
| 292 | 1.014 | 0.232 | 0.398 | 0.55 | N/A |
| 294 | 1.408 | 0.384 | 0.317 | 0.70 | N/A |
| 295 | 1.519 | 0.315 | 0.304 | 0.71 | 1.576 | 0.377 | 0.289 | 0.75 | 1.009 | 0.209 | 0.204 | 0.47 |
| 297 | 1.504 | 0.413 | 0.236 | 0.72 | 1.652 | 0.479 | 0.252 | 0.79 | 1.009 | 0.275 | 0.157 | 0.48 |
| 298 | 1.445 | 0.372 | 0.220 | 0.68 | 1.610 | 0.411 | 0.304 | 0.78 | 0.962 | 0.245 | 0.140 | 0.45 |
| 299 | 1.655 | 0.437 | 0.254 | 0.78 | 1.822 | 0.475 | 0.281 | 0.86 | 1.101 | 0.297 | 0.172 | 0.52 |
| 300 | 1.524 | 0.413 | 0.252 | 0.73 | 1.702 | 0.447 | 0.227 | 0.79 | 1.023 | 0.283 | 0.160 | 0.49 |
| 303 | 0.285 | 0.254 | 0.665 | 0.40 | N/A |
| 306 | 1.076 | 0.497 | 0.590 | 0.72 | N/A |
| 311 | N/A | N/A | N/A | N/A | 1.270 | 0.375 | 0.737 | 0.79 | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 313 | 1.492 | 0.416 | 0.417 | 0.78 | N/A |
| 316 | 1.128 | 0.297 | 0.282 | 0.57 | 1.251 | 0.316 | 0.325 | 0.63 | 0.744 | 0.200 | 0.186 | 0.38 |
| 317 | 0.852 | 0.297 | 0.358 | 0.50 | 0.970 | 0.271 | 0.376 | 0.54 | 0.563 | 0.197 | 0.241 | 0.33 |
| 318 | 1.140 | 0.375 | 0.244 | 0.59 | N/A |
| 322 | 0.315 | 0.135 | 0.233 | 0.23 | N/A |
| 323 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.00 | N/A |
| 325 | 1.563 | 0.806 | 0.868 | 1.08 | N/A |
| 329 | 1.403 | 0.607 | 0.628 | 0.88 | 1.548 | 0.628 | 0.750 | 0.98 | 0.927 | 0.409 | 0.431 | 0.59 |
| 330 | N/A | N/A | N/A | N/A | 1.573 | 0.604 | 0.457 | 0.88 | 1.109 | 0.368 | 0.294 | 0.59 |
| 332 | 1.420 | 0.385 | 0.253 | 0.69 | N/A |

Continúa en la siguiente página

Tabla B.1 – continúa de la página anterior

| Nº | Bobina 1 | | | Bobina 2 | | | Bobina 3 | | |
|-----|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | ΔLx (H) | ΔLy (H) | ΔLz (H) | ΔLx (H) | ΔLy (H) | ΔLz (H) | ΔLx (H) | ΔLy (H) | ΔLz (H) |
| 333 | 1,441 | 0,366 | 0,292 | 1,599 | 0,425 | 0,323 | 0,78 | 0,241 | 0,200 |
| 335 | 1,398 | 0,304 | 0,247 | 1,543 | 0,318 | 0,305 | 0,72 | 0,209 | 0,161 |
| 336 | 1,415 | 0,324 | 0,258 | 1,444 | 0,366 | 0,304 | 0,71 | 0,217 | 0,180 |
| 337 | 1,378 | 0,342 | 0,247 | 1,544 | 0,395 | 0,327 | 0,76 | 0,234 | 0,163 |
| 338 | 1,410 | 0,318 | 0,241 | 1,594 | 0,361 | 0,247 | 0,73 | 0,213 | 0,161 |
| 341 | 0,000 | 0,001 | 0,000 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 344 | 1,221 | 0,661 | 1,713 | 1,20 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 348 | 1,517 | 0,439 | 0,296 | 1,657 | 0,472 | 0,353 | 0,83 | 0,298 | 0,201 |
| 349 | N/A | N/A | N/A | 1,803 | 0,463 | 0,302 | 0,86 | N/A | N/A |
| 351 | 1,570 | 0,495 | 0,257 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 352 | 1,532 | 0,354 | 0,212 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 354 | 1,807 | 0,414 | 0,256 | 1,950 | 0,455 | 0,276 | 0,89 | 1,208 | 0,172 |
| 355 | 1,455 | 0,353 | 0,224 | 1,617 | 0,392 | 0,283 | 0,76 | 0,233 | 0,147 |
| 356 | 1,580 | 0,456 | 0,264 | 1,795 | 0,485 | 0,285 | 0,86 | 1,046 | 0,307 |
| 357 | 1,441 | 0,426 | 0,222 | 1,603 | 0,484 | 0,277 | 0,79 | 0,960 | 0,291 |
| 360 | 0,087 | 0,012 | 0,010 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 363 | 1,169 | 0,582 | 0,960 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 367 | N/A | N/A | N/A | 1,735 | 0,244 | 0,248 | 0,74 | N/A | N/A |
| 368 | N/A | N/A | N/A | 2,064 | 0,636 | 0,312 | 1,00 | N/A | N/A |
| 370 | 1,809 | 0,507 | 0,257 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 371 | N/A | N/A | N/A | 1,920 | 0,662 | 0,292 | 0,96 | N/A | N/A |
| 373 | 1,526 | 0,409 | 0,227 | 1,678 | 0,474 | 0,291 | 0,81 | 1,019 | 0,278 |
| 374 | 1,528 | 0,411 | 0,213 | 1,660 | 0,395 | 0,221 | 0,76 | 1,013 | 0,145 |
| 375 | 1,519 | 0,469 | 0,252 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 376 | N/A | N/A | N/A | 1,385 | 0,526 | 0,676 | 0,86 | N/A | N/A |
| 379 | 0,859 | 0,483 | 0,375 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |

Tabla B.1: Relación de valores de inductancia en probetas cúbicas para diferentes bobinas.

Las probetas prismáticas por su parte, han sido medidas en dos etapas, empleando la bobina 1 en la mitad de ellas aproximadamente, y la bobina 3 en el resto. La Tabla B.2 resume las medidas realizadas en cada cuarto de longitud de todas las probetas prismáticas, bien se hayan realizado mediante la bobina 1 o la bobina 3, transformando los valores a una misma escala (bobina 1).

Al mismo tiempo, varias de las probetas prismáticas han sido cortadas y vueltas a medir como si de especímenes cúbicos se tratara, variando a su vez las condiciones de medida. Ello permite determinar de manera más exacta, además de la orientación de las fibras en cada uno de los tramos, la densidad de fibras sin considerar la influencia o el incremento añadido por los tramos adyacentes. Estas medidas se han realizado mediante la bobina 2 y relacionado con los valores anteriormente obtenidos previo al corte.

Así mismo, las mediciones de los cuartos de probeta por separado, hacen posible contrastar los resultados de la resolución matricial planteada para estimar la cuantía de fibras real a partir de las mediciones realizadas sobre la probeta original.

En este caso y para todas las mediciones realizadas, se ha optado por la medida de la variación de la inductancia obtenida de acuerdo a la bobina 1 como escala de referencia.

| Nº | Probeta prismática | | | Probeta cúbica** | | | Valor analítico | | | |
|------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| | $\Delta L_{0/15}$ (H) | $\Delta L_{15/30}$ (H) | $\Delta L_{45/60}$ (H) | $\Delta L_{0/15}$ (H) | $\Delta L_{15/30}$ (H) | $\Delta L_{30/45}$ (H) | $\Delta L_{0/15}$ (H) | $\Delta L_{15/30}$ (H) | $\Delta L_{30/45}$ (H) | $\Delta L_{45/60}$ (H) |
| 61 | 0.171 | 0.172 | 0.228 | 0.199 | N/A | N/A | 0.154 | 0.136 | 0.195 | 0.184 |
| 62 | 0.181 | 0.107 | 0.133 | 0.159 | N/A | N/A | 0.173 | 0.086 | 0.114 | 0.152 |
| 63 | 0.067 | 0.076 | 0.063 | 0.034 | N/A | N/A | 0.064 | 0.073 | 0.061 | 0.034 |
| 73 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | N/A | N/A | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 79* | 0.660 | 1.421 | 1.181 | 0.548 | N/A | N/A | 0.503 | 1.236 | 0.977 | 0.430 |
| 80* | 0.603 | 0.385 | 0.356 | 0.236 | N/A | N/A | 0.277 | 0.322 | 0.318 | 0.215 |
| 81* | 0.286 | 0.497 | 0.815 | 0.923 | N/A | N/A | 0.276 | 0.456 | 0.756 | 0.857 |
| 84* | 0.687 | 0.687 | 0.485 | 0.431 | N/A | N/A | 0.633 | 0.600 | 0.401 | 0.399 |
| 87* | 0.339 | 0.329 | 0.301 | 0.165 | N/A | N/A | 0.325 | 0.312 | 0.290 | 0.161 |
| 92* | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | N/A | N/A | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 93* | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | N/A | N/A | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 98 | 1.475 | 1.331 | 0.951 | 0.732 | N/A | N/A | 1.401 | 1.184 | 0.828 | 0.676 |
| 99 | 0.860 | 0.733 | 0.549 | 0.604 | N/A | N/A | 0.814 | 0.599 | 0.432 | 0.551 |
| 100 | 1.070 | 1.375 | 1.363 | 1.018 | N/A | N/A | 0.958 | 1.157 | 1.148 | 0.890 |
| 103 | 1.114 | 1.121 | 0.883 | 0.996 | N/A | N/A | 1.021 | 0.960 | 0.705 | 0.932 |
| 106 | 0.517 | 0.543 | 0.502 | 0.377 | N/A | N/A | 0.461 | 0.450 | 0.420 | 0.340 |
| 111 | 0.174 | 0.148 | 0.077 | 0.027 | N/A | N/A | 0.159 | 0.140 | 0.074 | 0.027 |
| 112 | 0.014 | 0.010 | 0.005 | 0.000 | N/A | N/A | 0.014 | 0.008 | 0.000 | 0.000 |
| 117* | 0.858 | 0.822 | 0.768 | 0.528 | N/A | N/A | 0.829 | 0.739 | 0.700 | 0.482 |
| 118* | 0.818 | 0.850 | 0.813 | 1.016 | N/A | N/A | 0.780 | 0.743 | 0.696 | 0.952 |
| 119* | 1.219 | 1.442 | 1.426 | 1.571 | N/A | N/A | 1.109 | 1.242 | 1.190 | 1.469 |
| 122* | 1.124 | 1.327 | 1.060 | 0.827 | N/A | N/A | 1.018 | 1.144 | 0.877 | 0.739 |
| 125* | 0.634 | 0.664 | 0.580 | 0.572 | N/A | N/A | 0.591 | 0.590 | 0.504 | 0.540 |
| 130* | 0.323 | 0.344 | 0.255 | 0.206 | N/A | N/A | 0.304 | 0.311 | 0.224 | 0.192 |
| 131* | 0.100 | 0.067 | 0.022 | 0.000 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 137 | 0.711 | 1.106 | 1.348 | 1.000 | N/A | N/A | 0.622 | 0.923 | 1.159 | 0.868 |
| 138 | 1.005 | 1.361 | 1.391 | 1.270 | N/A | N/A | 0.868 | 1.143 | 1.146 | 1.164 |
| 144 | 1.181 | 1.106 | 1.092 | 0.969 | N/A | N/A | 1.086 | 0.910 | 0.916 | 0.884 |
| 149 | 0.520 | 0.496 | 0.454 | 0.375 | N/A | N/A | 0.472 | 0.412 | 0.379 | 0.343 |
| 155* | 1.031 | 0.500 | 0.653 | 0.518 | N/A | N/A | 1.000 | 0.394 | 0.592 | 0.482 |
| 156* | 0.967 | 1.361 | 1.538 | 1.105 | N/A | N/A | 0.863 | 1.164 | 1.346 | 0.985 |
| 157* | 0.936 | 1.039 | 1.218 | 1.121 | N/A | N/A | 0.856 | 0.878 | 1.057 | 1.041 |
| 160* | 1.149 | 1.339 | 1.617 | 1.367 | N/A | N/A | 1.051 | 1.123 | 1.110 | 1.243 |
| 163* | 1.138 | 1.525 | 1.506 | 1.322 | N/A | N/A | 1.204 | 1.307 | 1.286 | 1.209 |
| 168* | 0.813 | 0.823 | 0.576 | 0.486 | N/A | N/A | 0.751 | 0.716 | 0.475 | 0.444 |
| 169* | 0.335 | 0.357 | 0.390 | 0.198 | N/A | N/A | 0.309 | 0.297 | 0.347 | 0.164 |
| 174 | 1.162 | 0.731 | 0.558 | 0.880 | 0.533 | 0.367 | 1.113 | 0.566 | 0.431 | 0.831 |
| 175 | 0.802 | 1.223 | 1.332 | 1.348 | N/A | N/A | 0.674 | 1.030 | 1.088 | 1.255 |
| 176 | 1.102 | 1.330 | 1.345 | 0.790 | N/A | N/A | 0.987 | 1.132 | 1.185 | 0.696 |
| 179 | 1.035 | 1.336 | 1.641 | 1.297 | 0.918 | 1.098 | 0.934 | 1.225 | 1.432 | 1.164 |

Continúa en la siguiente página

* Medido con la bobina 3 y transformado a la escala de referencia de la bobina 1

** Medido con la bobina 2 y transformado a la escala de referencia de la bobina 1

Tabla B.2 – continúa de la página anterior

| Nº | Probeta prismática | | | Probeta cúbica** | | | Valor analítico | | |
|------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|
| | $\Delta L_{0/15}$ (H) | $\Delta L_{15/30}$ (H) | $\Delta L_{45/60}$ (H) | $\Delta L_{0/15}$ (H) | $\Delta L_{15/30}$ (H) | $\Delta L_{45/60}$ (H) | $\Delta L_{0/15}$ (H) | $\Delta L_{15/30}$ (H) | $\Delta L_{45/60}$ (H) |
| 182 | 1.544 | 1.614 | 1.447 | 1.033 | 1.398 | 1.892 | 1.335 | 1.208 | 0.903 |
| 187 | 1.190 | 1.137 | 0.854 | 0.718 | N/A | N/A | 1.077 | 0.935 | 0.672 |
| 188 | 0.529 | 0.515 | 0.492 | 0.316 | N/A | N/A | 0.473 | 0.421 | 0.282 |
| 194* | 1.551 | 1.551 | 1.486 | 1.412 | N/A | N/A | 1.472 | 1.355 | 1.299 |
| 195* | 1.230 | 1.430 | 1.326 | 0.654 | N/A | N/A | 1.124 | 1.241 | 1.181 |
| 201* | 1.425 | 1.229 | 0.801 | 0.996 | N/A | N/A | 1.334 | 1.062 | 0.630 |
| 206* | 1.102 | 1.222 | 1.069 | 0.885 | N/A | N/A | 1.042 | 1.082 | 0.933 |
| 213 | 1.286 | 1.756 | 1.605 | 1.367 | N/A | N/A | 1.116 | 1.502 | 1.243 |
| 214 | 0.975 | 0.880 | 0.947 | 0.381 | N/A | N/A | 0.872 | 0.701 | 0.329 |
| 220 | 0.948 | 1.072 | 1.293 | 1.159 | N/A | N/A | 0.846 | 0.858 | 1.081 |
| 225 | 0.895 | 1.070 | 1.073 | 1.037 | N/A | N/A | 0.809 | 0.906 | 0.949 |
| 231* | 0.644 | 0.728 | 1.250 | 1.204 | N/A | N/A | 0.601 | 0.601 | 1.124 |
| 232* | 1.335 | 1.700 | 1.357 | 1.223 | N/A | N/A | 1.213 | 1.512 | 1.133 |
| 233* | 0.810 | 0.327 | 0.536 | 0.459 | N/A | N/A | 0.792 | 0.217 | 0.483 |
| 236* | 1.007 | 0.952 | 0.847 | 0.761 | N/A | N/A | 0.937 | 0.808 | 0.716 |
| 244* | 1.425 | 1.664 | 1.205 | 0.876 | N/A | N/A | 1.297 | 1.460 | 1.006 |
| 245* | 0.822 | 1.002 | 0.781 | 0.710 | N/A | N/A | 0.744 | 0.881 | 0.648 |
| 250 | 0.699 | 0.840 | 0.950 | 1.110 | 0.636 | 0.657 | 0.650 | 0.709 | 0.797 |
| 251 | 1.519 | 1.499 | 1.146 | 0.849 | N/A | N/A | 1.406 | 1.281 | 0.957 |
| 252 | 0.397 | 0.442 | 0.763 | 0.702 | N/A | N/A | 0.368 | 0.348 | 0.674 |
| 255 | 0.740 | 0.994 | 1.007 | 0.986 | 0.602 | 0.819 | 0.672 | 0.867 | 0.911 |
| 258 | 1.157 | 1.401 | 1.525 | 1.405 | 1.144 | 1.421 | 1.028 | 1.165 | 1.288 |
| 263 | 1.202 | 1.058 | 1.078 | 0.981 | N/A | N/A | 1.122 | 0.854 | 0.904 |
| 264 | 0.587 | 0.615 | 0.675 | 0.574 | N/A | N/A | 0.536 | 0.510 | 0.577 |
| 269* | 0.459 | 0.877 | 0.411 | 1.005 | N/A | N/A | 0.374 | 0.818 | 0.231 |
| 270* | 1.437 | 1.310 | 0.614 | 0.669 | N/A | N/A | 1.353 | 1.129 | 0.444 |
| 271* | 0.812 | 1.113 | 0.763 | 1.009 | N/A | N/A | 0.719 | 1.000 | 0.592 |
| 274* | 0.765 | 1.375 | 1.381 | 1.082 | N/A | N/A | 0.628 | 1.197 | 1.186 |
| 277* | 1.260 | 1.448 | 1.657 | 1.635 | N/A | N/A | 1.157 | 1.239 | 1.435 |
| 282* | 1.214 | 1.418 | 1.252 | 1.052 | N/A | N/A | 1.109 | 1.238 | 1.070 |
| 283* | 0.719 | 0.562 | 0.629 | 0.474 | N/A | N/A | 0.678 | 0.468 | 0.559 |
| 289 | 1.201 | 0.646 | 0.834 | 1.049 | N/A | N/A | 1.145 | 0.432 | 0.659 |
| 290 | 1.288 | 1.406 | 0.872 | 0.630 | N/A | N/A | 1.141 | 1.214 | 0.688 |
| 296 | 1.736 | 2.046 | 1.913 | 1.726 | N/A | N/A | 1.550 | 1.729 | 1.580 |
| 301 | 2.004 | 2.070 | 2.046 | 1.704 | N/A | N/A | 1.808 | 1.706 | 1.710 |
| 307* | 0.734 | 0.910 | 0.665 | 0.897 | N/A | N/A | 0.592 | 0.772 | 0.432 |
| 308* | 0.573 | 0.528 | 0.993 | 1.183 | N/A | N/A | 0.541 | 0.412 | 0.870 |
| 309* | 1.110 | 1.113 | 0.947 | 1.121 | N/A | N/A | 1.023 | 0.961 | 0.764 |
| 312* | 1.275 | 1.771 | 1.984 | 1.743 | N/A | N/A | 1.174 | 1.579 | 1.624 |

Continúa en la siguiente página
 * Medido con la bobina 3 y transformado a la escala de referencia de la bobina 1
 ** Medido con la bobina 2 y transformado a la escala de referencia de la bobina 1

Tabla B.2 – continúa de la página anterior

| Nº | Probeta prismática | | | Probeta cúbica** | | | Valor analítico | | | | | |
|------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| | $\Delta L_{0/15}$ (H) | $\Delta L_{15/30}$ (H) | $\Delta L_{30/45}$ (H) | $\Delta L_{45/60}$ (H) | $\Delta L_{0/15}$ (H) | $\Delta L_{15/30}$ (H) | $\Delta L_{30/45}$ (H) | $\Delta L_{45/60}$ (H) | $\Delta L_{0/15}$ (H) | $\Delta L_{15/30}$ (H) | $\Delta L_{30/45}$ (H) | $\Delta L_{45/60}$ (H) |
| 315* | 1.552 | 1.204 | 1.657 | 1.435 | N/A | N/A | N/A | N/A | 1.475 | 0.972 | 1.477 | 1.320 |
| 320* | 1.123 | 1.278 | 1.421 | 1.421 | N/A | N/A | N/A | N/A | 1.028 | 1.138 | 1.212 | 1.316 |
| 321* | 1.195 | 1.275 | 0.917 | 0.824 | N/A | N/A | N/A | N/A | 1.109 | 1.138 | 0.779 | 0.769 |
| 326 | 0.693 | 0.993 | 0.940 | 0.923 | N/A | N/A | N/A | N/A | 0.543 | 0.809 | 0.701 | 0.853 |
| 327 | 0.802 | 1.142 | 1.081 | 0.886 | 0.684 | 0.966 | 0.556 | 0.769 | 0.675 | 0.961 | 0.883 | 0.801 |
| 328 | 1.068 | 1.737 | 2.213 | 1.969 | N/A | N/A | N/A | N/A | 0.915 | 1.446 | 1.879 | 1.780 |
| 331 | 1.832 | 1.795 | 1.674 | 1.437 | N/A | N/A | N/A | N/A | 1.627 | 1.466 | 1.365 | 1.321 |
| 334 | 1.563 | 1.840 | 1.859 | 1.444 | N/A | N/A | N/A | N/A | 1.390 | 1.548 | 1.584 | 1.312 |
| 339 | 1.659 | 1.781 | 1.633 | 1.246 | N/A | N/A | N/A | N/A | 1.529 | 1.536 | 1.411 | 1.130 |
| 340 | 0.964 | 0.756 | 0.413 | 0.133 | N/A | N/A | N/A | N/A | 0.900 | 0.562 | 0.305 | 0.079 |
| 346* | 2.462 | 2.679 | 2.507 | 2.277 | N/A | N/A | N/A | N/A | 2.290 | 2.328 | 2.157 | 2.096 |
| 347* | 2.179 | 2.683 | 2.328 | 1.969 | N/A | N/A | N/A | N/A | 1.973 | 2.337 | 1.965 | 1.797 |
| 353* | 1.880 | 2.202 | 2.165 | 1.923 | N/A | N/A | N/A | N/A | 1.734 | 1.927 | 1.883 | 1.779 |
| 358* | 1.688 | 1.489 | 1.196 | 0.793 | N/A | N/A | N/A | N/A | 1.309 | 1.059 | 0.726 | 0.763 |
| 365 | 2.491 | 2.793 | 3.230 | 2.235 | N/A | N/A | N/A | N/A | 2.249 | 2.277 | 2.800 | 1.963 |
| 366 | 2.269 | 2.369 | 2.364 | 1.924 | N/A | N/A | N/A | N/A | 2.060 | 1.966 | 1.997 | 1.739 |
| 372 | 2.038 | 2.218 | 2.245 | 1.890 | N/A | N/A | N/A | N/A | 1.855 | 1.884 | 1.927 | 1.737 |
| 377 | 1.498 | 1.729 | 1.446 | 1.132 | N/A | N/A | N/A | N/A | 1.340 | 1.459 | 1.182 | 1.006 |

Tabla B.2: Relación de valores de variación de inductancia en probetas prismáticas.

* Medido con la bobina 3 y transformado a la escala de referencia de la bobina 1

** Medido con la bobina 2 y transformado a la escala de referencia de la bobina 1

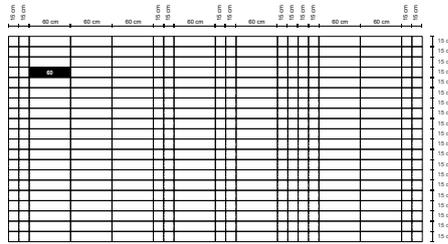
Ensayos a flexotracción

C.1. Resultados y diagramas

En el presente anexo, se muestran los resultados de todas las probetas prismáticas ensayadas tal y como se ha descrito en el Apartado 6.6. Además de la dispersión habitual en este tipo de ensayo, los resultados parecen dispares entre si. No obstante, se debe recalcar que las ligeras diferencias en la densidad de fibras localizada en cada una de las probetas y las orientaciones diferentes en función del movimiento de la masa, además del estudio puntual de las probetas, aporta valores de resistencias no uniformes.

Las dimensiones de las probetas difieren ligeramente de las habituales establecidas en la normativa para la fabricación de probetas para este tipo de ensayo. Ello se debe por un lado al pequeño espesor de hormigón eliminado por el disco de diamante con el que se ha procedido a su corte, en lo que a la longitud y altura se refiere, mientras que por otro lado una incorrecta colocación del encofrado, ha originado un espesor de muro variable en función de la altura, obteniendo como consecuencia probetas de diferentes anchos.

La configuración del ensayo establece una distancia de 500 mm entre los puntos de apoyo y una profundidad de entalla de 25 mm. En este estudio, las diferencias de longitud no resultan significativas puesto que en todas las probetas se mantiene constante la distancia entre apoyos, variando ligeramente el vuelo de las piezas. De igual manera, la profundidad de la entalla se ha variado para cada probeta a fin de proporcionar un canto constante de 125 mm a todas ellas en la sección debilitada, donde se realizarán las mediciones de deformación. La sección resistente y el plano teórico donde se producirá la rotura de la probeta presenta, por tanto, similares características geométricas. La única variable que no se ha unificado es el ancho de la probeta, que se tomará en cuenta para determinar las diversas tensiones (límite proporcional y residuales), las cuales se verán modificadas de manera poco significativa por esta variación.

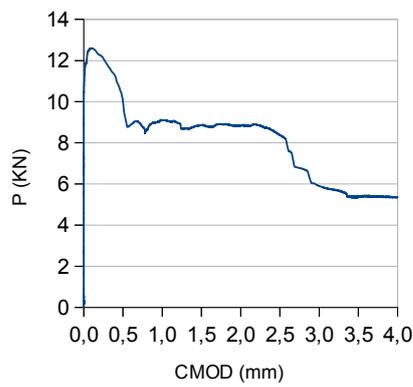


(a) Ubicación de la probeta

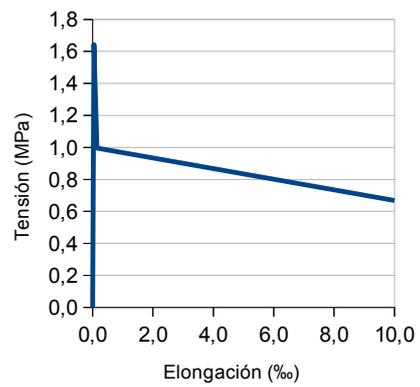


(b) Imagen de la probeta

| Probeta n° | | | | | | |
|----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------------------|-----------------|
| 60 | | | | | | |
| | | Longitud (mm) | Anchura (mm) | Altura (mm) | n° fibras en sección rotura | |
| | | N/A | N/A | N/A | N/A | |
| | | $L_{0/15}$ (H) | $L_{15/30}$ (H) | $L_{30/45}$ (H) | $L_{45/60}$ (H) | |
| | | N/A | N/A | N/A | N/A | |
| F_L (KN) | F_1 (KN) | F_2 (KN) | F_3 (KN) | F_4 (KN) | α_{pre} | α_{post} |
| 12.41 | 10.03 | 8.86 | 8.37 | 5.37 | N/A | N/A |
| $f_{ct,fl}$ (MPa) | $f_{R,1}$ (MPa) | $f_{R,2}$ (MPa) | $f_{R,3}$ (MPa) | $f_{R,4}$ (MPa) | α_{pre} | α_{post} |
| 4.11 | 3.32 | 2.93 | 2.77 | 1.78 | N/A | N/A |

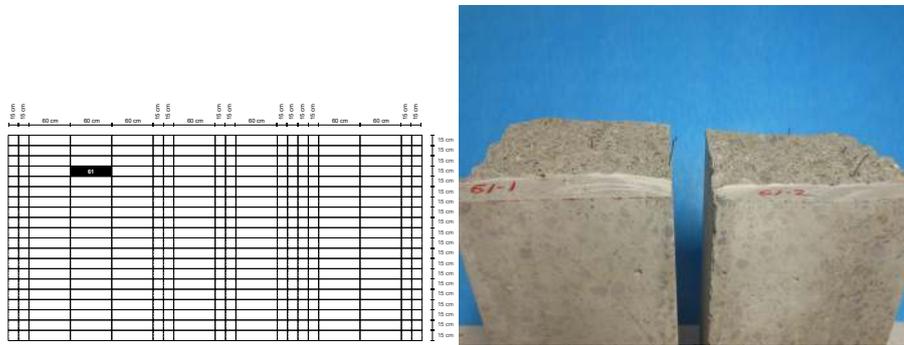


(a) P-CMOD

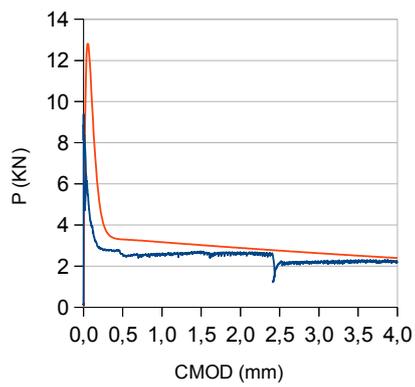


(b) $\sigma - \epsilon$

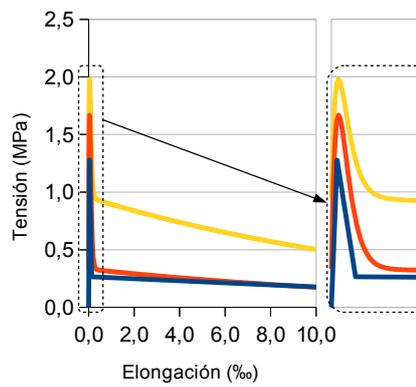
Observaciones:



| Probeta n° | | Longitud (mm) | Anchura (mm) | Altura (mm) | n° fibras en sección rotura | |
|----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------------------|-----------------|
| 61 | | 595 | 141 | 140 | 10 | |
| | | $L_{0/15}$ (H) | $L_{15/30}$ (H) | $L_{30/45}$ (H) | $L_{45/60}$ (H) | |
| | | 0.171 | 0.172 | 0.276 | 0.199 | |
| F_L (KN) | F_1 (KN) | F_2 (KN) | F_3 (KN) | F_4 (KN) | α_{pre} | α_{post} |
| 9.38 | 2.59 | 2.65 | 2.14 | 2.23 | 1.001 | 100 |
| $f_{ct,fl}$ (MPa) | $f_{R,1}$ (MPa) | $f_{R,2}$ (MPa) | $f_{R,3}$ (MPa) | $f_{R,4}$ (MPa) | α_{pre} | α_{post} |
| 3.19 | 0.88 | 0.90 | 0.73 | 0.76 | 1.001 | 10 |



(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

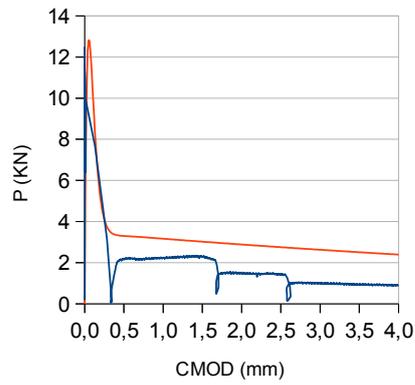
Observaciones:



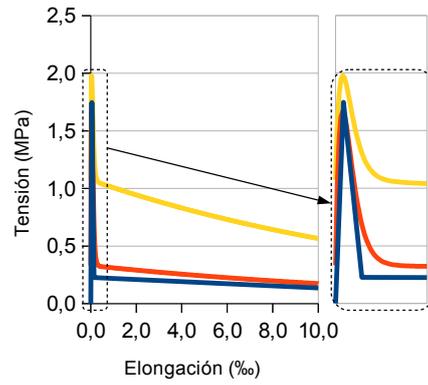
(a) Ubicación de la probeta

(b) Imagen de la probeta

| Probeta n° | | | | | | |
|----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------------------|-----------------|
| 62 | | | | | | |
| | | Longitud (mm) | Anchura (mm) | Altura (mm) | n° fibras en sección rotura | |
| | | 595 | 137 | 143 | 7 | |
| | | $L_{0/15}$ (H) | $L_{15/30}$ (H) | $L_{30/45}$ (H) | $L_{45/60}$ (H) | |
| | | 0.181 | 0.107 | 0.13 | 0.159 | |
| F_L (KN) | F_1 (KN) | F_2 (KN) | F_3 (KN) | F_4 (KN) | α_{pre} | α_{post} |
| 12.46 | 2.16 | 2.28 | 1.41 | 0.96 | 1.001 | 100 |
| $f_{ct,fl}$ (MPa) | $f_{R,1}$ (MPa) | $f_{R,2}$ (MPa) | $f_{R,3}$ (MPa) | $f_{R,4}$ (MPa) | α_{pre} | α_{post} |
| 4.37 | 0.76 | 0.80 | 0.49 | 0.34 | 1.001 | 10 |

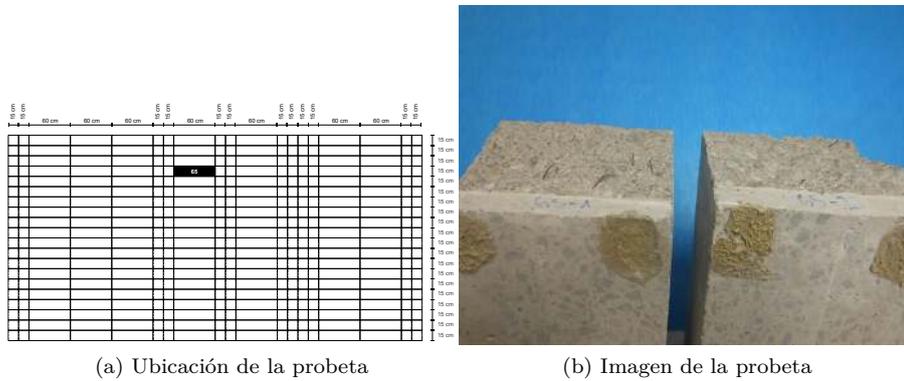


(a) P-CMOD

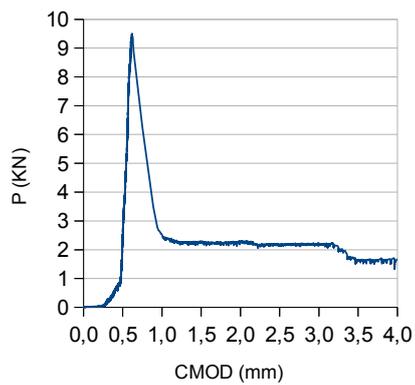


(b) $\sigma - \epsilon$

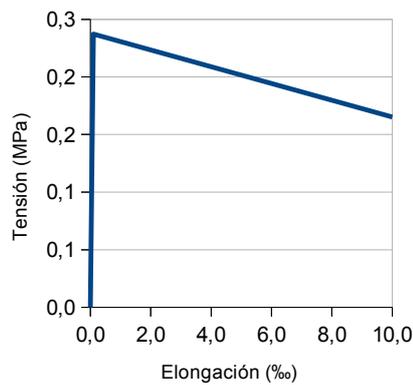
Observaciones:



| Probeta n° | | Longitud (mm) | Anchura (mm) | Altura (mm) | n° fibras en sección rotura | |
|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------------------|-----------------|
| 65 | | | 137 | | 8 | |
| | | $L_{0/15}$ (H) | $L_{15/30}$ (H) | $L_{30/45}$ (H) | $L_{45/60}$ (H) | |
| | | N/A | N/A | N/A | N/A | |
| F_L (KN) | F_1 (KN) | F_2 (KN) | F_3 (KN) | F_4 (KN) | α_{pre} | α_{post} |
| 9.51 | 2.39 | 2.26 | 2.15 | 1.75 | N/A | N/A |
| $f_{ct,fl}$ (MPa) | $f_{R,1}$ (MPa) | $f_{R,2}$ (MPa) | $f_{R,3}$ (MPa) | $f_{R,4}$ (MPa) | α_{pre} | α_{post} |
| 3.51 | 0.79 | 0.75 | 0.71 | 0.55 | N/A | N/A |



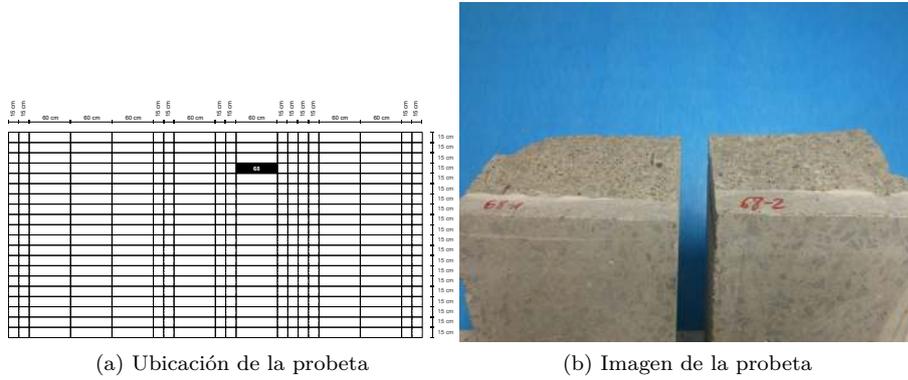
(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

Observaciones:

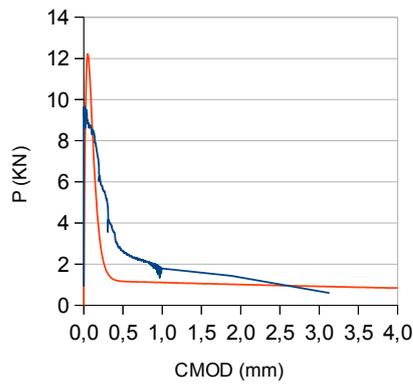
Un problema de acople entre probeta y dispositivo ha originado un retraso en la aplicación de la carga. Se ha desplazado la gráfica hacia el origen para obtener el valor del LOP.



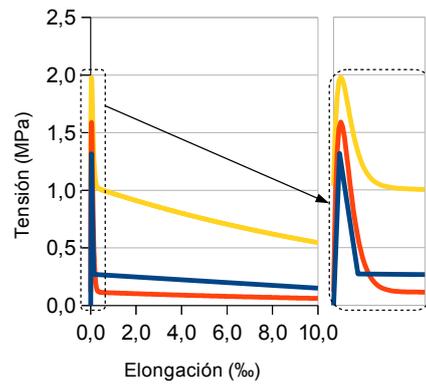
(a) Ubicación de la probeta

(b) Imagen de la probeta

| Probeta n° | | | | | | |
|----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------------------|-----------------|
| 68 | | | | | | |
| | | Longitud (mm) | Anchura (mm) | Altura (mm) | n° fibras en sección rotura | |
| | | 593 | 143 | 150 | 3 | |
| | | $L_{0/15}$ (H) | $L_{15/30}$ (H) | $L_{30/45}$ (H) | $L_{45/60}$ (H) | |
| | | 0.067 | 0.076 | 0.063 | 0.034 | |
| F_L (KN) | F_1 (KN) | F_2 (KN) | F_3 (KN) | F_4 (KN) | α_{pre} | α_{post} |
| 9.67 | 2.65 | 1.79 | 1.43 | 0.60 | 1.001 | 100 |
| $f_{ct,fl}$ (MPa) | $f_{R,1}$ (MPa) | $f_{R,2}$ (MPa) | $f_{R,3}$ (MPa) | $f_{R,4}$ (MPa) | α_{pre} | α_{post} |
| 3.29 | 0.90 | 0.61 | 0.49 | 0.20 | 1.001 | 10 |

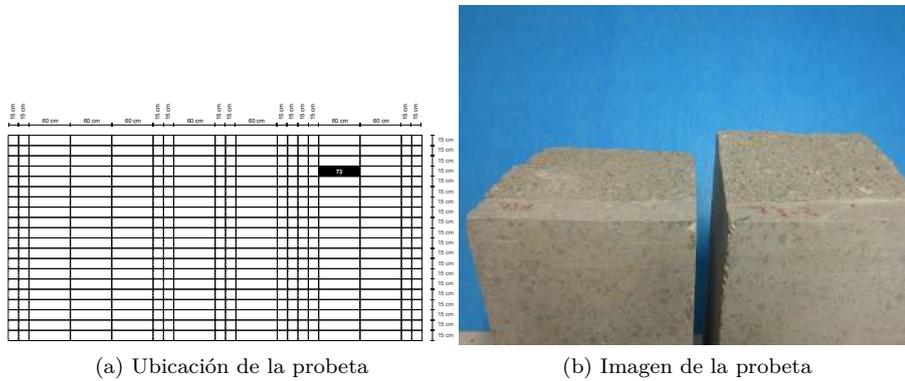


(a) P-CMOD

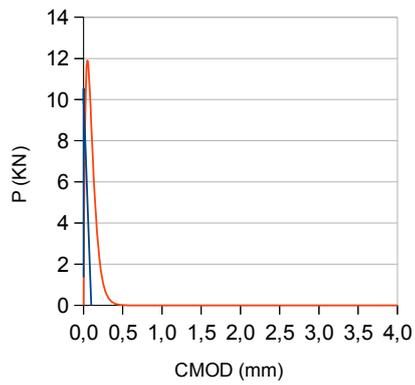


(b) $\sigma - \epsilon$

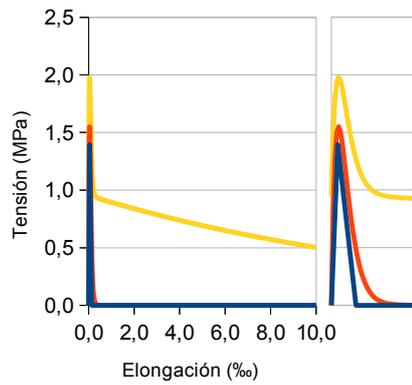
Observaciones:



| Probeta n° | | Longitud (mm) | Anchura (mm) | Altura (mm) | n° fibras en sección rotura | |
|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------------------|-----------------|
| 73 | | 591 | 142 | 147 | 0 | |
| | | $L_{0/15}$ (H) | $L_{15/30}$ (H) | $L_{30/45}$ (H) | $L_{45/60}$ (H) | |
| | | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | |
| F_L (KN) | F_1 (KN) | F_2 (KN) | F_3 (KN) | F_4 (KN) | α_{pre} | α_{post} |
| 10.53 | 9.61 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1.001 | 100 |
| $f_{ct,fl}$ (MPa) | $f_{R,1}$ (MPa) | $f_{R,2}$ (MPa) | $f_{R,3}$ (MPa) | $f_{R,4}$ (MPa) | α_{pre} | α_{post} |
| 3.49 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1.001 | 10 |

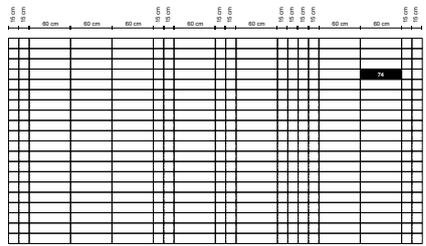


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

Observaciones:

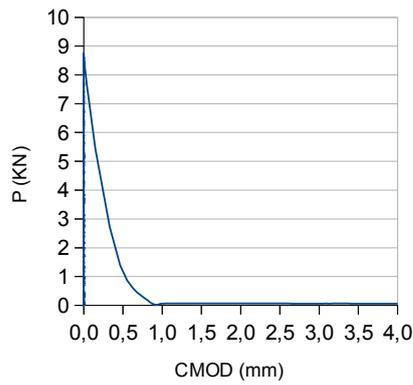


(a) Ubicación de la probeta

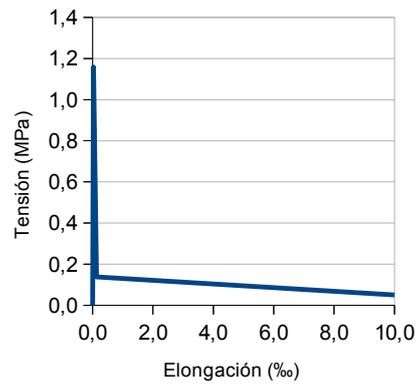


(b) Imagen de la probeta

| Probeta n° | | | | | | |
|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------------------|-----------------|
| 74 | | | | | | |
| | | Longitud (mm) | Anchura (mm) | Altura (mm) | n° fibras en sección rotura | |
| | | | 144 | | 0 | |
| | | $L_{0/15}$ (H) | $L_{15/30}$ (H) | $L_{30/45}$ (H) | $L_{45/60}$ (H) | |
| | | N/A | N/A | N/A | N/A | |
| F_L (KN) | F_1 (KN) | F_2 (KN) | F_3 (KN) | F_4 (KN) | α_{pre} | α_{post} |
| 8.75 | 1.39 | 0.06 | 0.00 | 0.00 | N/A | N/A |
| $f_{ct,fl}$ (MPa) | $f_{R,1}$ (MPa) | $f_{R,2}$ (MPa) | $f_{R,3}$ (MPa) | $f_{R,4}$ (MPa) | α_{pre} | α_{post} |
| 2.90 | 0.46 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | N/A | N/A |

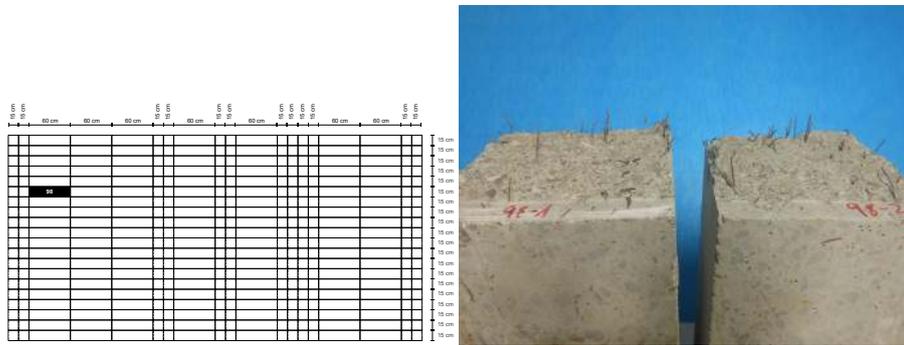


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

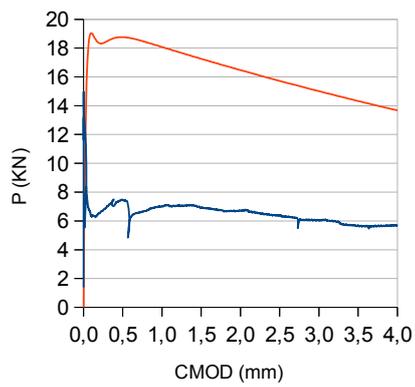
Observaciones:



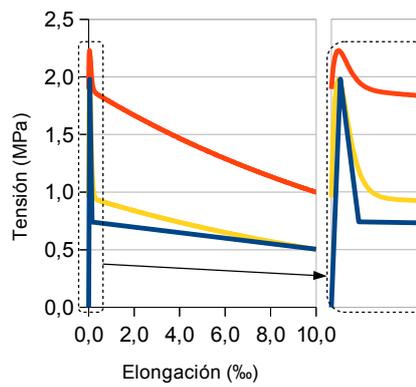
(a) Ubicación de la probeta

(b) Imagen de la probeta

| Probeta n° | | Longitud (mm) | Anchura (mm) | Altura (mm) | n° fibras en sección rotura | |
|----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------------------|-----------------|
| 98 | | 597 | 144 | 150 | 70 | |
| | | $L_{0/15}$ (H) | $L_{15/30}$ (H) | $L_{30/45}$ (H) | $L_{45/60}$ (H) | |
| | | 1.475 | 1.331 | 0.951 | 0.732 | |
| F_L (KN) | F_1 (KN) | F_2 (KN) | F_3 (KN) | F_4 (KN) | α_{pre} | α_{post} |
| 14.95 | 7.46 | 6.92 | 6.39 | 5.67 | 1.001 | 100 |
| $f_{ct,fl}$ (MPa) | $f_{R,1}$ (MPa) | $f_{R,2}$ (MPa) | $f_{R,3}$ (MPa) | $f_{R,4}$ (MPa) | α_{pre} | α_{post} |
| 4.95 | 2.47 | 2.29 | 2.12 | 1.88 | 1.001 | 10 |

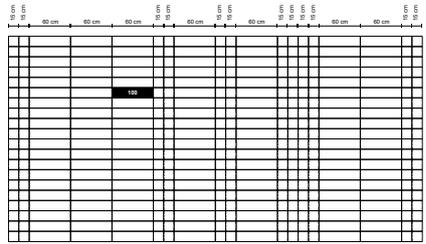


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

Observaciones:

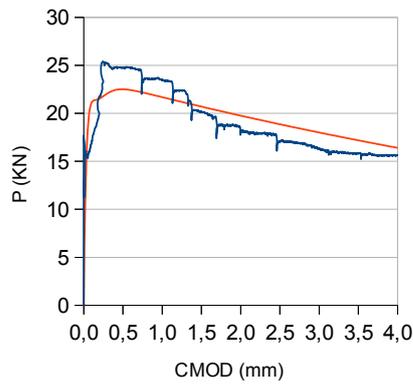


(a) Ubicación de la probeta

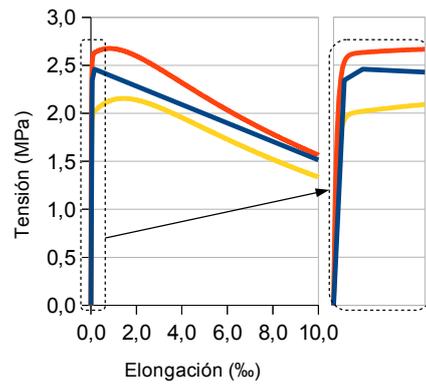


(b) Imagen de la probeta

| Probeta n° | | | | | | |
|----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------------------|-----------------|
| 100 | | | | | | |
| | | Longitud (mm) | Anchura (mm) | Altura (mm) | n° fibras en sección rotura | |
| | | 600 | 139 | 152 | 87 | |
| | | $L_{0/15}$ (H) | $L_{15/30}$ (H) | $L_{30/45}$ (H) | $L_{45/60}$ (H) | |
| | | 1.070 | 1.375 | 1.363 | 1.018 | |
| F_L (KN) | F_1 (KN) | F_2 (KN) | F_3 (KN) | F_4 (KN) | α_{pre} | α_{post} |
| 17.69 | 24.76 | 20.17 | 17.06 | 15.84 | 1.001 | 100 |
| $f_{ct,fl}$ (MPa) | $f_{R,1}$ (MPa) | $f_{R,2}$ (MPa) | $f_{R,3}$ (MPa) | $f_{R,4}$ (MPa) | α_{pre} | α_{post} |
| 5.86 | 8.20 | 6.68 | 5.65 | 5.24 | 100 | 10 |

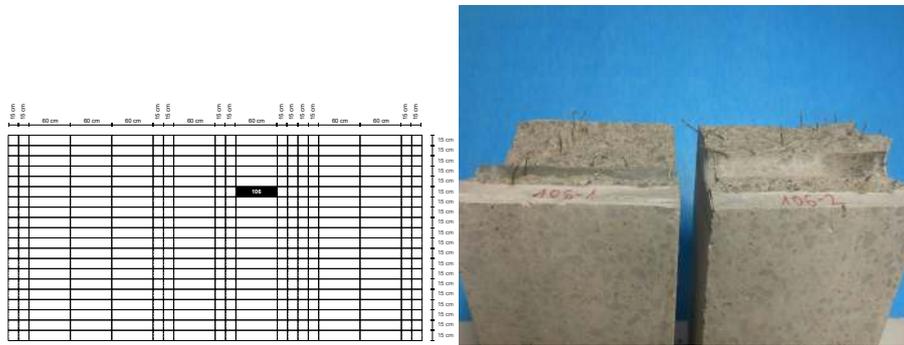


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

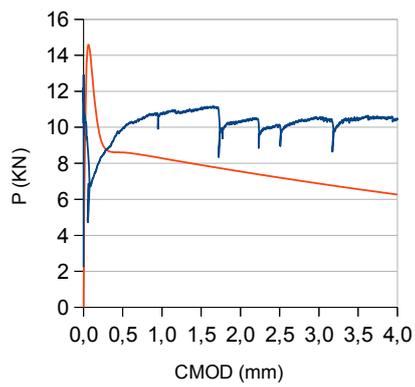
Observaciones:



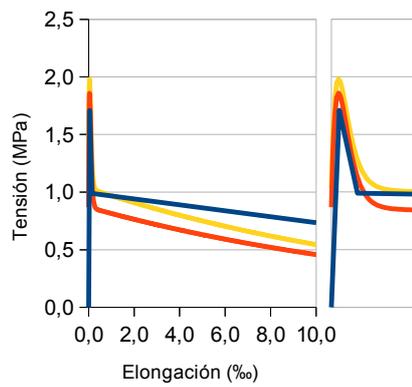
(a) Ubicación de la probeta

(b) Imagen de la probeta

| Probeta n° | | Longitud (mm) | Anchura (mm) | Altura (mm) | n° fibras en sección rotura | |
|----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------------------|-----------------|
| 106 | | 594 | 143 | 147 | 26 | |
| | | $L_{0/15}$ (H) | $L_{15/30}$ (H) | $L_{30/45}$ (H) | $L_{45/60}$ (H) | |
| | | 0.517 | 0.543 | 0.502 | 0.377 | |
| F_L (KN) | F_1 (KN) | F_2 (KN) | F_3 (KN) | F_4 (KN) | α_{pre} | α_{post} |
| 12.91 | 9.96 | 11.06 | 10.14 | 10.42 | 1.001 | 100 |
| $f_{ct,fl}$ (MPa) | $f_{R,1}$ (MPa) | $f_{R,2}$ (MPa) | $f_{R,3}$ (MPa) | $f_{R,4}$ (MPa) | α_{pre} | α_{post} |
| 4.27 | 3.30 | 3.66 | 3.36 | 3.45 | 1.001 | 10 |

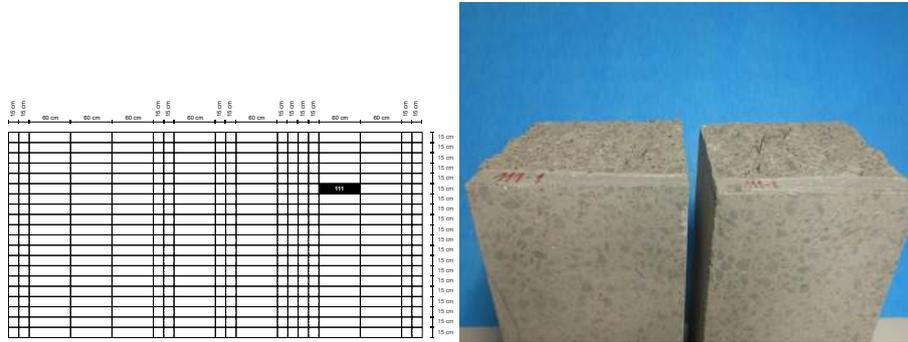


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

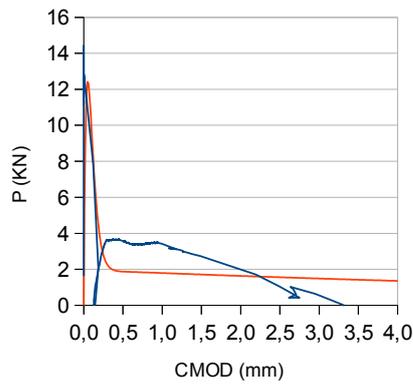
Observaciones:



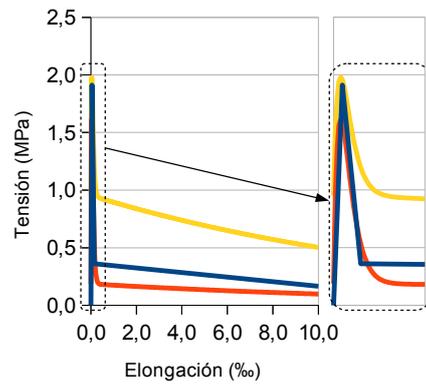
(a) Ubicación de la probeta

(b) Imagen de la probeta

| Probeta n° | | | | | | |
|-----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------------------|-----------------|
| 111 | | | | | | |
| | | Longitud (mm) | Anchura (mm) | Altura (mm) | n° fibras en sección rotura | |
| | | 596 | 146 | 144 | N/A | |
| | | $L_{0/15}$ (H) | $L_{15/30}$ (H) | $L_{30/45}$ (H) | $L_{45/60}$ (H) | |
| | | 0.174 | 0.148 | 0.077 | 0.027 | |
| F_L (KN) | F_1 (KN) | F_2 (KN) | F_3 (KN) | F_4 (KN) | α_{pre} | α_{post} |
| 14.43 | 3.63 | 2.73 | 1.05 | 0.00 | 1.001 | 100 |
| $f_{ct, f1}$ (MPa) | $f_{R,1}$ (MPa) | $f_{R,2}$ (MPa) | $f_{R,3}$ (MPa) | $f_{R,4}$ (MPa) | α_{pre} | α_{post} |
| 4.78 | 1.20 | 0.90 | 0.35 | 0.00 | 1.001 | 10 |

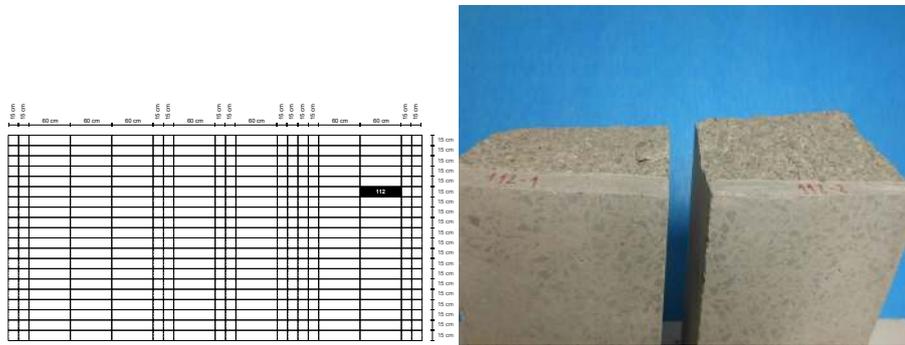


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

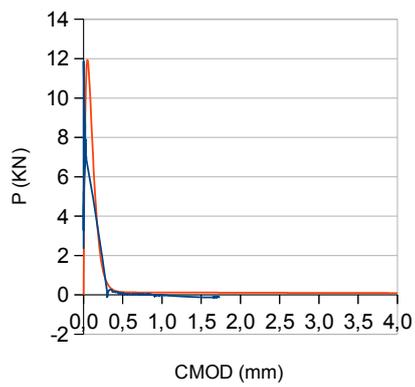
Observaciones:



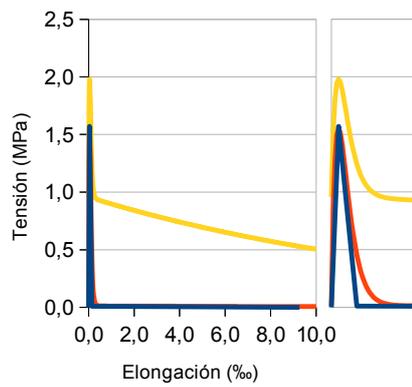
(a) Ubicación de la probeta

(b) Imagen de la probeta

| Probeta n° | | Longitud (mm) | Anchura (mm) | Altura (mm) | n° fibras en sección rotura | |
|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------------------|-----------------|
| 112 | | 601 | 147 | 142 | 0 | |
| | | $L_{0/15}$ (H) | $L_{15/30}$ (H) | $L_{30/45}$ (H) | $L_{45/60}$ (H) | |
| | | 0.014 | 0.010 | 0.006 | 0.000 | |
| F_L (KN) | F_1 (KN) | F_2 (KN) | F_3 (KN) | F_4 (KN) | α_{pre} | α_{post} |
| 11.86 | 0.09 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1.001 | 100 |
| $f_{ct,fl}$ (MPa) | $f_{R,1}$ (MPa) | $f_{R,2}$ (MPa) | $f_{R,3}$ (MPa) | $f_{R,4}$ (MPa) | α_{pre} | α_{post} |
| 3.93 | 0.03 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1.001 | 10 |

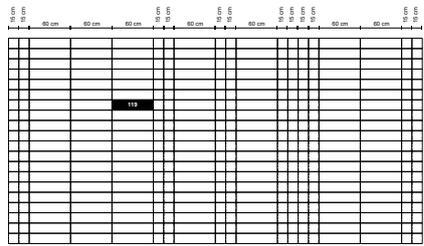


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

Observaciones:

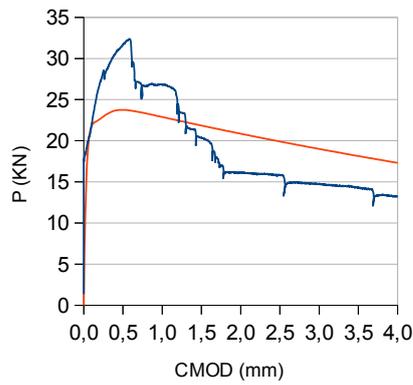


(a) Ubicación de la probeta

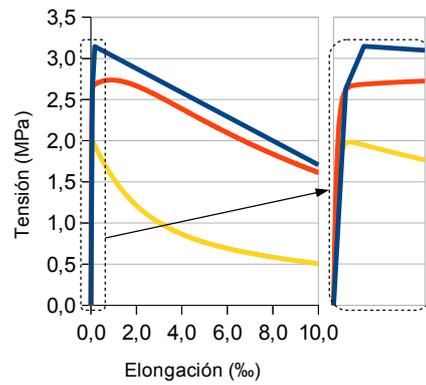


(b) Imagen de la probeta

| Probeta n° | | | | | | |
|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------------------|-----------------|
| 119 | | | | | | |
| | | Longitud (mm) | Anchura (mm) | Altura (mm) | n° fibras en sección rotura | |
| | | $L_{0/15}$ (H) | $L_{15/30}$ (H) | $L_{30/45}$ (H) | $L_{45/60}$ (H) | |
| | | 1.219 | 1.442 | 1.426 | 1.571 | |
| F_L (KN) | F_1 (KN) | F_2 (KN) | F_3 (KN) | F_4 (KN) | α_{pre} | α_{post} |
| 19.86 | 31.68 | 20.37 | 15.84 | 14.29 | 1.001 | 100 |
| $f_{ct,fl}$ (MPa) | $f_{R,1}$ (MPa) | $f_{R,2}$ (MPa) | $f_{R,3}$ (MPa) | $f_{R,4}$ (MPa) | α_{pre} | α_{post} |
| 6.57 | 10.49 | 6.74 | 5.24 | 4.73 | 100 | 10 |

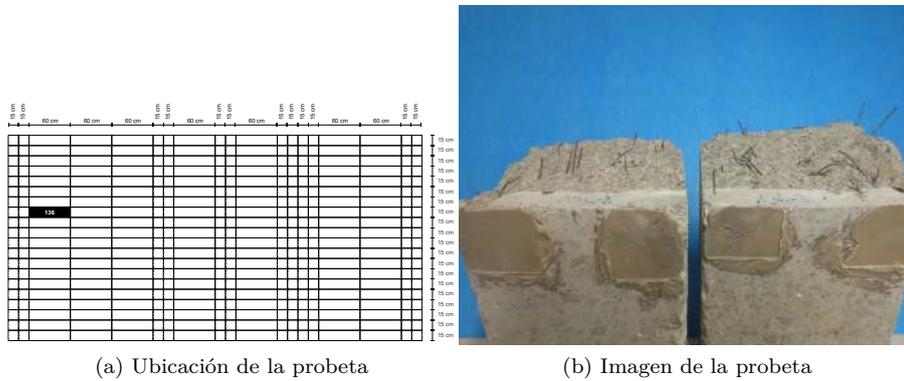


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

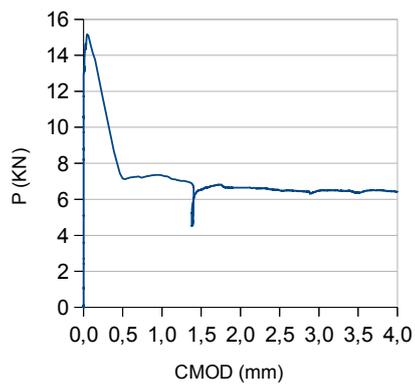
Observaciones:



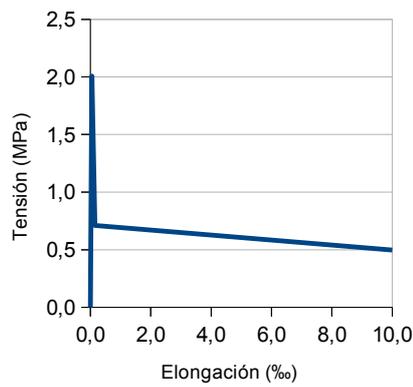
(a) Ubicación de la probeta

(b) Imagen de la probeta

| Probeta n° | | Longitud (mm) | Anchura (mm) | Altura (mm) | n° fibras en sección rotura | |
|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------------------|-----------------|
| 136 | | | 142 | | 26 | |
| | | $L_{0/15}$ (H) | $L_{15/30}$ (H) | $L_{30/45}$ (H) | $L_{45/60}$ (H) | |
| | | N/A | N/A | N/A | N/A | |
| F_L (KN) | F_1 (KN) | F_2 (KN) | F_3 (KN) | F_4 (KN) | α_{pre} | α_{post} |
| 15.16 | 7.15 | 6.54 | 6.56 | 6.56 | N/A | N/A |
| $f_{ct,fl}$ (MPa) | $f_{R,1}$ (MPa) | $f_{R,2}$ (MPa) | $f_{R,3}$ (MPa) | $f_{R,4}$ (MPa) | α_{pre} | α_{post} |
| 5.02 | 2.37 | 2.17 | 2.15 | 2.11 | N/A | N/A |

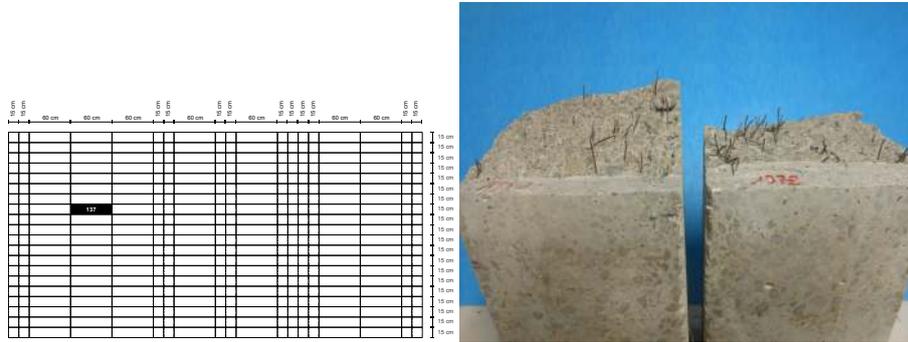


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

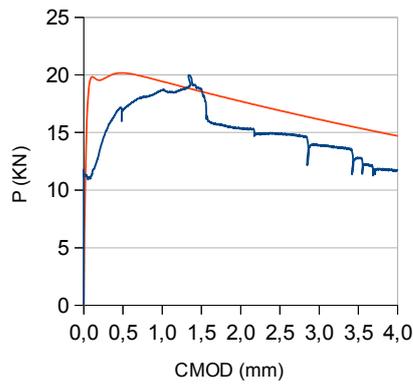
Observaciones:



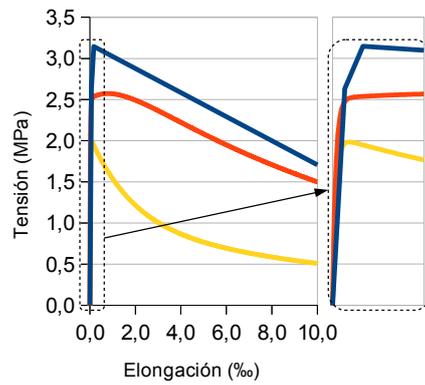
(a) Ubicación de la probeta

(b) Imagen de la probeta

| Probeta n° | | | | | | |
|----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------------------|-----------------|
| 137 | | | | | | |
| | | Longitud (mm) | Anchura (mm) | Altura (mm) | n° fibras en sección rotura | |
| | | 600 | 145 | 144 | 69 | |
| | | $L_{0/15}$ (H) | $L_{15/30}$ (H) | $L_{30/45}$ (H) | $L_{45/60}$ (H) | |
| | | 0.711 | 1.106 | 1.348 | 1.000 | |
| F_L (KN) | F_1 (KN) | F_2 (KN) | F_3 (KN) | F_4 (KN) | α_{pre} | α_{post} |
| 11.79 | 16.96 | 18.80 | 14.85 | 12.76 | 1.001 | 100 |
| $f_{ct,fl}$ (MPa) | $f_{R,1}$ (MPa) | $f_{R,2}$ (MPa) | $f_{R,3}$ (MPa) | $f_{R,4}$ (MPa) | α_{pre} | α_{post} |
| 3.90 | 5.61 | 6.22 | 4.92 | 4.22 | 100 | 10 |

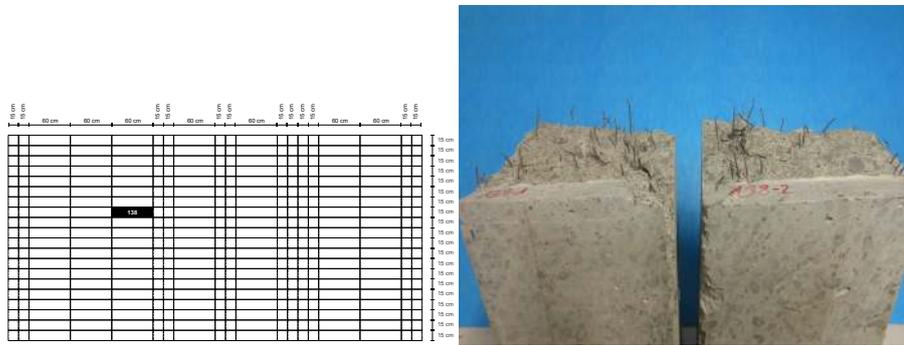


(a) P-CMOD

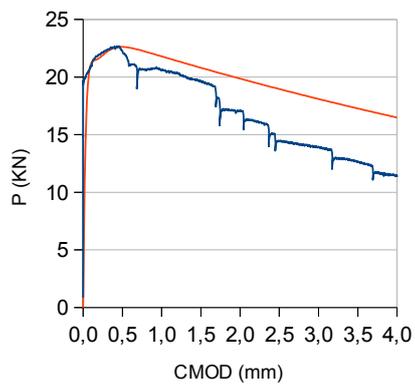


(b) $\sigma - \epsilon$

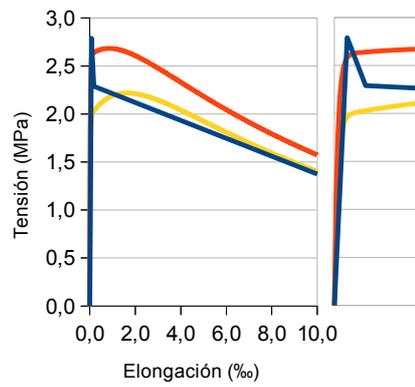
Observaciones:



| Probeta n° | | Longitud (mm) | Anchura (mm) | Altura (mm) | n° fibras en sección rotura | |
|--------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------------------|-----------------|
| 138 | | 597 | 140 | 144 | 71 | |
| | | $L_{0/15}$ (H) | $L_{15/30}$ (H) | $L_{30/45}$ (H) | $L_{45/60}$ (H) | |
| | | 1.006 | 1.361 | 1.391 | 1.270 | |
| F_L (KN) | F_1 (KN) | F_2 (KN) | F_3 (KN) | F_4 (KN) | α_{pre} | α_{post} |
| 20.34 | 22.25 | 19.64 | 14.43 | 12.64 | | |
| $f_{ct, fl}$ (MPa) | $f_{R,1}$ (MPa) | $f_{R,2}$ (MPa) | $f_{R,3}$ (MPa) | $f_{R,4}$ (MPa) | α_{pre} | α_{post} |
| 6.97 | 7.63 | 6.73 | 4.95 | 4.33 | 100 | 10 |

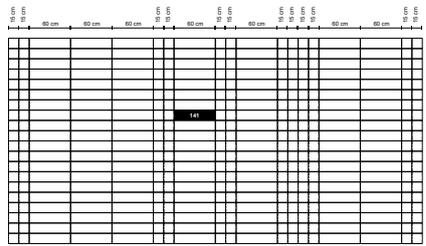


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

Observaciones:

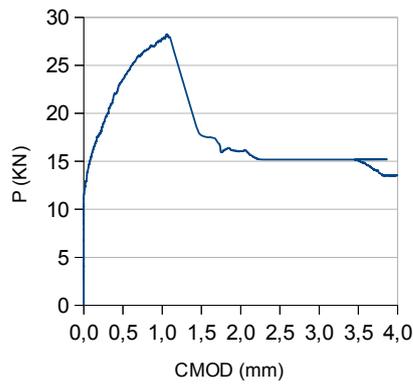


(a) Ubicación de la probeta

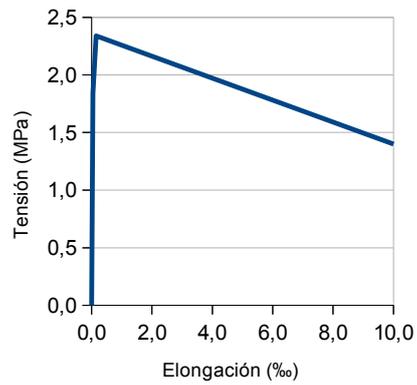


(b) Imagen de la probeta

| Probeta n° | | | | | | |
|--------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------------------|-----------------|
| 141 | | | | | | |
| | | Longitud (mm) | Anchura (mm) | Altura (mm) | n° fibras en sección rotura | |
| | | | 142 | | 70 | |
| | | $L_{0/15}$ (H) | $L_{15/30}$ (H) | $L_{30/45}$ (H) | $L_{45/60}$ (H) | |
| | | N/A | N/A | N/A | N/A | |
| F_L (KN) | F_1 (KN) | F_2 (KN) | F_3 (KN) | F_4 (KN) | α_{pre} | α_{post} |
| 13.91 | 23.54 | 17.71 | 15.19 | 15.08 | N/A | N/A |
| $f_{ct, f1}$ (MPa) | $f_{R,1}$ (MPa) | $f_{R,2}$ (MPa) | $f_{R,3}$ (MPa) | $f_{R,4}$ (MPa) | α_{pre} | α_{post} |
| 4.60 | 7.79 | 5.86 | 5.03 | 4.99 | N/A | N/A |

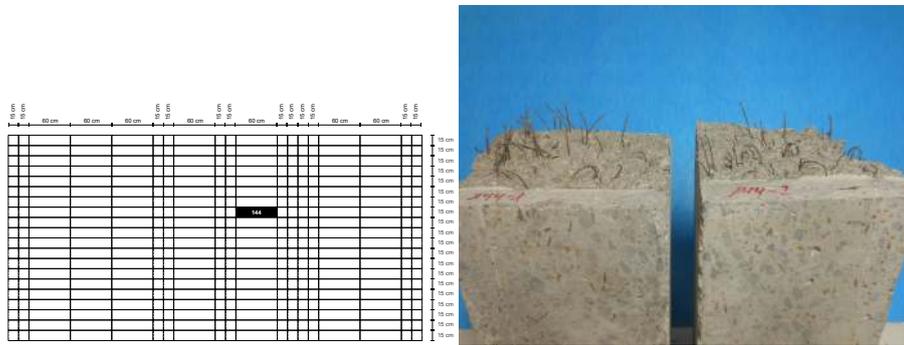


(a) P-CMOD

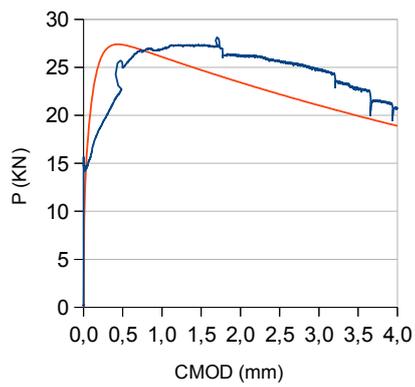


(b) $\sigma - \epsilon$

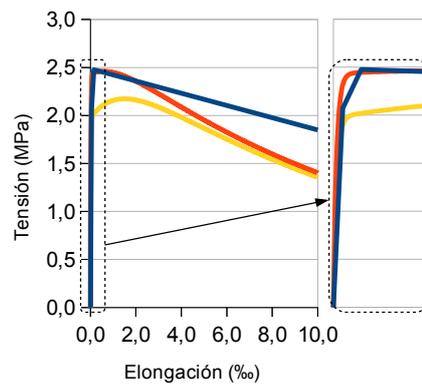
Observaciones:



| Probeta n° | | Longitud (mm) | Anchura (mm) | Altura (mm) | n° fibras en sección rotura | |
|--------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------------------|-----------------|
| 144 | | 594 | 145 | 148 | 85 | |
| | | $L_{0/15}$ (H) | $L_{15/30}$ (H) | $L_{30/45}$ (H) | $L_{45/60}$ (H) | |
| | | 1.181 | 1.106 | 1.092 | 0.969 | |
| F_L (KN) | F_1 (KN) | F_2 (KN) | F_3 (KN) | F_4 (KN) | α_{pre} | α_{post} |
| 15.64 | 24.94 | 27.30 | 25.65 | 22.78 | 1.001 | 100 |
| $f_{ct, fl}$ (MPa) | $f_{R,1}$ (MPa) | $f_{R,2}$ (MPa) | $f_{R,3}$ (MPa) | $f_{R,4}$ (MPa) | α_{pre} | α_{post} |
| 5.18 | 8.26 | 9.04 | 8.49 | 7.54 | 100 | 10 |

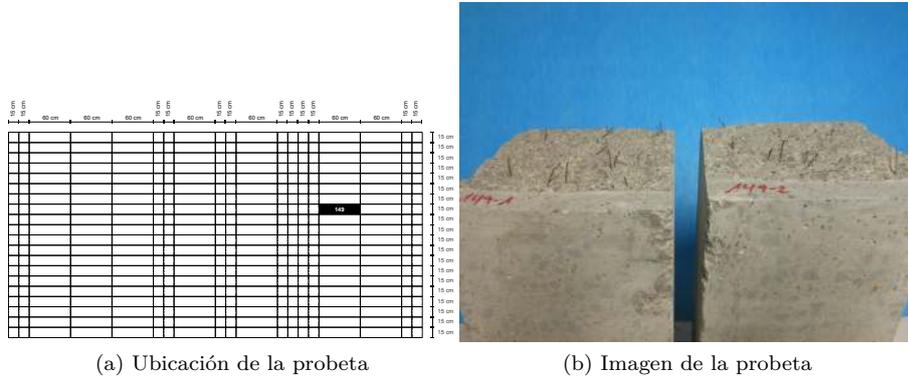


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

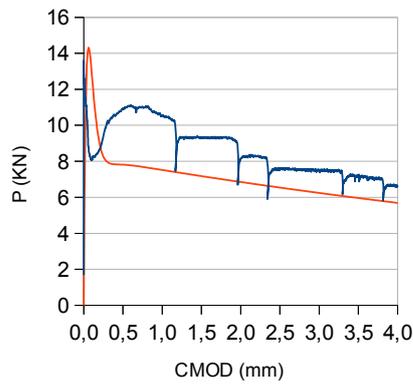
Observaciones:



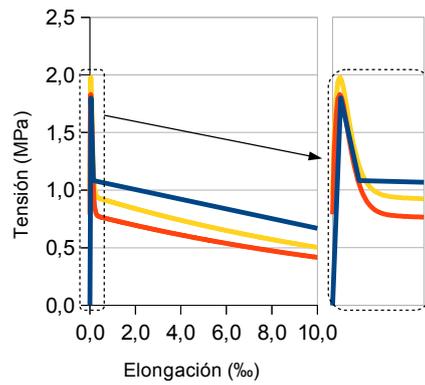
(a) Ubicación de la probeta

(b) Imagen de la probeta

| Probeta n° | | | | | | |
|-----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------------------|-----------------|
| 149 | | | | | | |
| | | Longitud (mm) | Anchura (mm) | Altura (mm) | n° fibras en sección rotura | |
| | | 592 | 148 | 148 | 31 | |
| | | $L_{0/15}$ (H) | $L_{15/30}$ (H) | $L_{30/45}$ (H) | $L_{45/60}$ (H) | |
| | | 0.520 | 0.496 | 0.454 | 0.375 | |
| F_L (KN) | F_1 (KN) | F_2 (KN) | F_3 (KN) | F_4 (KN) | α_{pre} | α_{post} |
| 13.59 | 10.90 | 9.31 | 7.58 | 7.23 | 1.001 | 100 |
| $f_{ct, f1}$ (MPa) | $f_{R,1}$ (MPa) | $f_{R,2}$ (MPa) | $f_{R,3}$ (MPa) | $f_{R,4}$ (MPa) | α_{pre} | α_{post} |
| 4.50 | 3.61 | 3.08 | 2.51 | 2.39 | 1.001 | 10 |

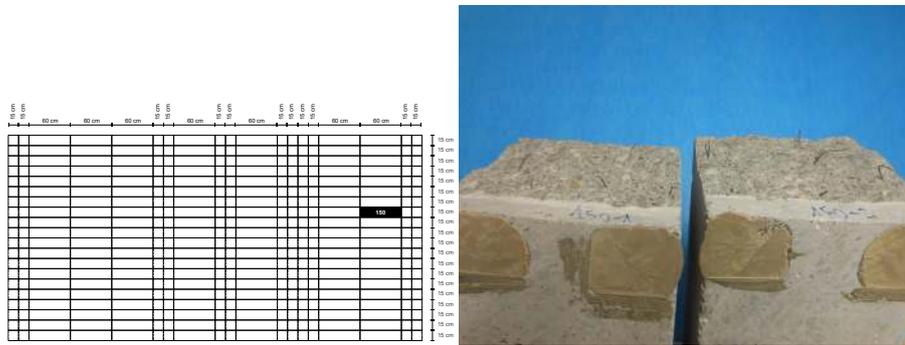


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

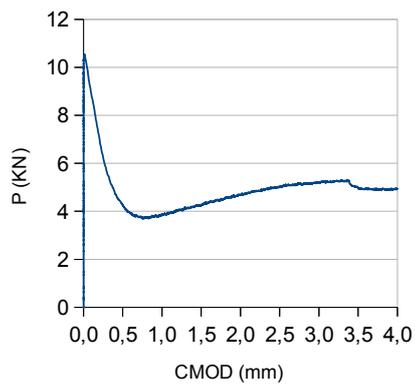
Observaciones:



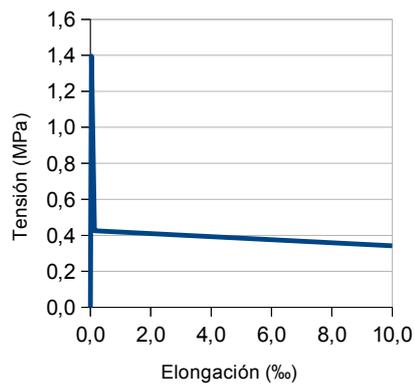
(a) Ubicación de la probeta

(b) Imagen de la probeta

| Probeta n° | | Longitud (mm) | Anchura (mm) | Altura (mm) | n° fibras en sección rotura | |
|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------------------|-----------------|
| 150 | | | 146 | | 12 | |
| | | $L_{0/15}$ (H) | $L_{15/30}$ (H) | $L_{30/45}$ (H) | $L_{45/60}$ (H) | |
| | | N/A | N/A | N/A | N/A | |
| F_L (KN) | F_1 (KN) | F_2 (KN) | F_3 (KN) | F_4 (KN) | α_{pre} | α_{post} |
| 10.54 | 4.28 | 4.26 | 5.03 | 4.98 | N/A | N/A |
| $f_{ct,fl}$ (MPa) | $f_{R,1}$ (MPa) | $f_{R,2}$ (MPa) | $f_{R,3}$ (MPa) | $f_{R,4}$ (MPa) | α_{pre} | α_{post} |
| 3.49 | 1.42 | 1.41 | 1.66 | 1.85 | N/A | N/A |

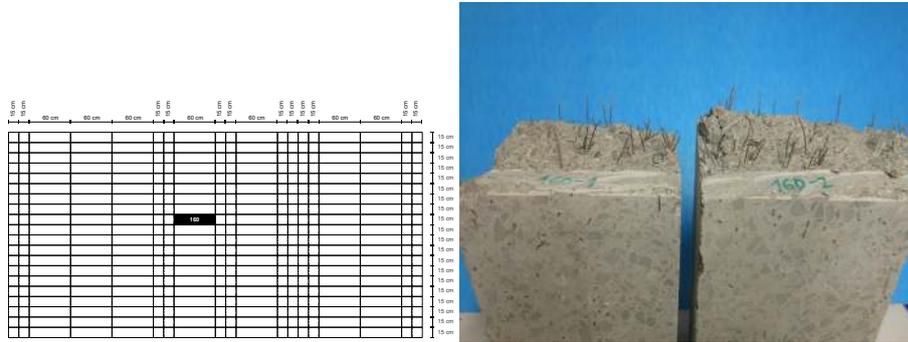


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

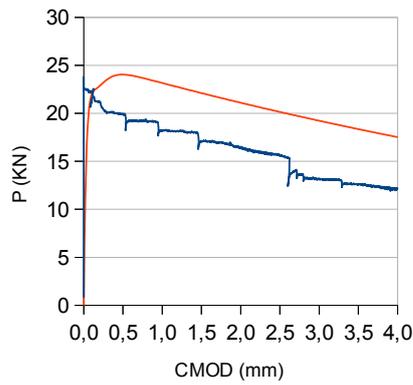
Observaciones:



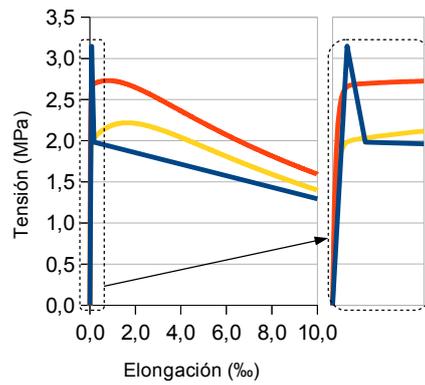
(a) Ubicación de la probeta

(b) Imagen de la probeta

| Probeta n° | | | | | | |
|--------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------------------|-----------------|
| 160 | | | | | | |
| | | Longitud (mm) | Anchura (mm) | Altura (mm) | n° fibras en sección rotura | |
| | | | | | 89 | |
| | | $L_{0/15}$ (H) | $L_{15/30}$ (H) | $L_{30/45}$ (H) | $L_{45/60}$ (H) | |
| | | 1.149 | 1.339 | 1.617 | 1.367 | |
| F_L (KN) | F_1 (KN) | F_2 (KN) | F_3 (KN) | F_4 (KN) | α_{pre} | α_{post} |
| 23.78 | 19.96 | 17.06 | 15.64 | 12.60 | 1.001 | 100 |
| $f_{ct, f1}$ (MPa) | $f_{R,1}$ (MPa) | $f_{R,2}$ (MPa) | $f_{R,3}$ (MPa) | $f_{R,4}$ (MPa) | α_{pre} | α_{post} |
| 7.87 | 6.61 | 5.65 | 5.18 | 4.17 | 100 | 10 |

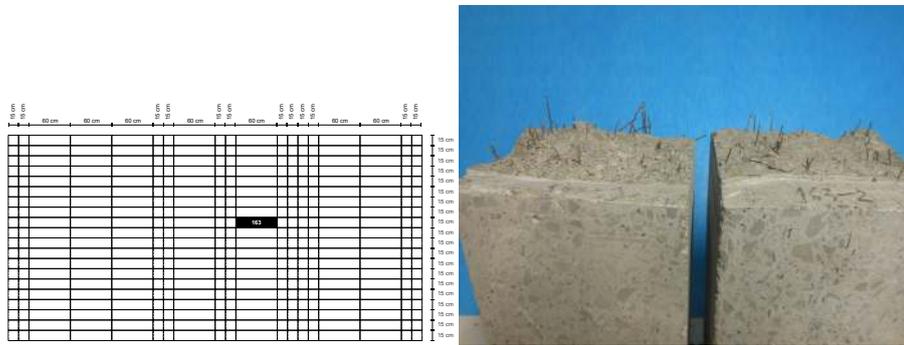


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

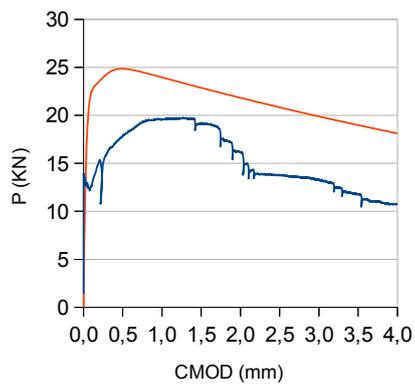
Observaciones:



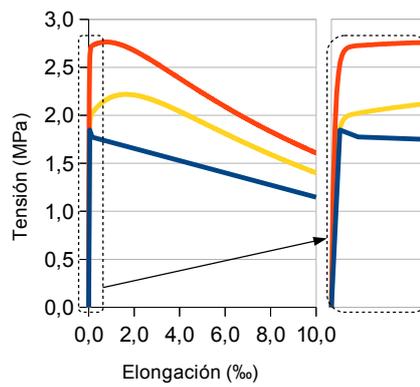
(a) Ubicación de la probeta

(b) Imagen de la probeta

| Probeta n° | | Longitud (mm) | Anchura (mm) | Altura (mm) | n° fibras en sección rotura | |
|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------------------|-----------------|
| 163 | | $L_{0/15}$ (H) | $L_{15/30}$ (H) | $L_{30/45}$ (H) | 80 | |
| | | 1.318 | 1.525 | 1.506 | 1.322 | |
| F_L (KN) | F_1 (KN) | F_2 (KN) | F_3 (KN) | F_4 (KN) | α_{pre} | α_{post} |
| 13.95 | 17.83 | 19.23 | 13.76 | 11.78 | 1.001 | 100 |
| $f_{ct,fl}$ (MPa) | $f_{R,1}$ (MPa) | $f_{R,2}$ (MPa) | $f_{R,3}$ (MPa) | $f_{R,4}$ (MPa) | α_{pre} | α_{post} |
| 4.62 | 5.91 | 6.37 | 4.56 | 3.90 | 100 | 10 |

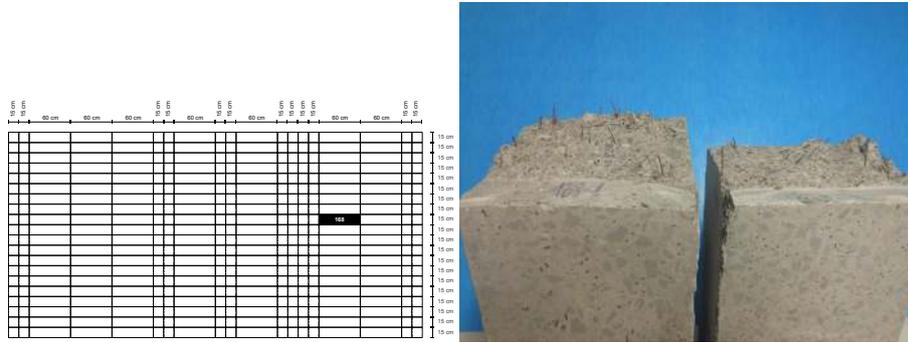


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

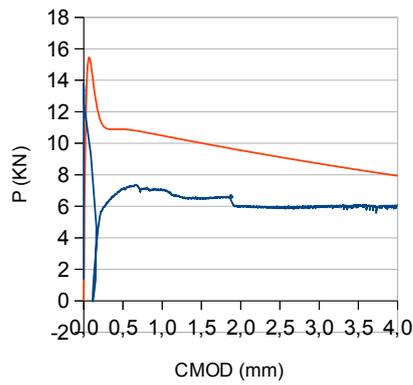
Observaciones:



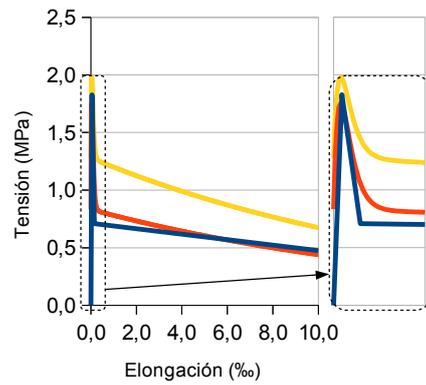
(a) Ubicación de la probeta

(b) Imagen de la probeta

| Probeta n° | | | | | | |
|--------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------------------|-----------------|
| 168 | | | | | | |
| | | Longitud (mm) | Anchura (mm) | Altura (mm) | n° fibras en sección rotura | |
| | | $L_{0/15}$ (H) | $L_{15/30}$ (H) | $L_{30/45}$ (H) | $L_{45/60}$ (H) | |
| | | 0.813 | 0.823 | 0.576 | 0.486 | |
| F_L (KN) | F_1 (KN) | F_2 (KN) | F_3 (KN) | F_4 (KN) | α_{pre} | α_{post} |
| 13.80 | 7.11 | 6.51 | 5.95 | 6.03 | 1.001 | 100 |
| $f_{ct, f1}$ (MPa) | $f_{R,1}$ (MPa) | $f_{R,2}$ (MPa) | $f_{R,3}$ (MPa) | $f_{R,4}$ (MPa) | α_{pre} | α_{post} |
| 4.57 | 2.36 | 2.16 | 1.97 | 2.00 | 1.001 | 10 |

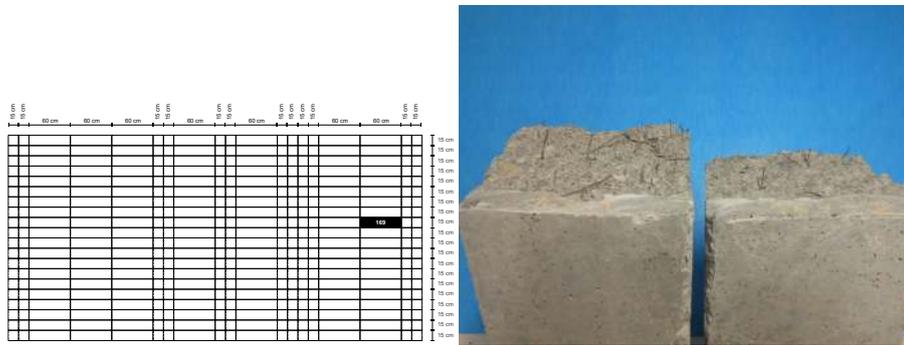


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

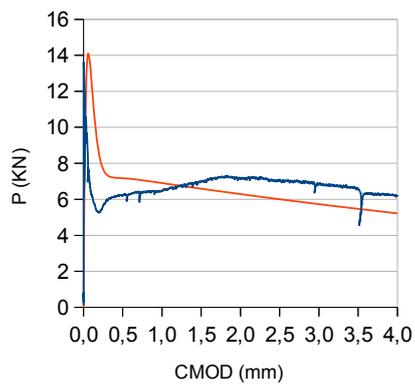
Observaciones:



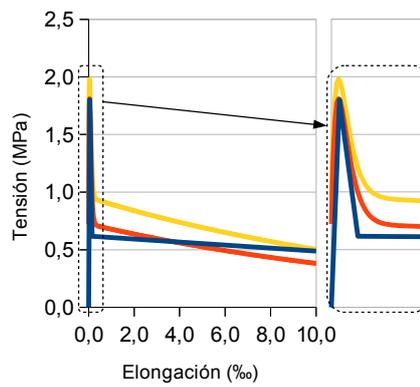
(a) Ubicación de la probeta

(b) Imagen de la probeta

| Probeta n° | | Longitud (mm) | Anchura (mm) | Altura (mm) | n° fibras en sección rotura | |
|--------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------------------|-----------------|
| 169 | | $L_{0/15}$ (H) | $L_{15/30}$ (H) | $L_{30/45}$ (H) | 35 | |
| | | 0.335 | 0.357 | 0.390 | 0.198 | |
| F_L (KN) | F_1 (KN) | F_2 (KN) | F_3 (KN) | F_4 (KN) | α_{pre} | α_{post} |
| 13.61 | 6.21 | 7.01 | 7.09 | 6.58 | 1.001 | 100 |
| $f_{ct, fl}$ (MPa) | $f_{R,1}$ (MPa) | $f_{R,2}$ (MPa) | $f_{R,3}$ (MPa) | $f_{R,4}$ (MPa) | α_{pre} | α_{post} |
| 4.51 | 2.06 | 2.32 | 3.35 | 2.18 | 1.001 | 10 |

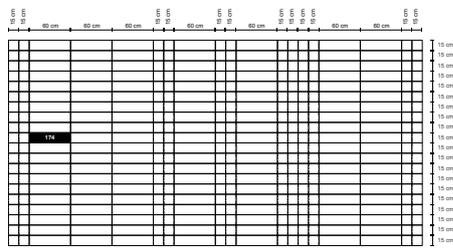


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

Observaciones:

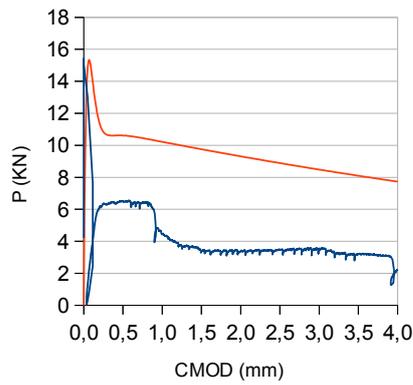


(a) Ubicación de la probeta

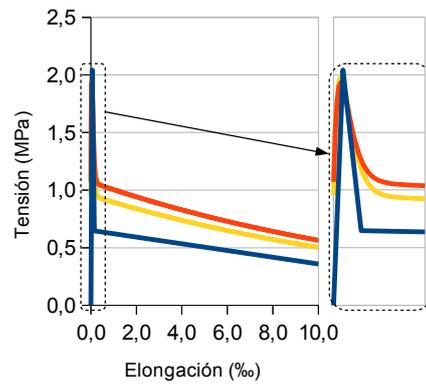


(b) Imagen de la probeta

| Probeta n° | | | | | | |
|----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------------------|-----------------|
| 174 | | | | | | |
| | | Longitud (mm) | Anchura (mm) | Altura (mm) | n° fibras en sección rotura | |
| | | 597 | 150 | 145 | 38 | |
| | | $L_{0/15}$ (H) | $L_{15/30}$ (H) | $L_{30/45}$ (H) | $L_{45/60}$ (H) | |
| | | 1.162 | 0.731 | 0.588 | 0.880 | |
| F_L (KN) | F_1 (KN) | F_2 (KN) | F_3 (KN) | F_4 (KN) | α_{pre} | α_{post} |
| 15.42 | 6.51 | 3.38 | 3.46 | 3.19 | 1.001 | 100 |
| $f_{ct,fl}$ (MPa) | $f_{R,1}$ (MPa) | $f_{R,2}$ (MPa) | $f_{R,3}$ (MPa) | $f_{R,4}$ (MPa) | α_{pre} | α_{post} |
| 5.10 | 2.16 | 1.12 | 1.15 | 1.06 | 1.001 | 10 |

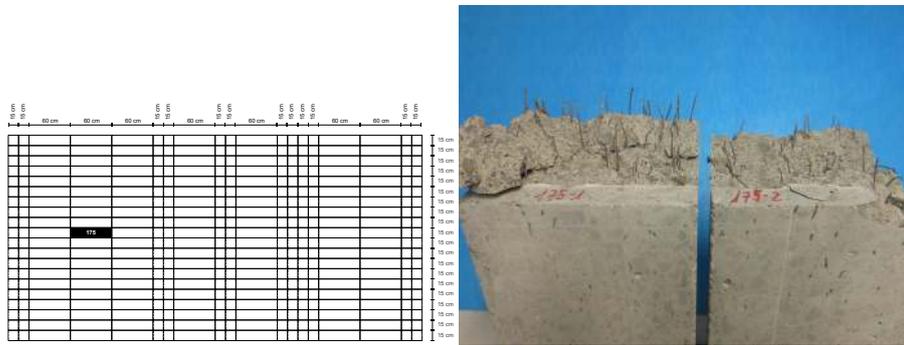


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

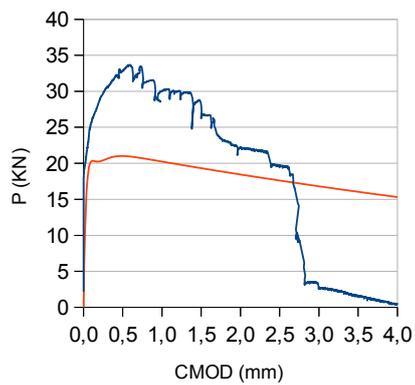
Observaciones:



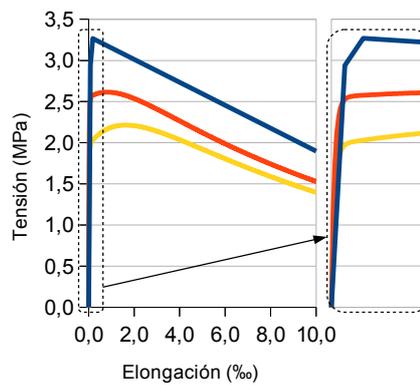
(a) Ubicación de la probeta

(b) Imagen de la probeta

| Probeta n° | | Longitud (mm) | Anchura (mm) | Altura (mm) | n° fibras en sección rotura | |
|-----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------------------|-----------------|
| 175 | | 596 | 149 | 146 | 86 | |
| | | $L_{0/15}$ (H) | $L_{15/30}$ (H) | $L_{30/45}$ (H) | $L_{45/60}$ (H) | |
| | | 0.602 | 1.223 | 1.332 | 1.348 | |
| F_L (KN) | F_1 (KN) | F_2 (KN) | F_3 (KN) | F_4 (KN) | α_{pre} | α_{post} |
| 22.19 | 32.89 | 28.33 | 19.42 | 1.58 | 1.001 | 100 |
| $f_{ct, fl}$ (MPa) | $f_{R,1}$ (MPa) | $f_{R,2}$ (MPa) | $f_{R,3}$ (MPa) | $f_{R,4}$ (MPa) | α_{pre} | α_{post} |
| 7.35 | 10.89 | 8.81 | 6.51 | 0.52 | 100 | 10 |

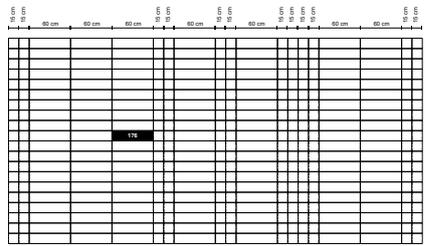


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

Observaciones:

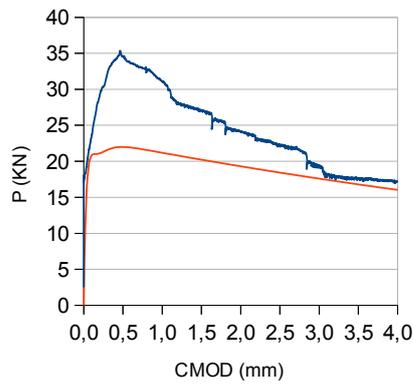


(a) Ubicación de la probeta

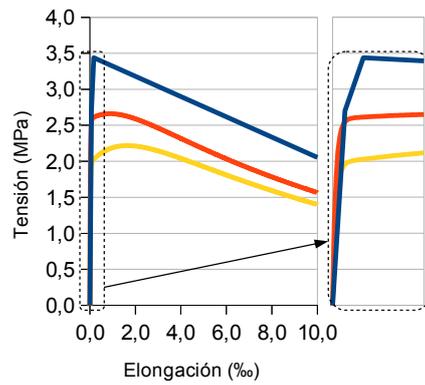


(b) Imagen de la probeta

| Probeta n° | | | | | | |
|-----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------------------|-----------------|
| 176 | | | | | | |
| | | Longitud (mm) | Anchura (mm) | Altura (mm) | n° fibras en sección rotura | |
| | | 597 | 143 | 145 | 94 | |
| | | $L_{0/15}$ (H) | $L_{15/30}$ (H) | $L_{30/45}$ (H) | $L_{45/60}$ (H) | |
| | | 1.102 | 1.330 | 1.345 | 0.790 | |
| F_L (KN) | F_1 (KN) | F_2 (KN) | F_3 (KN) | F_4 (KN) | α_{pre} | α_{post} |
| 20.40 | 34.62 | 27.12 | 22.24 | 17.65 | 1.001 | 100 |
| $f_{ct, f1}$ (MPa) | $f_{R,1}$ (MPa) | $f_{R,2}$ (MPa) | $f_{R,3}$ (MPa) | $f_{R,4}$ (MPa) | α_{pre} | α_{post} |
| 6.75 | 11.46 | 8.98 | 7.36 | 5.84 | 100 | 10 |

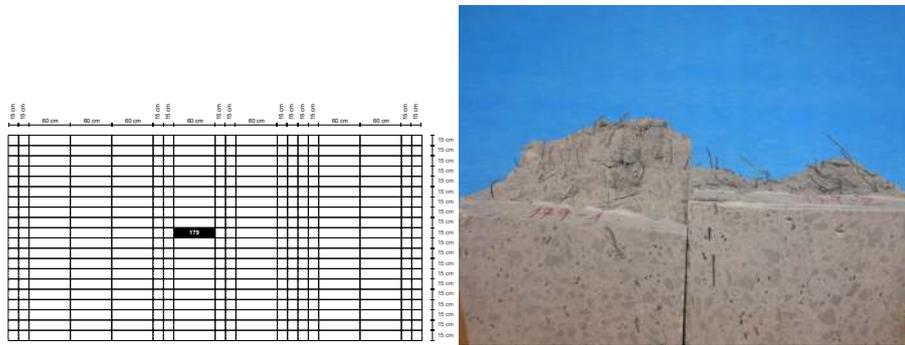


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

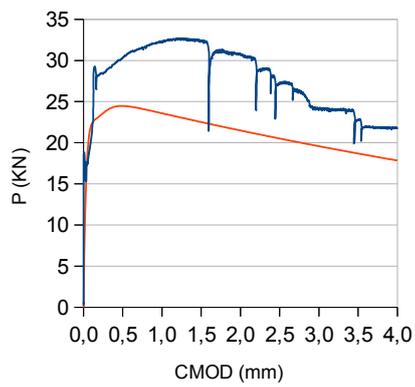
Observaciones:



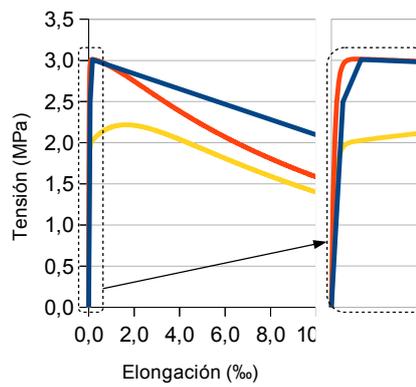
(a) Ubicación de la probeta

(b) Imagen de la probeta

| Probeta n° | | Longitud (mm) | Anchura (mm) | Altura (mm) | n° fibras en sección rotura | |
|----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------------------|-----------------|
| 179 | | 602 | 147 | 144 | 100 | |
| | | $L_{0/15}$ (H) | $L_{15/30}$ (H) | $L_{30/45}$ (H) | $L_{45/60}$ (H) | |
| | | 1.035 | 1.336 | 1.641 | 1.297 | |
| F_L (KN) | F_1 (KN) | F_2 (KN) | F_3 (KN) | F_4 (KN) | α_{pre} | α_{post} |
| 18.83 | 30.30 | 32.41 | 27.27 | 22.80 | 1.001 | 100 |
| $f_{ct,fl}$ (MPa) | $f_{R,1}$ (MPa) | $f_{R,2}$ (MPa) | $f_{R,3}$ (MPa) | $f_{R,4}$ (MPa) | α_{pre} | α_{post} |
| 6.23 | 10.03 | 10.73 | 9.03 | 7.55 | 100 | 10 |

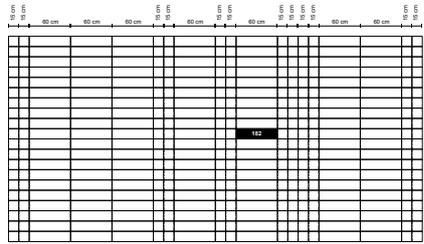


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

Observaciones:

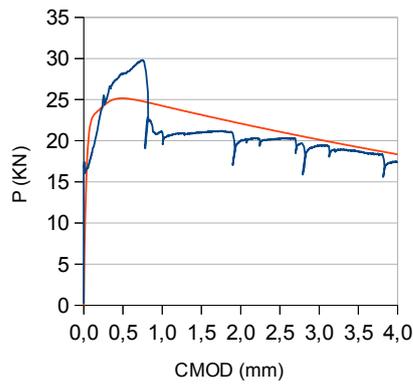


(a) Ubicación de la probeta

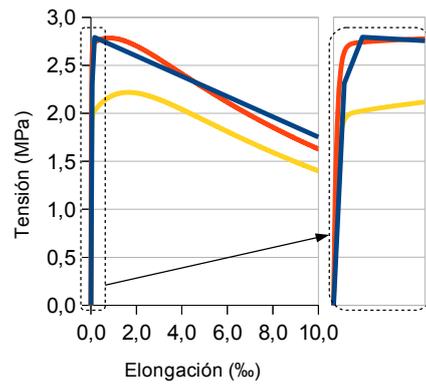


(b) Imagen de la probeta

| Probeta n° | | | | | | |
|-----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------------------|-----------------|
| 182 | | | | | | |
| | | Longitud (mm) | Anchura (mm) | Altura (mm) | n° fibras en sección rotura | |
| | | 594 | 148 | 140 | 86 | |
| | | $L_{0/15}$ (H) | $L_{15/30}$ (H) | $L_{30/45}$ (H) | $L_{45/60}$ (H) | |
| | | 1.544 | 1.614 | 1.447 | 1.033 | |
| F_L (KN) | F_1 (KN) | F_2 (KN) | F_3 (KN) | F_4 (KN) | α_{pre} | α_{post} |
| 17.44 | 28.11 | 20.96 | 20.28 | 18.72 | 1.001 | 100 |
| $f_{ct, f1}$ (MPa) | $f_{R,1}$ (MPa) | $f_{R,2}$ (MPa) | $f_{R,3}$ (MPa) | $f_{R,4}$ (MPa) | α_{pre} | α_{post} |
| 5.77 | 9.31 | 6.94 | 6.71 | 6.20 | 100 | 10 |

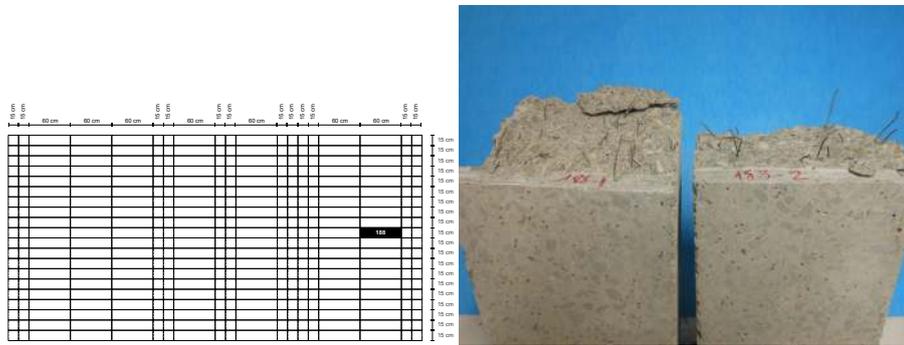


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

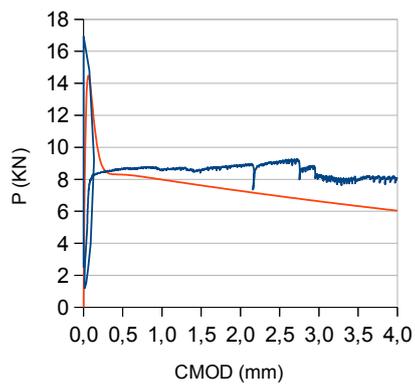
Observaciones:



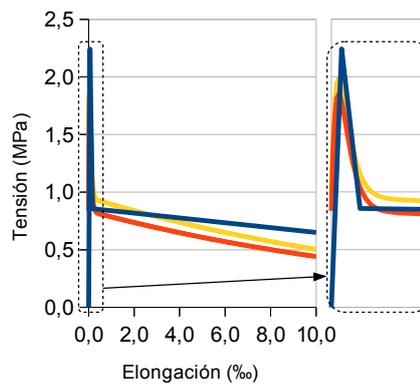
(a) Ubicación de la probeta

(b) Imagen de la probeta

| Probeta n° | | Longitud (mm) | Anchura (mm) | Altura (mm) | n° fibras en sección rotura | |
|-----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------------------|-----------------|
| 188 | | 598 | 150 | 140 | 41 | |
| | | $L_{0/15}$ (H) | $L_{15/30}$ (H) | $L_{30/45}$ (H) | $L_{45/60}$ (H) | |
| | | 0.529 | 0.515 | 0.492 | 0.316 | |
| F_L (KN) | F_1 (KN) | F_2 (KN) | F_3 (KN) | F_4 (KN) | α_{pre} | α_{post} |
| 16.93 | 8.63 | 8.54 | 9.13 | 8.00 | 1.001 | 100 |
| $f_{ct, fl}$ (MPa) | $f_{R,1}$ (MPa) | $f_{R,2}$ (MPa) | $f_{R,3}$ (MPa) | $f_{R,4}$ (MPa) | α_{pre} | α_{post} |
| 5.60 | 2.86 | 2.83 | 3.02 | 2.65 | 1.001 | 10 |

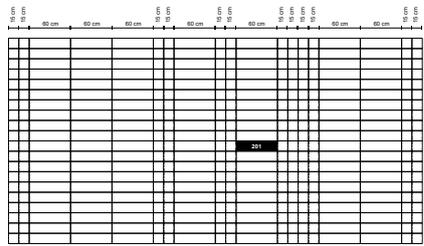


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

Observaciones:

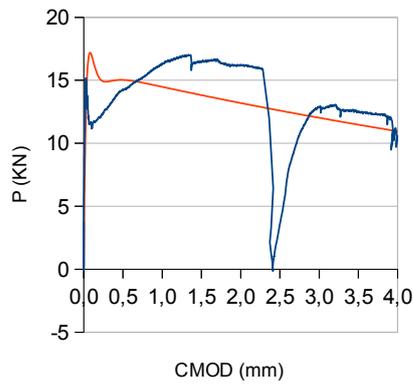


(a) Ubicación de la probeta

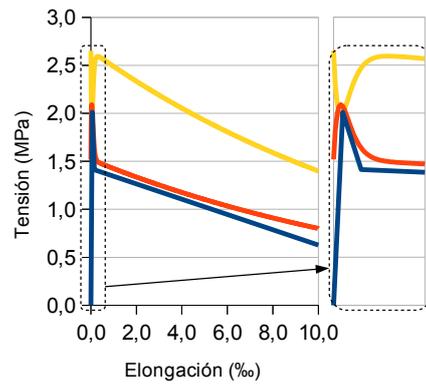


(b) Imagen de la probeta

| Probeta n° | | | | | | |
|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------------------|-----------------|
| 201 | | | | | | |
| | | Longitud (mm) | Anchura (mm) | Altura (mm) | n° fibras en sección rotura | |
| | | $L_{0/15}$ (H) | $L_{15/30}$ (H) | $L_{30/45}$ (H) | $L_{45/60}$ (H) | |
| | | 1.425 | 1.229 | 0.801 | 0.996 | |
| F_L (KN) | F_1 (KN) | F_2 (KN) | F_3 (KN) | F_4 (KN) | α_{pre} | α_{post} |
| 15.18 | 14.22 | 16.49 | 3.50 | 12.54 | 1.001 | 100 |
| $f_{ct,fl}$ (MPa) | $f_{R,1}$ (MPa) | $f_{R,2}$ (MPa) | $f_{R,3}$ (MPa) | $f_{R,4}$ (MPa) | α_{pre} | α_{post} |
| 5.03 | 4.71 | 5.46 | 1.16 | 4.15 | 1.001 | 10 |

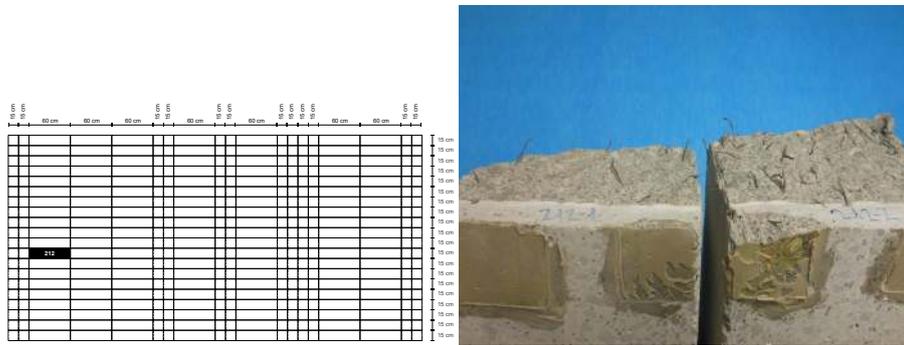


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

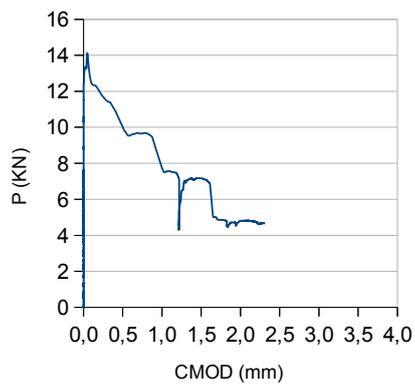
Observaciones:



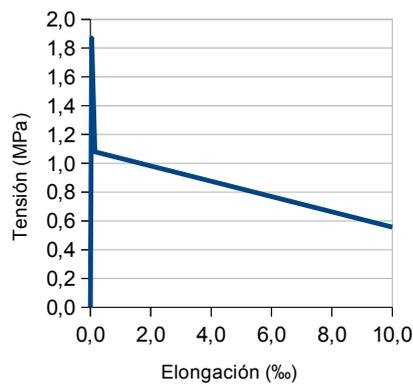
(a) Ubicación de la probeta

(b) Imagen de la probeta

| Probeta n° | | Longitud (mm) | Anchura (mm) | Altura (mm) | n° fibras en sección rotura | |
|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------------------|-----------------|
| 212 | | | 146 | | 28 | |
| | | $L_{0/15}$ (H) | $L_{15/30}$ (H) | $L_{30/45}$ (H) | $L_{45/60}$ (H) | |
| | | N/A | N/A | N/A | N/A | |
| F_L (KN) | F_1 (KN) | F_2 (KN) | F_3 (KN) | F_4 (KN) | α_{pre} | α_{post} |
| 14.12 | 10.87 | 7.17 | 4.87 | 4.67 | N/A | N/A |
| $f_{ct,fl}$ (MPa) | $f_{R,1}$ (MPa) | $f_{R,2}$ (MPa) | $f_{R,3}$ (MPa) | $f_{R,4}$ (MPa) | α_{pre} | α_{post} |
| 4.67 | 3.60 | 2.37 | 1.55 | 1.55 | N/A | N/A |

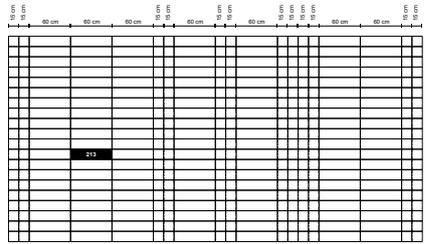


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

Observaciones:

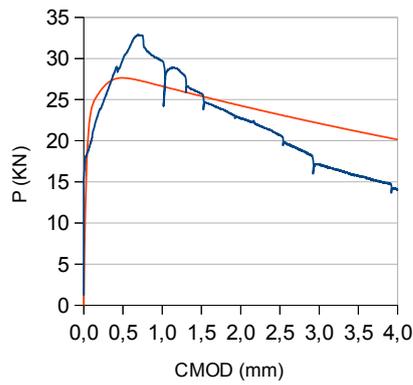


(a) Ubicación de la probeta

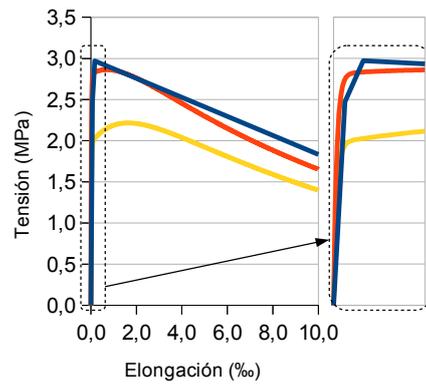


(b) Imagen de la probeta

| Probeta n° | | | | | | |
|-----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------------------|-----------------|
| 213 | | | | | | |
| | | Longitud (mm) | Anchura (mm) | Altura (mm) | n° fibras en sección rotura | |
| | | 595 | 150 | 144 | 87 | |
| | | $L_{0/15}$ (H) | $L_{15/30}$ (H) | $L_{30/45}$ (H) | $L_{45/60}$ (H) | |
| | | 1.286 | 1.756 | 1.606 | 1.367 | |
| F_L (KN) | F_1 (KN) | F_2 (KN) | F_3 (KN) | F_4 (KN) | α_{pre} | α_{post} |
| 18.67 | 29.92 | 25.71 | 20.71 | 15.71 | 1.001 | 100 |
| $f_{ct, f1}$ (MPa) | $f_{R,1}$ (MPa) | $f_{R,2}$ (MPa) | $f_{R,3}$ (MPa) | $f_{R,4}$ (MPa) | α_{pre} | α_{post} |
| 6.18 | 9.90 | 8.51 | 6.86 | 5.20 | 100 | 10 |

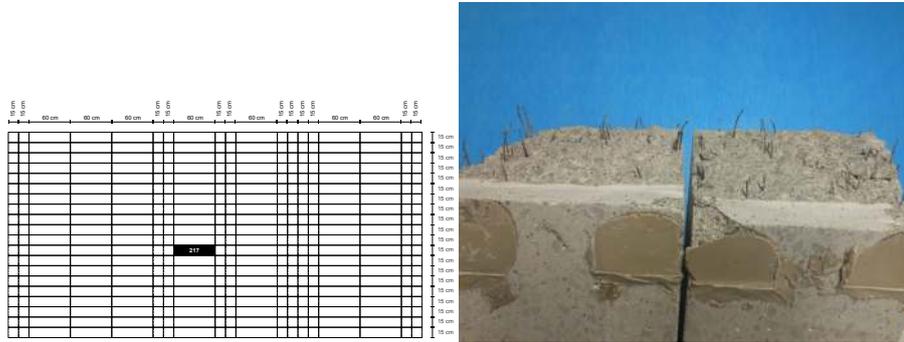


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

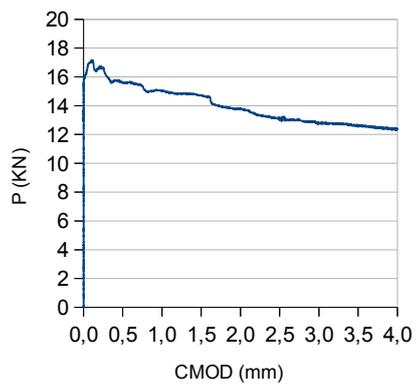
Observaciones:



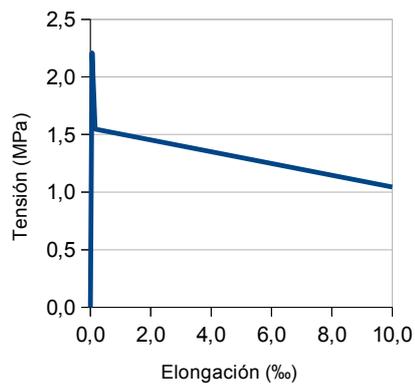
(a) Ubicación de la probeta

(b) Imagen de la probeta

| Probeta n° | | Longitud (mm) | Anchura (mm) | Altura (mm) | n° fibras en sección rotura | |
|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------------------|-----------------|
| 217 | | | 146 | | 67 | |
| | | $L_{0/15}$ (H) | $L_{15/30}$ (H) | $L_{30/45}$ (H) | $L_{45/60}$ (H) | |
| | | N/A | N/A | N/A | N/A | |
| F_L (KN) | F_1 (KN) | F_2 (KN) | F_3 (KN) | F_4 (KN) | α_{pre} | α_{post} |
| 16.68 | 15.58 | 14.72 | 13.12 | 12.63 | N/A | N/A |
| $f_{ct,fl}$ (MPa) | $f_{R,1}$ (MPa) | $f_{R,2}$ (MPa) | $f_{R,3}$ (MPa) | $f_{R,4}$ (MPa) | α_{pre} | α_{post} |
| 5.52 | 5.16 | 4.87 | 4.34 | 4.18 | N/A | N/A |

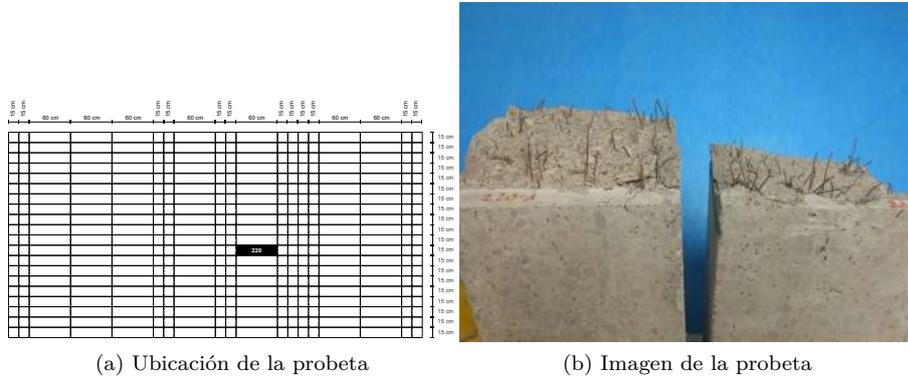


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

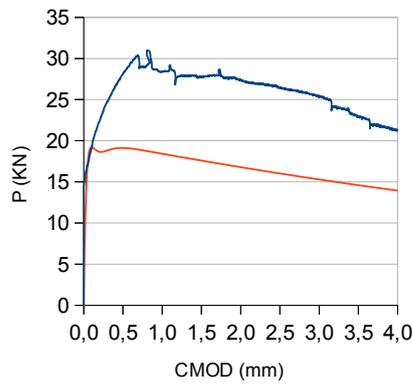
Observaciones:



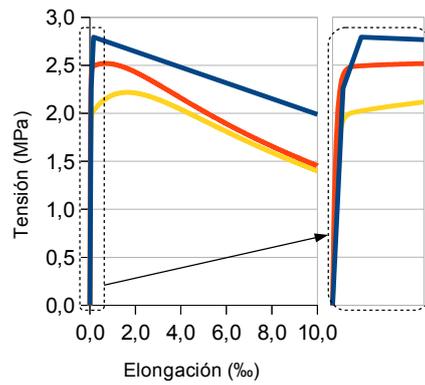
(a) Ubicación de la probeta

(b) Imagen de la probeta

| Probeta n° | | | | | | |
|-----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------------------|-----------------|
| 220 | | | | | | |
| | | Longitud (mm) | Anchura (mm) | Altura (mm) | n° fibras en sección rotura | |
| | | 593 | 144 | 148 | 87 | |
| | | $L_{0/15}$ (H) | $L_{15/30}$ (H) | $L_{30/45}$ (H) | $L_{45/60}$ (H) | |
| | | 0.948 | 1.072 | 1.293 | 1.159 | |
| F_L (KN) | F_1 (KN) | F_2 (KN) | F_3 (KN) | F_4 (KN) | α_{pre} | α_{post} |
| 17.07 | 28.12 | 27.69 | 26.42 | 23.00 | 1.001 | 100 |
| $f_{ct, f1}$ (MPa) | $f_{R,1}$ (MPa) | $f_{R,2}$ (MPa) | $f_{R,3}$ (MPa) | $f_{R,4}$ (MPa) | α_{pre} | α_{post} |
| 5.65 | 9.31 | 9.17 | 8.75 | 7.61 | 100 | 10 |

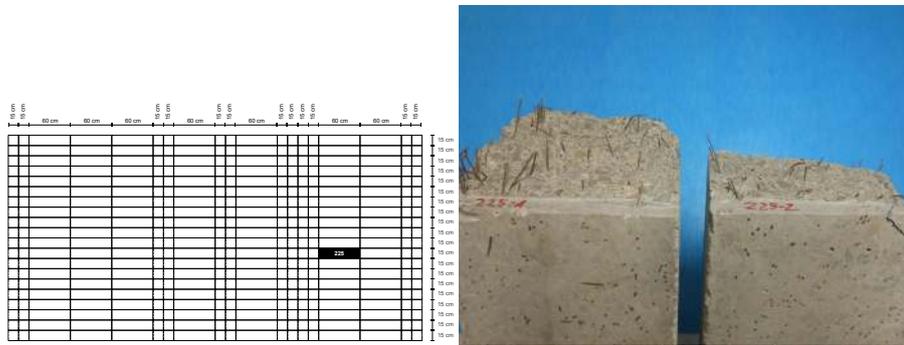


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

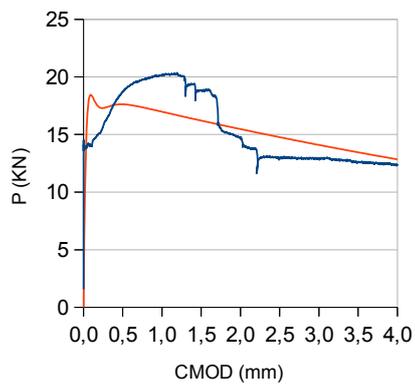
Observaciones:



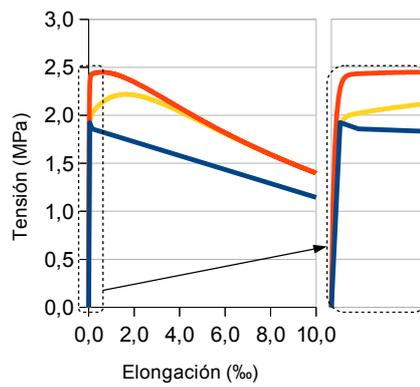
(a) Ubicación de la probeta

(b) Imagen de la probeta

| Probeta n° | | Longitud (mm) | Anchura (mm) | Altura (mm) | n° fibras en sección rotura | |
|--------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------------------|-----------------|
| 225 | | 594 | 141 | 152 | 53 | |
| | | $L_{0/15}$ (H) | $L_{15/30}$ (H) | $L_{30/45}$ (H) | $L_{45/60}$ (H) | |
| | | 0.895 | 1.070 | 1.073 | 1.037 | |
| F_L (KN) | F_1 (KN) | F_2 (KN) | F_3 (KN) | F_4 (KN) | α_{pre} | α_{post} |
| 14.52 | 18.71 | 18.81 | 12.93 | 12.63 | 1.001 | 100 |
| $f_{ct, fl}$ (MPa) | $f_{R,1}$ (MPa) | $f_{R,2}$ (MPa) | $f_{R,3}$ (MPa) | $f_{R,4}$ (MPa) | α_{pre} | α_{post} |
| 4.81 | 6.19 | 6.23 | 4.28 | 4.18 | 100 | 10 |

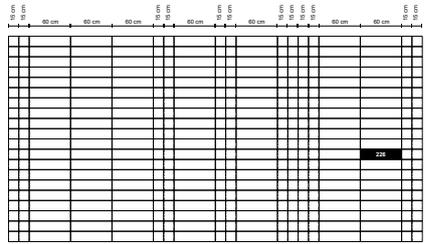


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

Observaciones:

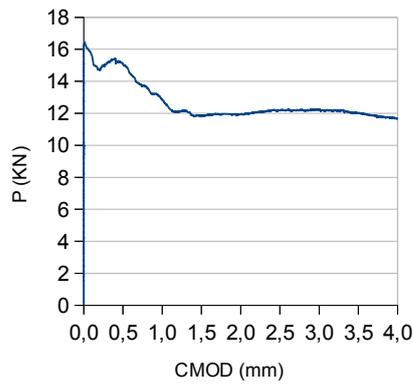


(a) Ubicación de la probeta

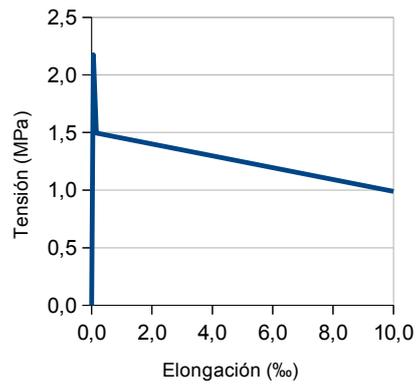


(b) Imagen de la probeta

| Probeta n° | | | | | | |
|--------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------------------|-----------------|
| 226 | | | | | | |
| | | Longitud (mm) | Anchura (mm) | Altura (mm) | n° fibras en sección rotura | |
| | | | 141 | | 42 | |
| | | $L_{0/15}$ (H) | $L_{15/30}$ (H) | $L_{30/45}$ (H) | $L_{45/60}$ (H) | |
| | | N/A | N/A | N/A | N/A | |
| F_L (KN) | F_1 (KN) | F_2 (KN) | F_3 (KN) | F_4 (KN) | α_{pre} | α_{post} |
| 16.42 | 15.06 | 11.85 | 12.18 | 12.02 | N/A | N/A |
| $f_{ct, f1}$ (MPa) | $f_{R,1}$ (MPa) | $f_{R,2}$ (MPa) | $f_{R,3}$ (MPa) | $f_{R,4}$ (MPa) | α_{pre} | α_{post} |
| 5.44 | 4.99 | 3.92 | 4.03 | 3.98 | N/A | N/A |



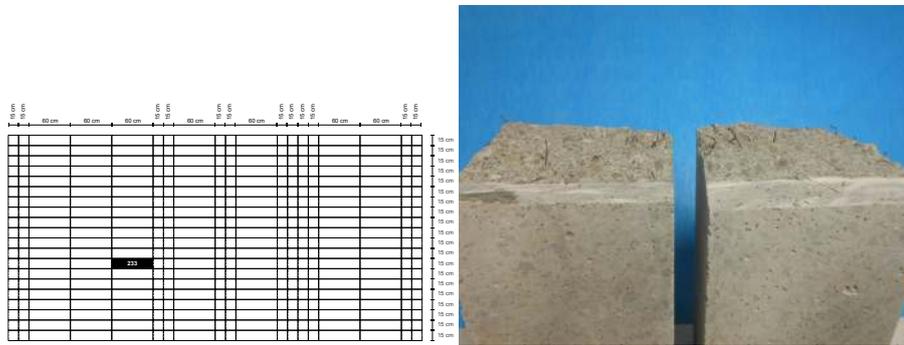
(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

Observaciones:

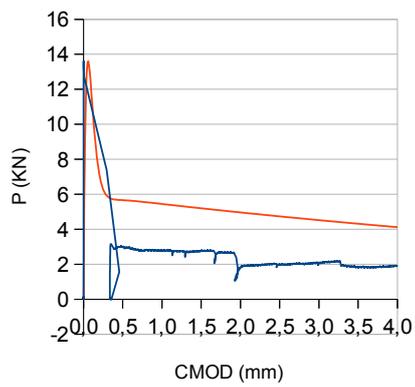
La probeta se entallo por error en una de las caras laterales.



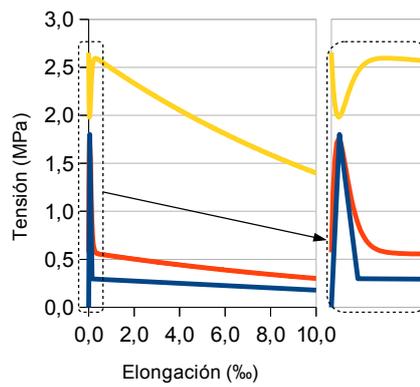
(a) Ubicación de la probeta

(b) Imagen de la probeta

| Probeta n° | | Longitud (mm) | Anchura (mm) | Altura (mm) | n° fibras en sección rotura | |
|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------------------|-----------------|
| 233 | | $L_{0/15}$ (H) | $L_{15/30}$ (H) | $L_{30/45}$ (H) | N/A | |
| | | 0.810 | 0.327 | 0.536 | 0.459 | |
| F_L (KN) | F_1 (KN) | F_2 (KN) | F_3 (KN) | F_4 (KN) | α_{pre} | α_{post} |
| 13.60 | 2.98 | 2.78 | 1.99 | 1.82 | 1.001 | 100 |
| $f_{ct,fl}$ (MPa) | $f_{R,1}$ (MPa) | $f_{R,2}$ (MPa) | $f_{R,3}$ (MPa) | $f_{R,4}$ (MPa) | α_{pre} | α_{post} |
| 4.50 | 0.99 | 0.92 | 0.66 | 0.60 | 1.001 | 10 |

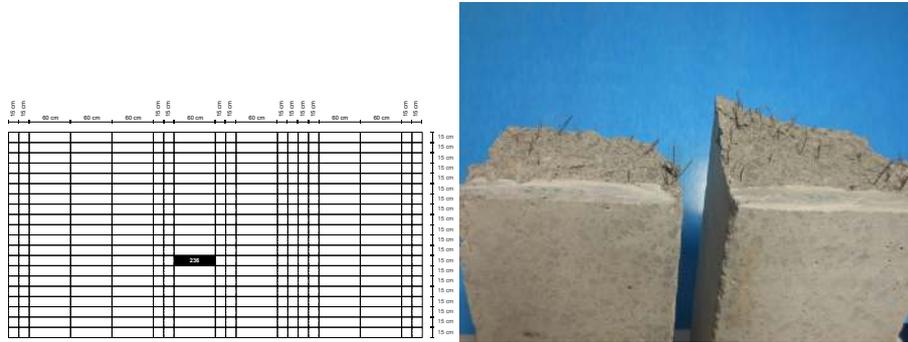


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

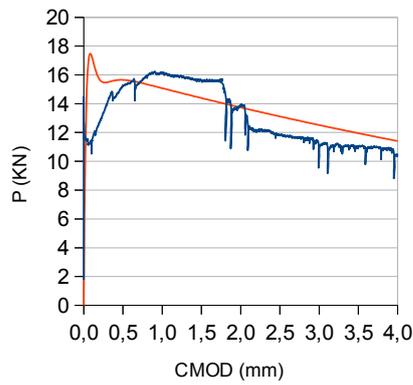
Observaciones:



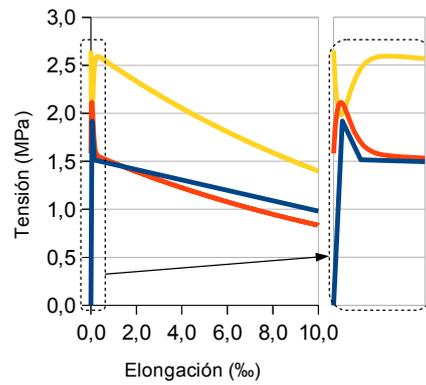
(a) Ubicación de la probeta

(b) Imagen de la probeta

| Probeta n° | | | | | | |
|--------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------------------|-----------------|
| 236 | | | | | | |
| | | Longitud (mm) | Anchura (mm) | Altura (mm) | n° fibras en sección rotura | |
| | | $L_{0/15}$ (H) | $L_{15/30}$ (H) | $L_{30/45}$ (H) | $L_{45/60}$ (H) | |
| | | 1.007 | 0.952 | 0.847 | 56 | |
| F_L (KN) | F_1 (KN) | F_2 (KN) | F_3 (KN) | F_4 (KN) | α_{pre} | α_{post} |
| 14.49 | 15.24 | 15.62 | 11.83 | 11.05 | 1.001 | 100 |
| $f_{ct, f1}$ (MPa) | $f_{R,1}$ (MPa) | $f_{R,2}$ (MPa) | $f_{R,3}$ (MPa) | $f_{R,4}$ (MPa) | α_{pre} | α_{post} |
| 4.80 | 5.04 | 5.17 | 3.92 | 3.66 | 1.001 | 10 |

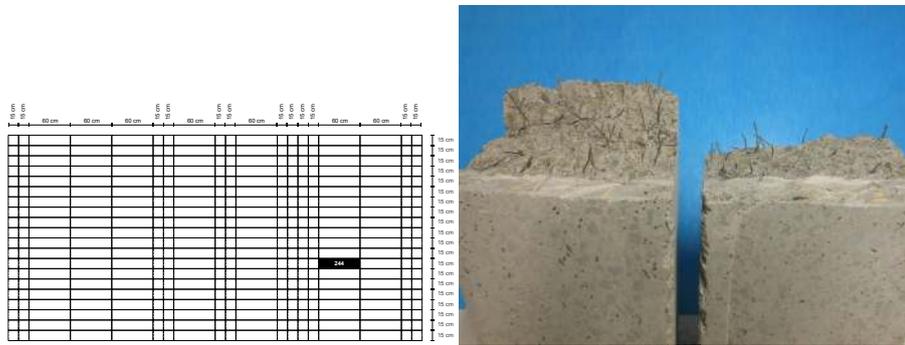


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

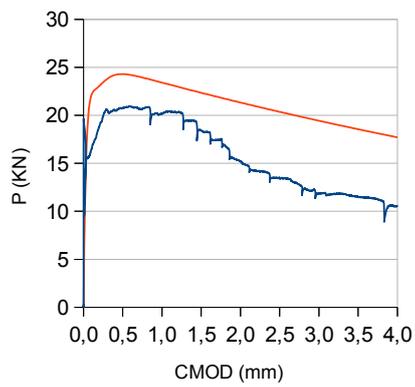
Observaciones:



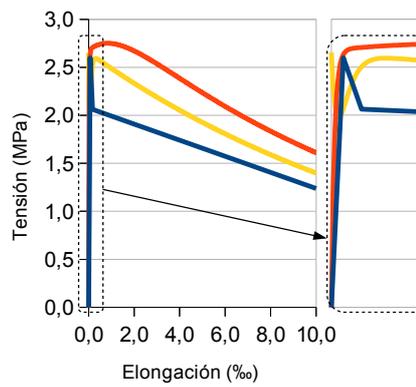
(a) Ubicación de la probeta

(b) Imagen de la probeta

| Probeta n° | | Longitud (mm) | Anchura (mm) | Altura (mm) | n° fibras en sección rotura | |
|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------------------|-----------------|
| 244 | | $L_{0/15}$ (H) | $L_{15/30}$ (H) | $L_{30/45}$ (H) | $L_{45/60}$ (H) | |
| | | 1.425 | 1.664 | 1.205 | 0.876 | |
| F_L (KN) | F_1 (KN) | F_2 (KN) | F_3 (KN) | F_4 (KN) | α_{pre} | α_{post} |
| 19.62 | 20.76 | 18.43 | 13.46 | 11.48 | 1.001 | 100 |
| $f_{ct,fl}$ (MPa) | $f_{R,1}$ (MPa) | $f_{R,2}$ (MPa) | $f_{R,3}$ (MPa) | $f_{R,4}$ (MPa) | α_{pre} | α_{post} |
| 6.49 | 6.87 | 6.10 | 4.46 | 3.80 | 100 | 10 |

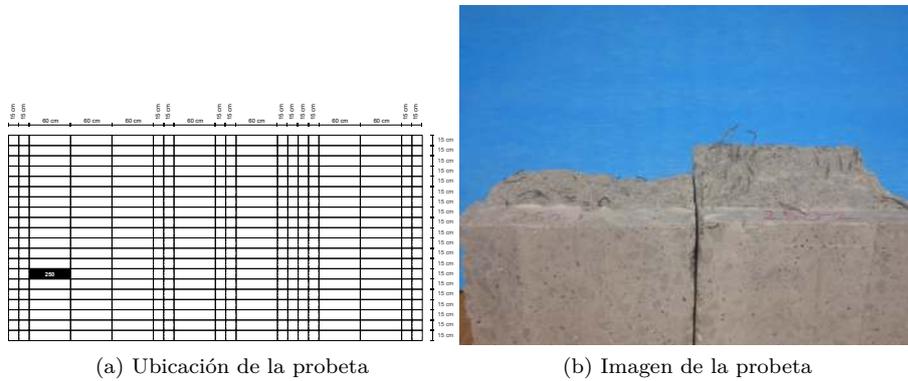


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

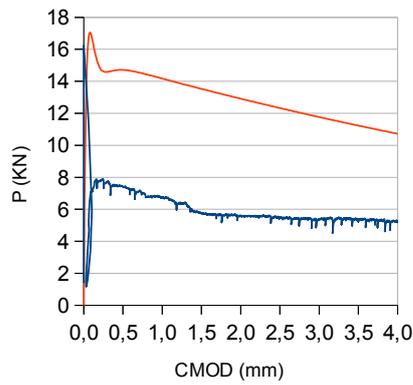
Observaciones:



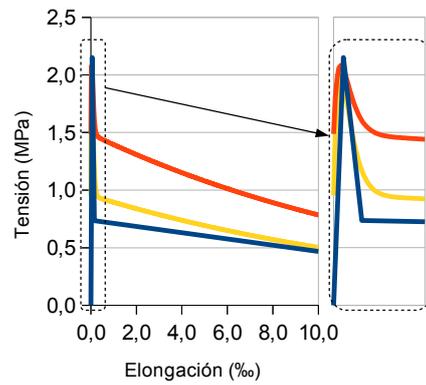
(a) Ubicación de la probeta

(b) Imagen de la probeta

| Probeta n° | | | | | | |
|-----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------------------|-----------------|
| 250 | | | | | | |
| | | Longitud (mm) | Anchura (mm) | Altura (mm) | n° fibras en sección rotura | |
| | | 596 | 149 | 145 | 39 | |
| | | $L_{0/15}$ (H) | $L_{15/30}$ (H) | $L_{30/45}$ (H) | $L_{45/60}$ (H) | |
| | | 0.699 | 0.840 | 0.950 | 1.110 | |
| F_L (KN) | F_1 (KN) | F_2 (KN) | F_3 (KN) | F_4 (KN) | α_{pre} | α_{post} |
| 16.24 | 7.40 | 5.76 | 5.48 | 5.30 | 1.001 | 100 |
| $f_{ct, f1}$ (MPa) | $f_{R,1}$ (MPa) | $f_{R,2}$ (MPa) | $f_{R,3}$ (MPa) | $f_{R,4}$ (MPa) | α_{pre} | α_{post} |
| 5.38 | 2.45 | 1.91 | 1.81 | 1.75 | 1.001 | 10 |

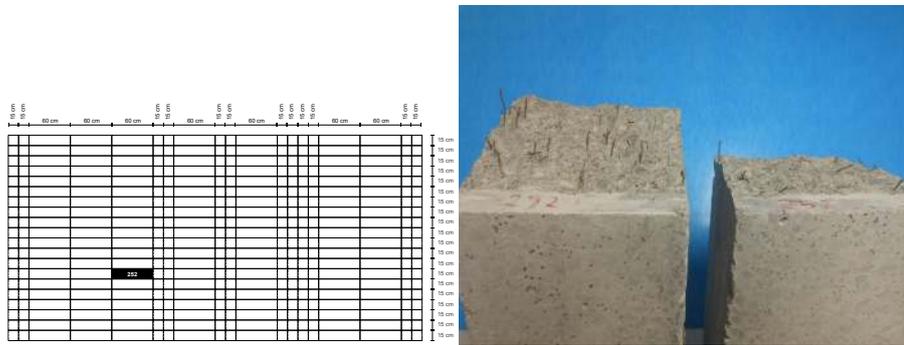


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

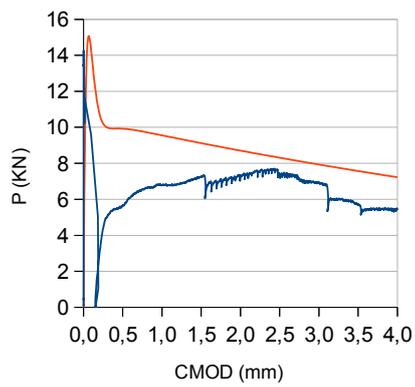
Observaciones:



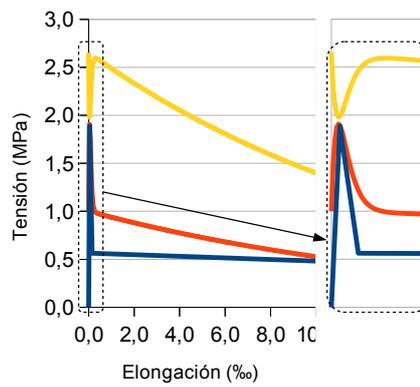
(a) Ubicación de la probeta

(b) Imagen de la probeta

| Probeta n° | | Longitud (mm) | Anchura (mm) | Altura (mm) | n° fibras en sección rotura | |
|-----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------------------|-----------------|
| 252 | | 598 | 150 | 148 | N/A | |
| | | $L_{0/15}$ (H) | $L_{15/30}$ (H) | $L_{30/45}$ (H) | $L_{45/60}$ (H) | |
| | | 0.397 | 0.442 | 0.763 | 0.702 | |
| F_L (KN) | F_1 (KN) | F_2 (KN) | F_3 (KN) | F_4 (KN) | α_{pre} | α_{post} |
| 14.26 | 5.67 | 7.25 | 7.43 | 5.72 | 1.001 | 100 |
| $f_{ct, fl}$ (MPa) | $f_{R,1}$ (MPa) | $f_{R,2}$ (MPa) | $f_{R,3}$ (MPa) | $f_{R,4}$ (MPa) | α_{pre} | α_{post} |
| 4.72 | 1.88 | 2.40 | 2.46 | 1.89 | 1.001 | 10 |

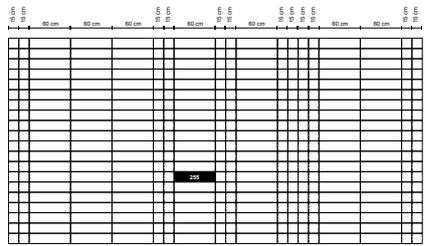


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

Observaciones:

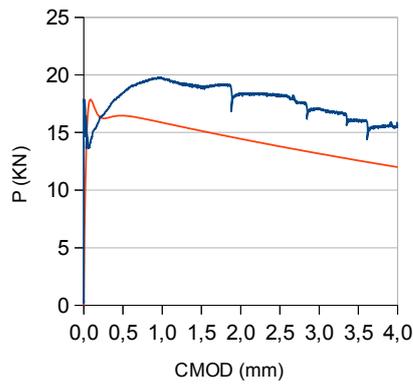


(a) Ubicación de la probeta

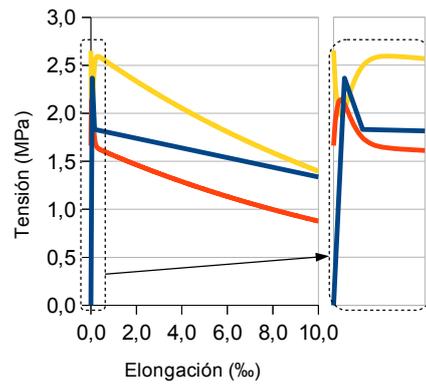


(b) Imagen de la probeta

| Probeta n° | | | | | | |
|-----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------------------|-----------------|
| 255 | | | | | | |
| | | Longitud (mm) | Anchura (mm) | Altura (mm) | n° fibras en sección rotura | |
| | | 592 | 150 | 150 | 58 | |
| | | $L_{0/15}$ (H) | $L_{15/30}$ (H) | $L_{30/45}$ (H) | $L_{45/60}$ (H) | |
| | | 0.740 | 0.994 | 1.007 | 0.986 | |
| F_L (KN) | F_1 (KN) | F_2 (KN) | F_3 (KN) | F_4 (KN) | α_{pre} | α_{post} |
| 17.87 | 18.44 | 19.00 | 18.20 | 16.06 | 1.001 | 100 |
| $f_{ct, f1}$ (MPa) | $f_{R,1}$ (MPa) | $f_{R,2}$ (MPa) | $f_{R,3}$ (MPa) | $f_{R,4}$ (MPa) | α_{pre} | α_{post} |
| 5.92 | 6.10 | 6.29 | 6.02 | 5.32 | 1.001 | 10 |

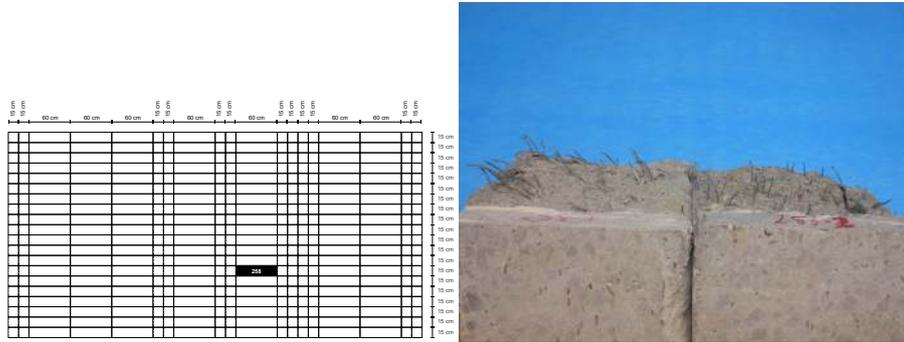


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

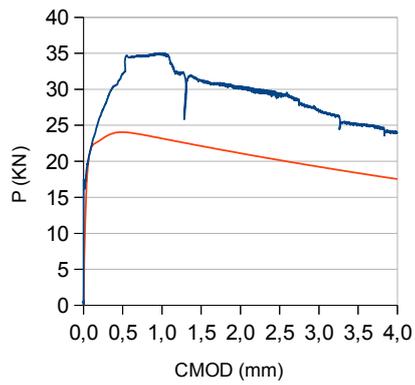
Observaciones:



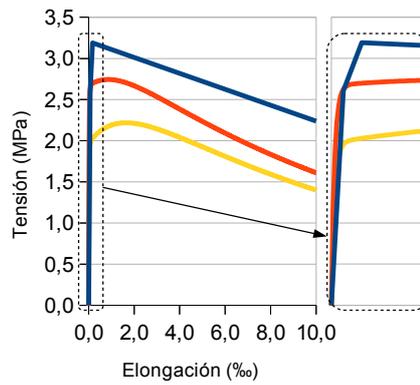
(a) Ubicación de la probeta

(b) Imagen de la probeta

| Probeta n° | | Longitud (mm) | Anchura (mm) | Altura (mm) | n° fibras en sección rotura | |
|-----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------------------|-----------------|
| 258 | | 596 | 150 | 149 | 106 | |
| | | $L_{0/15}$ (H) | $L_{15/30}$ (H) | $L_{30/45}$ (H) | $L_{45/60}$ (H) | |
| | | 1.157 | 1.401 | 1.525 | 1.405 | |
| F_L (KN) | F_1 (KN) | F_2 (KN) | F_3 (KN) | F_4 (KN) | α_{pre} | α_{post} |
| 19.68 | 32.12 | 31.26 | 29.26 | 25.15 | 1.001 | 100 |
| $f_{ct, fl}$ (MPa) | $f_{R,1}$ (MPa) | $f_{R,2}$ (MPa) | $f_{R,3}$ (MPa) | $f_{R,4}$ (MPa) | α_{pre} | α_{post} |
| 6.51 | 10.63 | 10.35 | 9.69 | 8.33 | 100 | 10 |

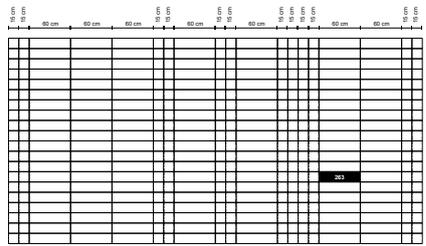


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

Observaciones:

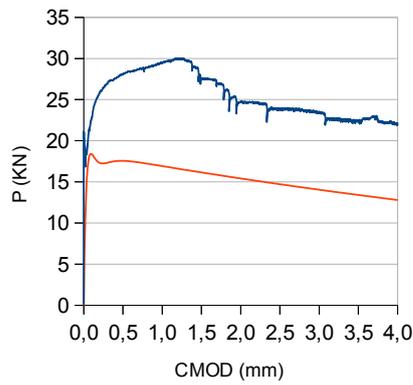


(a) Ubicación de la probeta

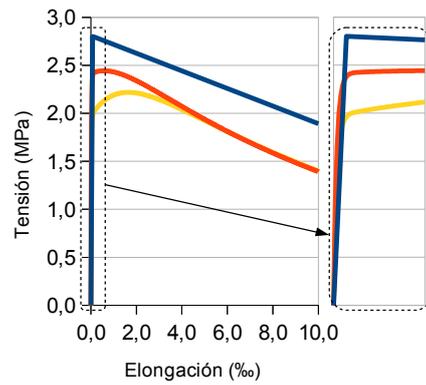


(b) Imagen de la probeta

| Probeta n° | | | | | | |
|-----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------------------|-----------------|
| 263 | | | | | | |
| | | Longitud (mm) | Anchura (mm) | Altura (mm) | n° fibras en sección rotura | |
| | | 595 | 151 | 146 | 90 | |
| | | $L_{0/15}$ (H) | $L_{15/30}$ (H) | $L_{30/45}$ (H) | $L_{45/60}$ (H) | |
| | | 1.202 | 1.058 | 1.078 | 0.981 | |
| F_L (KN) | F_1 (KN) | F_2 (KN) | F_3 (KN) | F_4 (KN) | α_{pre} | α_{post} |
| 21.15 | 28.12 | 27.48 | 23.86 | 22.37 | 1.001 | 100 |
| $f_{ct, f1}$ (MPa) | $f_{R,1}$ (MPa) | $f_{R,2}$ (MPa) | $f_{R,3}$ (MPa) | $f_{R,4}$ (MPa) | α_{pre} | α_{post} |
| 7.00 | 9.31 | 9.10 | 7.90 | 7.41 | 100 | 10 |

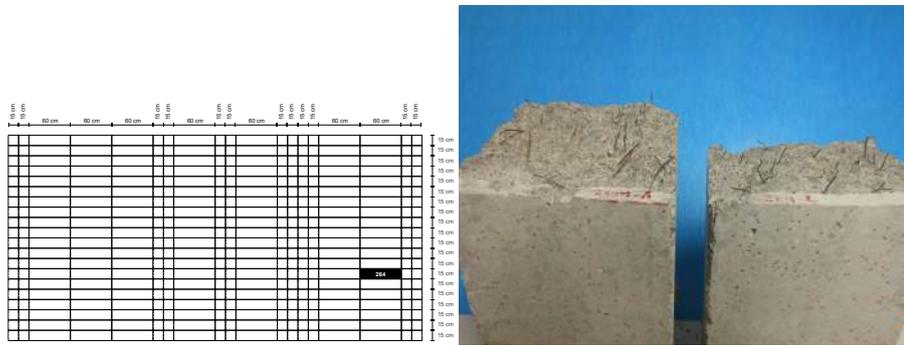


(a) P-CMOD

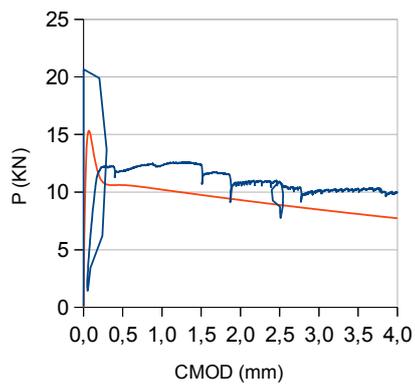


(b) $\sigma - \epsilon$

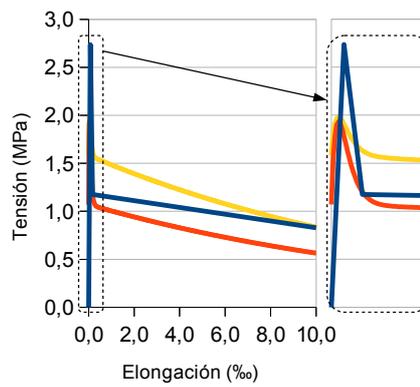
Observaciones:



| Probeta n° | | | | | | |
|----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------------------|-----------------|
| 264 | | | | | | |
| | | Longitud (mm) | Anchura (mm) | Altura (mm) | n° fibras en sección rotura | |
| | | 597 | 150 | 141 | N/A | |
| | | $L_{0/15}$ (H) | $L_{15/30}$ (H) | $L_{30/45}$ (H) | $L_{45/60}$ (H) | |
| | | 0.587 | 0.615 | 0.675 | 0.574 | |
| F_L (KN) | F_1 (KN) | F_2 (KN) | F_3 (KN) | F_4 (KN) | α_{pre} | α_{post} |
| 20.66 | 11.83 | 12.37 | 10.93 | 10.28 | 1.001 | 100 |
| $f_{ct,fl}$ (MPa) | $f_{R,1}$ (MPa) | $f_{R,2}$ (MPa) | $f_{R,3}$ (MPa) | $f_{R,4}$ (MPa) | α_{pre} | α_{post} |
| 6.84 | 3.92 | 4.09 | 3.62 | 3.40 | 1.001 | 10 |

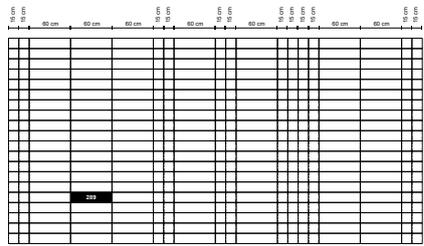


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

Observaciones:

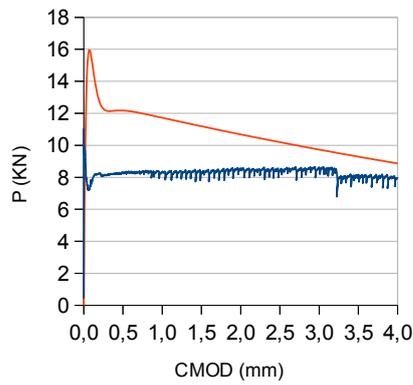


(a) Ubicación de la probeta

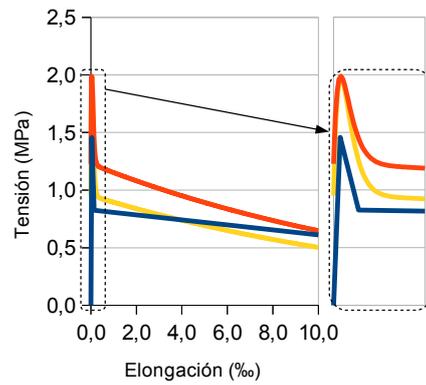


(b) Imagen de la probeta

| Probeta n° | | | | | | |
|-----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------------------|-----------------|
| 289 | | | | | | |
| | | Longitud (mm) | Anchura (mm) | Altura (mm) | n° fibras en sección rotura | |
| | | 596 | 146 | 140 | 39 | |
| | | $L_{0/15}$ (H) | $L_{15/30}$ (H) | $L_{30/45}$ (H) | $L_{45/60}$ (H) | |
| | | 1.201 | 0.646 | 0.834 | 1.049 | |
| F_L (KN) | F_1 (KN) | F_2 (KN) | F_3 (KN) | F_4 (KN) | α_{pre} | α_{post} |
| 11.00 | 8.31 | 8.27 | 8.41 | 8.15 | 1.001 | 100 |
| $f_{ct, f1}$ (MPa) | $f_{R,1}$ (MPa) | $f_{R,2}$ (MPa) | $f_{R,3}$ (MPa) | $f_{R,4}$ (MPa) | α_{pre} | α_{post} |
| 3.64 | 2.75 | 2.74 | 2.78 | 2.70 | 1.001 | 10 |

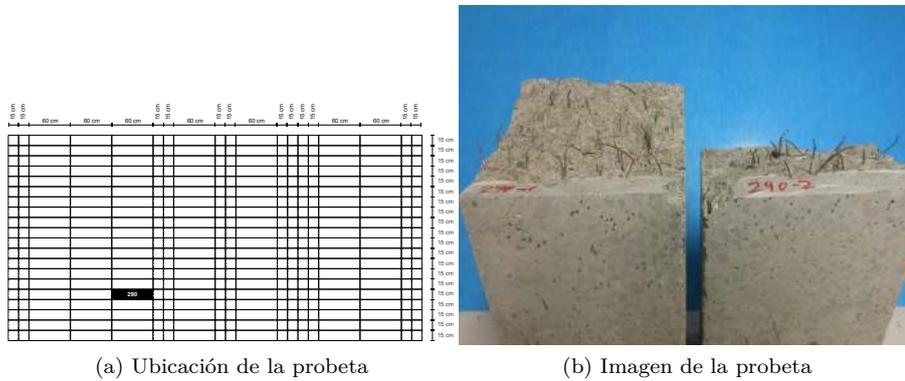


(a) P-CMOD

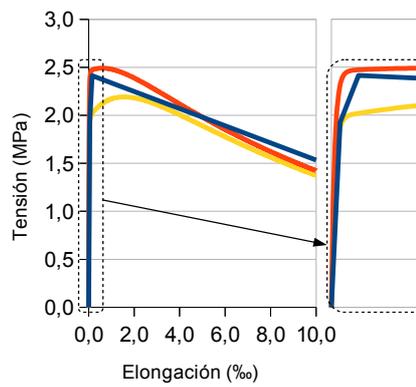
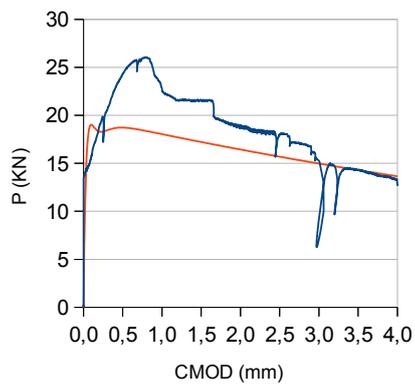


(b) $\sigma - \epsilon$

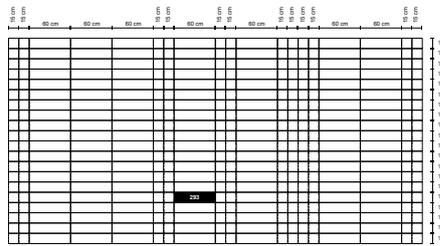
Observaciones:



| Probeta n° | | Longitud (mm) | Anchura (mm) | Altura (mm) | n° fibras en sección rotura | |
|--------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------------------|-----------------|
| 290 | | 598 | 142 | 142 | 71 | |
| | | $L_{0/15}$ (H) | $L_{15/30}$ (H) | $L_{30/45}$ (H) | $L_{45/60}$ (H) | |
| | | 1.288 | 1.406 | 0.872 | 0.630 | |
| F_L (KN) | F_1 (KN) | F_2 (KN) | F_3 (KN) | F_4 (KN) | α_{pre} | α_{post} |
| 14.55 | 24.31 | 21.55 | 17.99 | 14.33 | 1.001 | 100 |
| $f_{ct, fl}$ (MPa) | $f_{R,1}$ (MPa) | $f_{R,2}$ (MPa) | $f_{R,3}$ (MPa) | $f_{R,4}$ (MPa) | α_{pre} | α_{post} |
| 4.82 | 8.05 | 7.13 | 5.96 | 4.74 | 100 | 10 |



Observaciones:

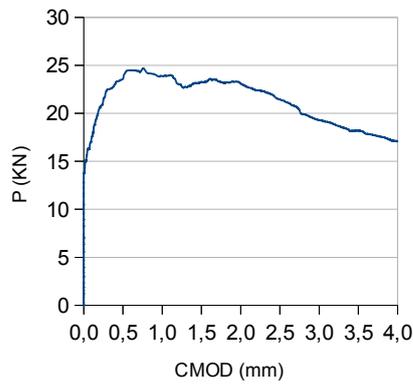


(a) Ubicación de la probeta

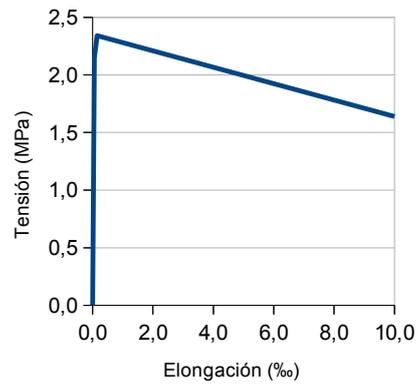


(b) Imagen de la probeta

| Probeta n° | | | | | | |
|-----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------------------|-----------------|
| 293 | | | | | | |
| | | Longitud (mm) | Anchura (mm) | Altura (mm) | n° fibras en sección rotura | |
| | | | 139 | | 86 | |
| | | $L_{0/15}$ (H) | $L_{15/30}$ (H) | $L_{30/45}$ (H) | $L_{45/60}$ (H) | |
| | | N/A | N/A | N/A | N/A | |
| F_L (KN) | F_1 (KN) | F_2 (KN) | F_3 (KN) | F_4 (KN) | α_{pre} | α_{post} |
| 16.23 | 23.56 | 23.27 | 21.43 | 18.22 | N/A | N/A |
| $f_{ct, f1}$ (MPa) | $f_{R,1}$ (MPa) | $f_{R,2}$ (MPa) | $f_{R,3}$ (MPa) | $f_{R,4}$ (MPa) | α_{pre} | α_{post} |
| 5.37 | 7.80 | 7.70 | 7.10 | 6.03 | N/A | N/A |

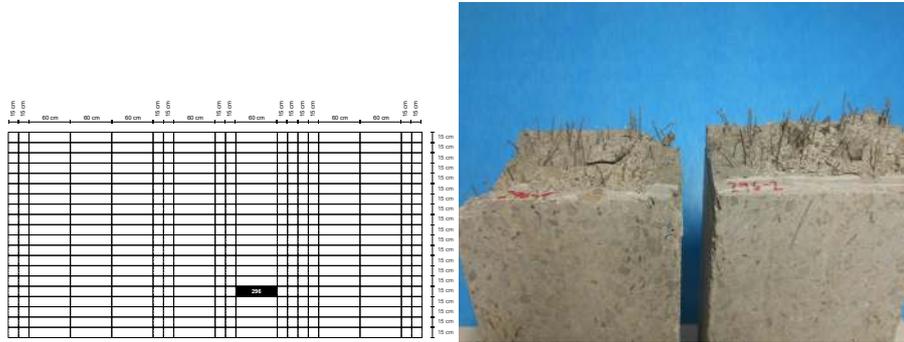


(a) P-CMOD

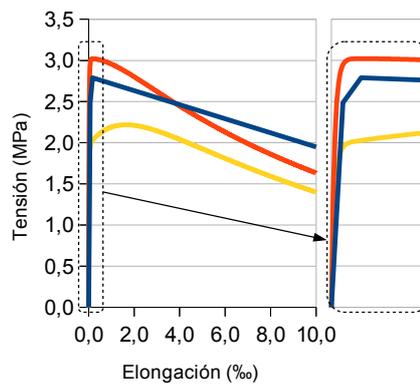
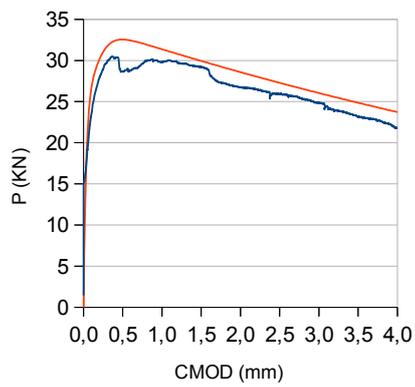


(b) $\sigma - \epsilon$

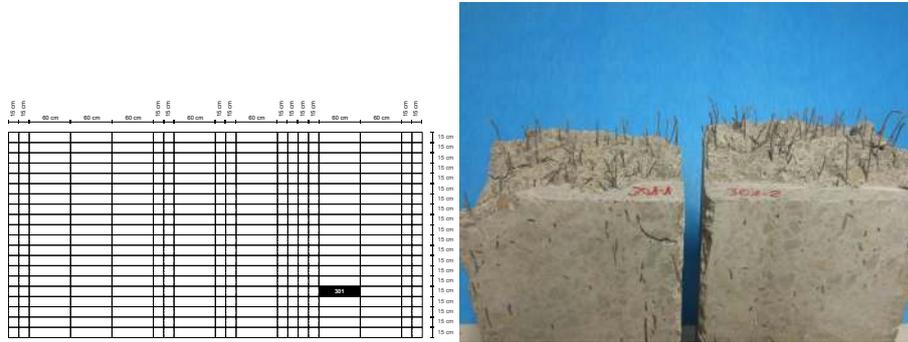
Observaciones:



| Probeta n° | | Longitud (mm) | Anchura (mm) | Altura (mm) | n° fibras en sección rotura | |
|--------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------------------|-----------------|
| 296 | | 597 | 148 | 140 | 127 | |
| | | $L_{0/15}$ (H) | $L_{15/30}$ (H) | $L_{30/45}$ (H) | $L_{45/60}$ (H) | |
| | | 1.736 | 2.046 | 1.913 | 1.726 | |
| F_L (KN) | F_1 (KN) | F_2 (KN) | F_3 (KN) | F_4 (KN) | α_{pre} | α_{post} |
| 19.14 | 28.66 | 29.17 | 25.92 | 23.22 | 1.001 | 100 |
| $f_{ct, fl}$ (MPa) | $f_{R,1}$ (MPa) | $f_{R,2}$ (MPa) | $f_{R,3}$ (MPa) | $f_{R,4}$ (MPa) | α_{pre} | α_{post} |
| 6.21 | 9.30 | 9.46 | 8.41 | 7.53 | 100 | 10 |



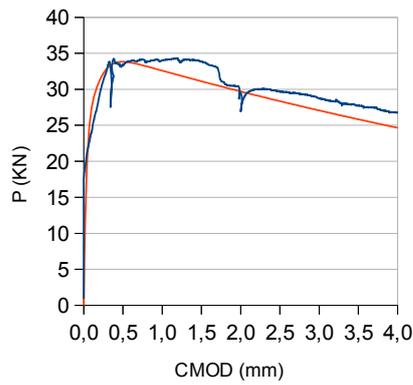
Observaciones:



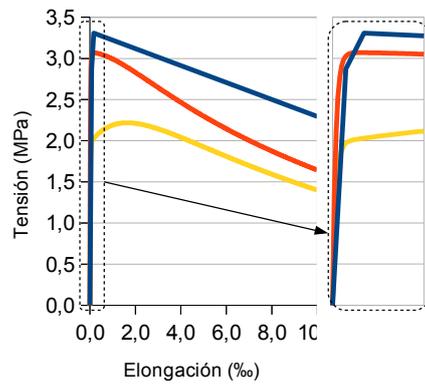
(a) Ubicación de la probeta

(b) Imagen de la probeta

| Probeta n° | | | | | | |
|-----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------------------|-----------------|
| 301 | | | | | | |
| | | Longitud (mm) | Anchura (mm) | Altura (mm) | n° fibras en sección rotura | |
| | | 597 | 150 | 142 | 117 | |
| | | $L_{0/15}$ (H) | $L_{15/30}$ (H) | $L_{30/45}$ (H) | $L_{45/60}$ (H) | |
| | | 2.004 | 2.070 | 2.046 | 1.704 | |
| F_L (KN) | F_1 (KN) | F_2 (KN) | F_3 (KN) | F_4 (KN) | α_{pre} | α_{post} |
| 21.68 | 33.30 | 33.86 | 29.67 | 27.77 | 1.001 | 100 |
| $f_{ct, f1}$ (MPa) | $f_{R,1}$ (MPa) | $f_{R,2}$ (MPa) | $f_{R,3}$ (MPa) | $f_{R,4}$ (MPa) | α_{pre} | α_{post} |
| 7.18 | 11.02 | 11.21 | 9.82 | 9.19 | 100 | 10 |

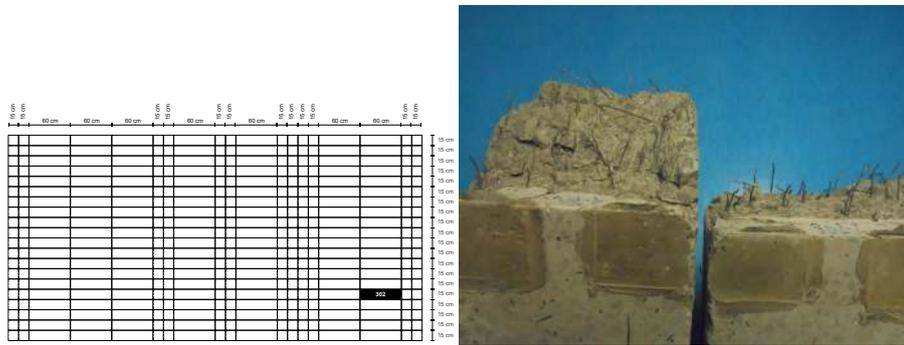


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

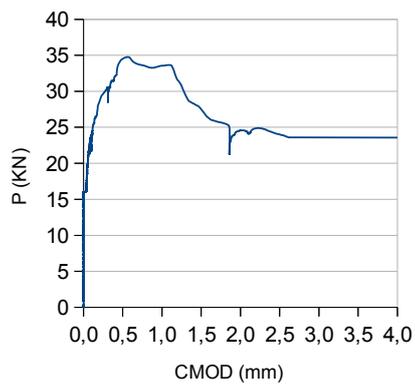
Observaciones:



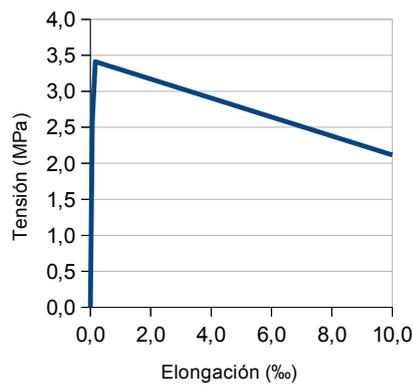
(a) Ubicación de la probeta

(b) Imagen de la probeta

| Probeta n° | | Longitud (mm) | Anchura (mm) | Altura (mm) | n° fibras en sección rotura | |
|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------------------|-----------------|
| 302 | | | 147 | | 95 | |
| | | $L_{0/15}$ (H) | $L_{15/30}$ (H) | $L_{30/45}$ (H) | $L_{45/60}$ (H) | |
| | | N/A | N/A | N/A | N/A | |
| F_L (KN) | F_1 (KN) | F_2 (KN) | F_3 (KN) | F_4 (KN) | α_{pre} | α_{post} |
| 19.50 | 34.36 | 27.69 | 24.02 | 23.61 | N/A | N/A |
| $f_{ct,fl}$ (MPa) | $f_{R,1}$ (MPa) | $f_{R,2}$ (MPa) | $f_{R,3}$ (MPa) | $f_{R,4}$ (MPa) | α_{pre} | α_{post} |
| 6.46 | 11.38 | 9.17 | 7.95 | 7.81 | N/A | N/A |

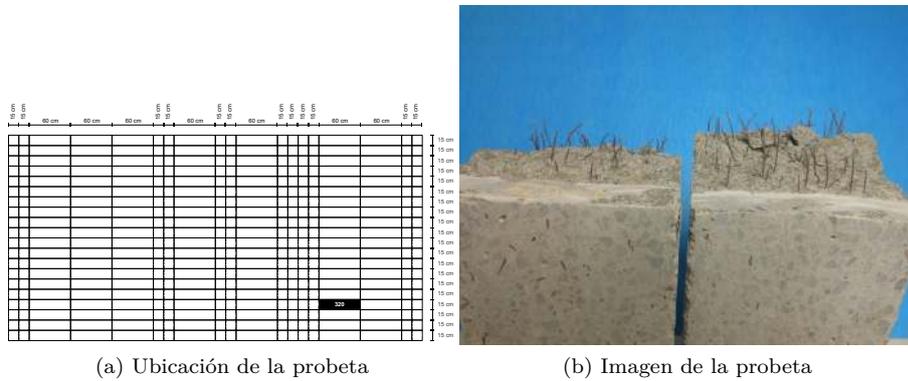


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

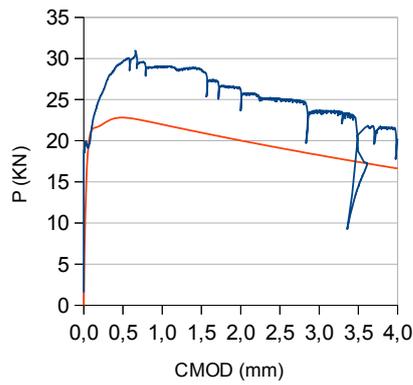
Observaciones:



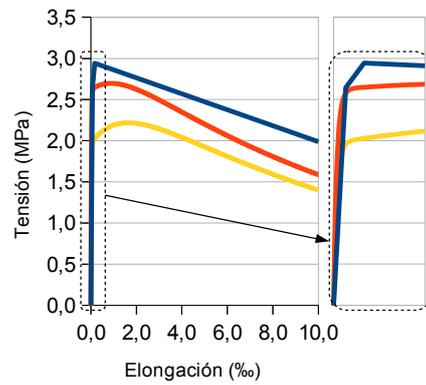
(a) Ubicación de la probeta

(b) Imagen de la probeta

| Probeta n° | | | | | | |
|-----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------------------|-----------------|
| 320 | | | | | | |
| | | Longitud (mm) | Anchura (mm) | Altura (mm) | n° fibras en sección rotura | |
| | | $L_{0/15}$ (H) | $L_{15/30}$ (H) | $L_{30/45}$ (H) | $L_{45/60}$ (H) | |
| | | 1.123 | 1.278 | 1.421 | 1.421 | |
| F_L (KN) | F_1 (KN) | F_2 (KN) | F_3 (KN) | F_4 (KN) | α_{pre} | α_{post} |
| 19.96 | 29.62 | 28.65 | 24.99 | 14.44 | 1.001 | 100 |
| $f_{ct, f1}$ (MPa) | $f_{R,1}$ (MPa) | $f_{R,2}$ (MPa) | $f_{R,3}$ (MPa) | $f_{R,4}$ (MPa) | α_{pre} | α_{post} |
| 6.61 | 9.81 | 9.48 | 8.27 | 4.78 | 100 | 10 |

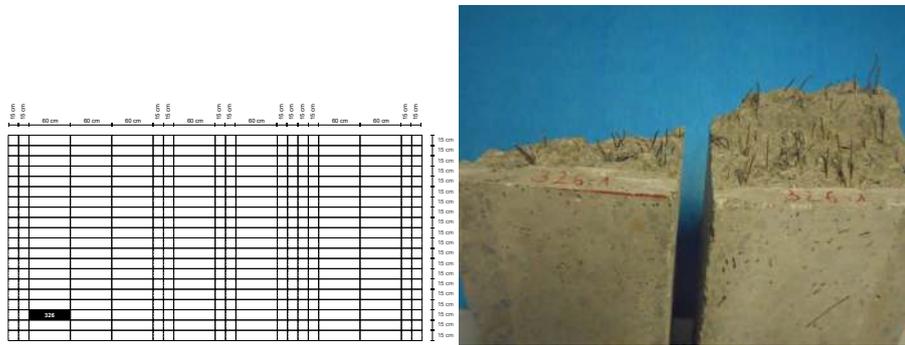


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

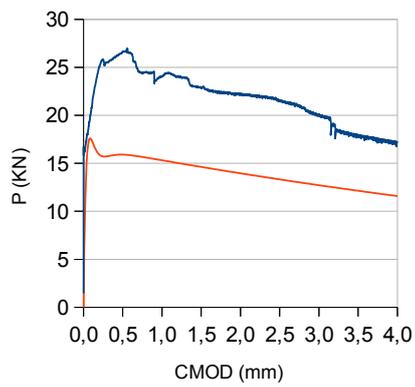
Observaciones:



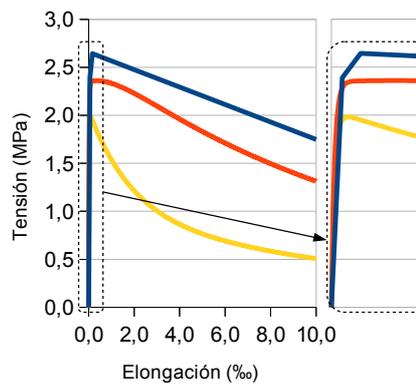
(a) Ubicación de la probeta

(b) Imagen de la probeta

| Probeta n° | | Longitud (mm) | Anchura (mm) | Altura (mm) | n° fibras en sección rotura | |
|--------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------------------|-----------------|
| 326 | | 595 | 147 | 145 | 76 | |
| | | $L_{0/15}$ (H) | $L_{15/30}$ (H) | $L_{30/45}$ (H) | $L_{45/60}$ (H) | |
| | | 0.693 | 0.993 | 0.940 | 0.923 | |
| F_L (KN) | F_1 (KN) | F_2 (KN) | F_3 (KN) | F_4 (KN) | α_{pre} | α_{post} |
| 18.05 | 26.62 | 22.95 | 21.50 | 17.96 | 1.001 | 100 |
| $f_{ct, fl}$ (MPa) | $f_{R,1}$ (MPa) | $f_{R,2}$ (MPa) | $f_{R,3}$ (MPa) | $f_{R,4}$ (MPa) | α_{pre} | α_{post} |
| 5.98 | 8.81 | 7.60 | 7.12 | 5.95 | 100 | 10 |

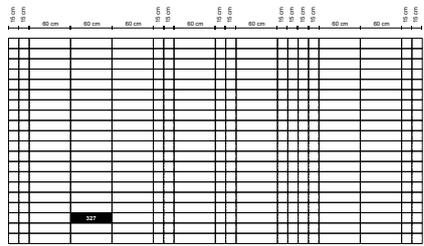


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

Observaciones:

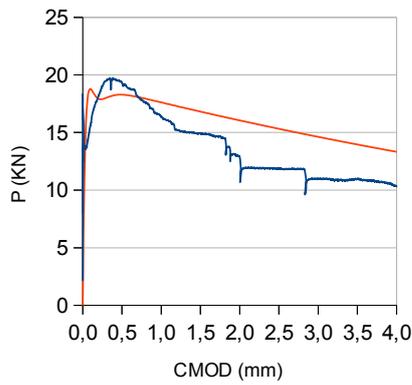


(a) Ubicación de la probeta

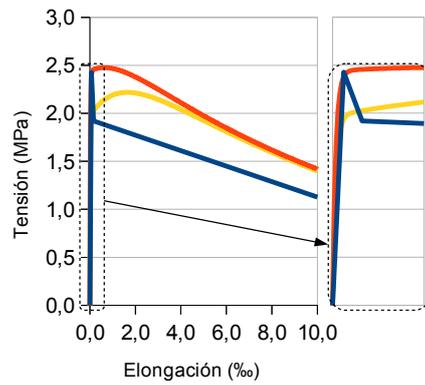


(b) Imagen de la probeta

| Probeta n° | | | | | | |
|-----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------------------|-----------------|
| 327 | | | | | | |
| | | Longitud (mm) | Anchura (mm) | Altura (mm) | n° fibras en sección rotura | |
| | | 596 | 147 | 144 | 65 | |
| | | $L_{0/15}$ (H) | $L_{15/30}$ (H) | $L_{30/45}$ (H) | $L_{45/60}$ (H) | |
| | | 0.802 | 1.142 | 1.081 | 0.886 | |
| F_L (KN) | F_1 (KN) | F_2 (KN) | F_3 (KN) | F_4 (KN) | α_{pre} | α_{post} |
| 18.33 | 19.33 | 14.90 | 11.86 | 10.97 | 1.001 | 100 |
| $f_{ct, f1}$ (MPa) | $f_{R,1}$ (MPa) | $f_{R,2}$ (MPa) | $f_{R,3}$ (MPa) | $f_{R,4}$ (MPa) | α_{pre} | α_{post} |
| 6.07 | 6.40 | 4.93 | 3.93 | 3.63 | 100 | 10 |



(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

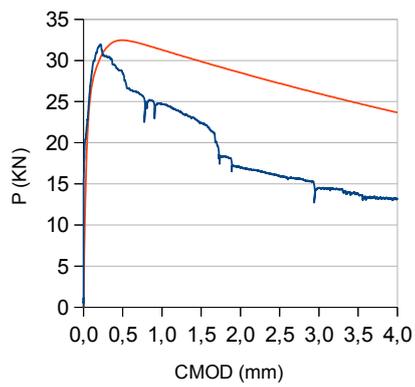
Observaciones:



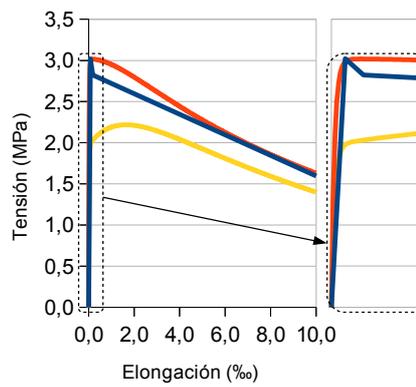
(a) Ubicación de la probeta

(b) Imagen de la probeta

| Probeta n° | | Longitud (mm) | Anchura (mm) | Altura (mm) | n° fibras en sección rotura | |
|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------------------|-----------------|
| 328 | | 598 | 142 | 145 | N/A | |
| | | $L_{0/15}$ (H) | $L_{15/30}$ (H) | $L_{30/45}$ (H) | $L_{45/60}$ (H) | |
| | | 1.068 | 1.737 | 2.213 | 1.969 | |
| F_L (KN) | F_1 (KN) | F_2 (KN) | F_3 (KN) | F_4 (KN) | α_{pre} | α_{post} |
| 22.81 | 28.42 | 22.40 | 15.89 | 13.80 | 1.001 | 100 |
| $f_{ct,fl}$ (MPa) | $f_{R,1}$ (MPa) | $f_{R,2}$ (MPa) | $f_{R,3}$ (MPa) | $f_{R,4}$ (MPa) | α_{pre} | α_{post} |
| 7.55 | 9.41 | 7.42 | 5.26 | 4.57 | 100 | 10 |

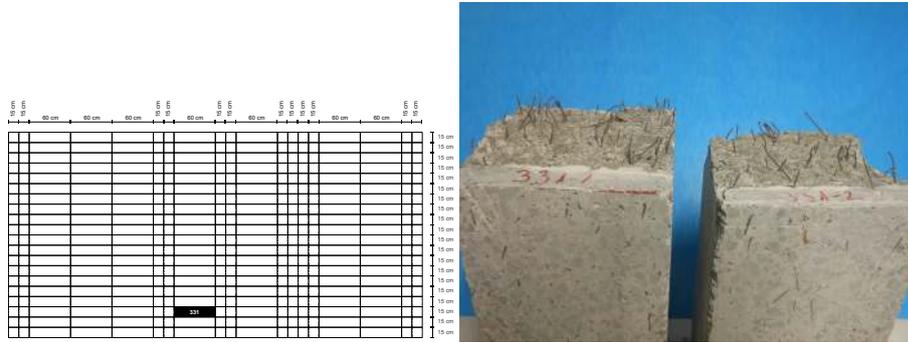


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

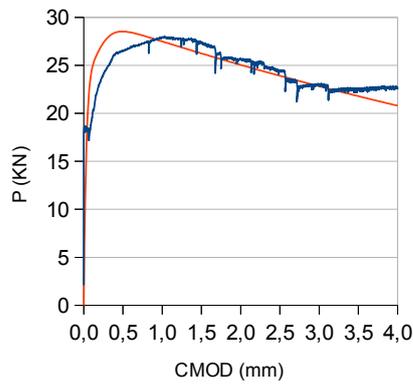
Observaciones:



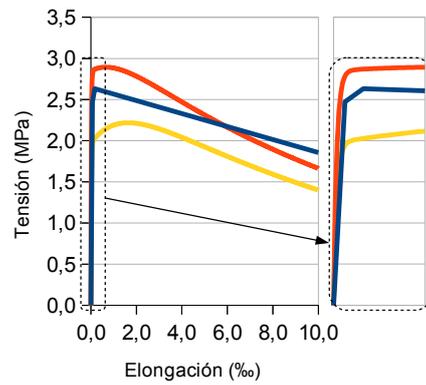
(a) Ubicación de la probeta

(b) Imagen de la probeta

| Probeta n° | | | | | | |
|-----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------------------|-----------------|
| 331 | | | | | | |
| | | Longitud (mm) | Anchura (mm) | Altura (mm) | n° fibras en sección rotura | |
| | | 596 | 148 | 148 | 108 | |
| | | $L_{0/15}$ (H) | $L_{15/30}$ (H) | $L_{30/45}$ (H) | $L_{45/60}$ (H) | |
| | | 1.832 | 1.795 | 1.674 | 1.437 | |
| F_L (KN) | F_1 (KN) | F_2 (KN) | F_3 (KN) | F_4 (KN) | α_{pre} | α_{post} |
| 18.66 | 26.50 | 27.43 | 24.45 | 22.61 | 1.001 | 100 |
| $f_{ct, f1}$ (MPa) | $f_{R,1}$ (MPa) | $f_{R,2}$ (MPa) | $f_{R,3}$ (MPa) | $f_{R,4}$ (MPa) | α_{pre} | α_{post} |
| 6.18 | 8.77 | 9.08 | 8.09 | 7.48 | 100 | 10 |

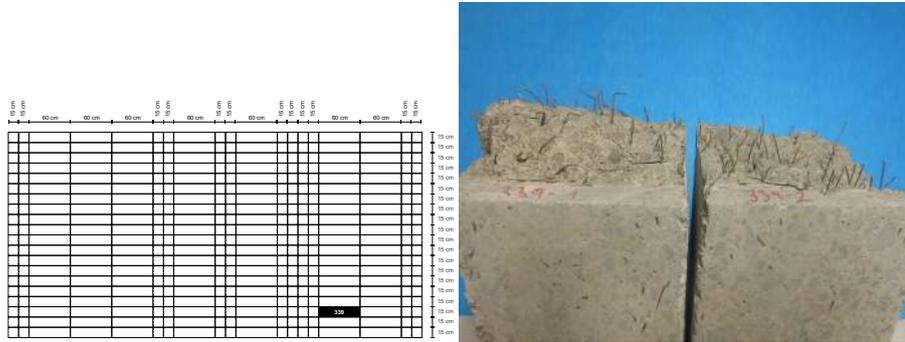


(a) P-CMOD

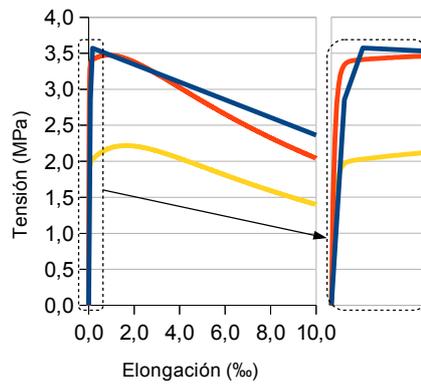
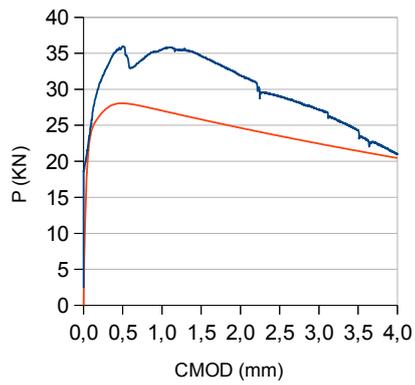


(b) $\sigma - \epsilon$

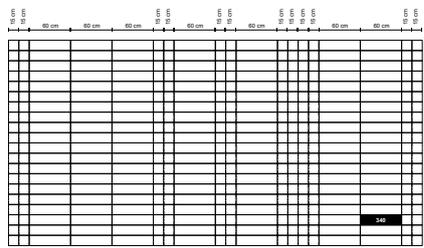
Observaciones:



| Probeta n° | | Longitud (mm) | Anchura (mm) | Altura (mm) | n° fibras en sección rotura | |
|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------------------|-----------------|
| 339 | | 595 | 152 | 150 | 99 | |
| | | $L_{0/15}$ (H) | $L_{15/30}$ (H) | $L_{30/45}$ (H) | $L_{45/60}$ (H) | |
| | | 1.659 | 1.781 | 1.833 | 1.246 | |
| F_L (KN) | F_1 (KN) | F_2 (KN) | F_3 (KN) | F_4 (KN) | α_{pre} | α_{post} |
| 21.56 | 35.96 | 34.64 | 29.03 | 24.33 | 1.001 | 100 |
| $f_{ct,fl}$ (MPa) | $f_{R,1}$ (MPa) | $f_{R,2}$ (MPa) | $f_{R,3}$ (MPa) | $f_{R,4}$ (MPa) | α_{pre} | α_{post} |
| 7.14 | 11.90 | 11.47 | 9.61 | 8.05 | 100 | 10 |



Observaciones:

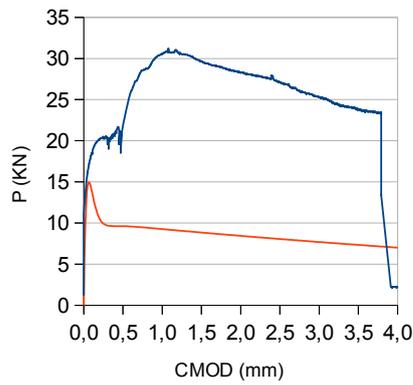


(a) Ubicación de la probeta

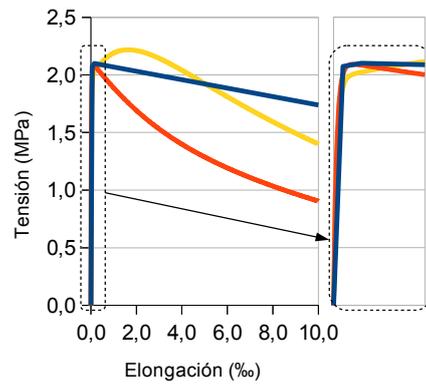


(b) Imagen de la probeta

| Probeta n° | | | | | | |
|--------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|-----------------------------|
| 340 | | | | | | |
| Longitud (mm) | | Anchura (mm) | | Altura (mm) | | n° fibras en sección rotura |
| 588 | | 149 | | 143 | | 34 |
| $L_{0/15}$ (H) | | $L_{15/30}$ (H) | | $L_{30/45}$ (H) | | $L_{45/60}$ (H) |
| 0.964 | | 0.756 | | 0.413 | | 0.133 |
| F_L (KN) | F_1 (KN) | F_2 (KN) | F_3 (KN) | F_4 (KN) | α_{pre} | α_{post} |
| 17.74 | 16.11 | 14.12 | 9.72 | 6.30 | 1.001 | 100 |
| $f_{ct, f1}$ (MPa) | $f_{R,1}$ (MPa) | $f_{R,2}$ (MPa) | $f_{R,3}$ (MPa) | $f_{R,4}$ (MPa) | α_{pre} | α_{post} |
| 5.18 | 7.00 | 9.49 | 8.68 | 7.62 | 100 | 10 |

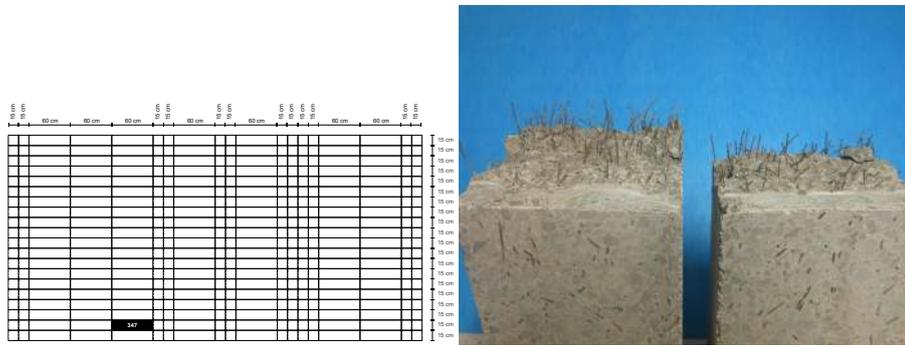


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

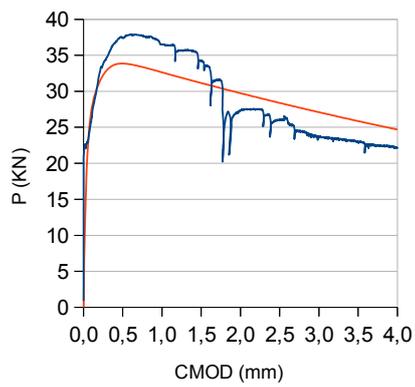
Observaciones:



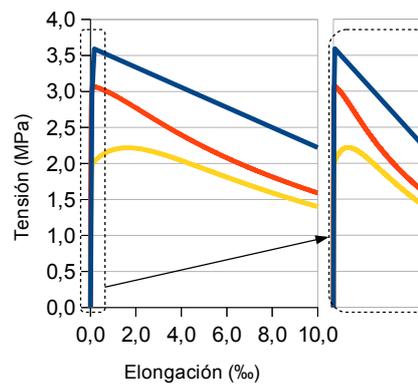
(a) Ubicación de la probeta

(b) Imagen de la probeta

| Probeta n° | | Longitud (mm) | Anchura (mm) | Altura (mm) | n° fibras en sección rotura | |
|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------------------|-----------------|
| 347 | | $L_{0/15}$ (H) | $L_{15/30}$ (H) | $L_{30/45}$ (H) | N/A | |
| | | 2.179 | 2.863 | 2.328 | 1.969 | |
| F_L (KN) | F_1 (KN) | F_2 (KN) | F_3 (KN) | F_4 (KN) | α_{pre} | α_{post} |
| 22.93 | 37.39 | 34.24 | 26.05 | 23.06 | 100 | 10 |
| $f_{ct,fl}$ (MPa) | $f_{R,1}$ (MPa) | $f_{R,2}$ (MPa) | $f_{R,3}$ (MPa) | $f_{R,4}$ (MPa) | α_{pre} | α_{post} |

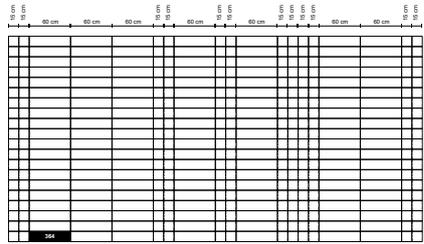


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

Observaciones:

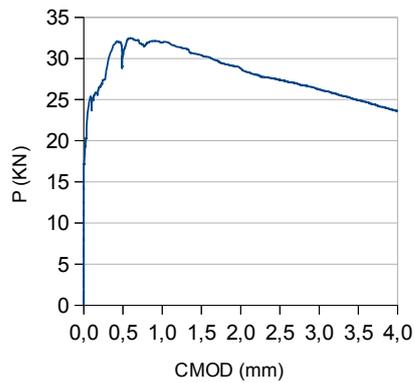


(a) Ubicación de la probeta

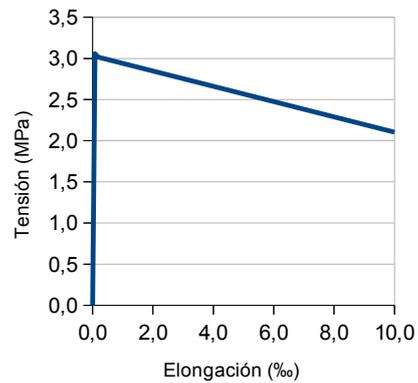


(b) Imagen de la probeta

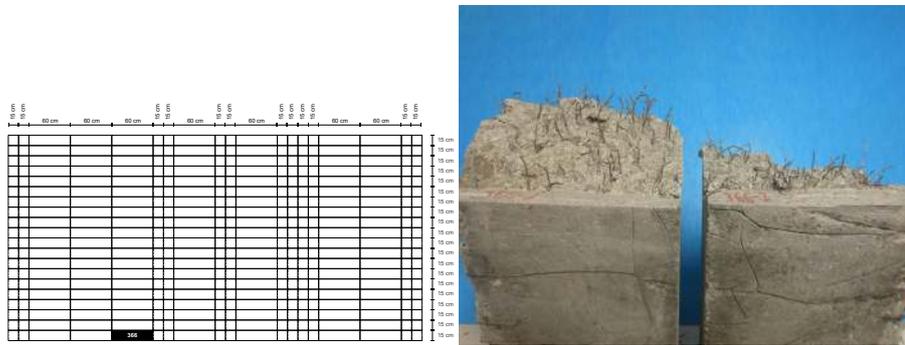
| Probeta n° | | | | | | |
|----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------------------|-----------------|
| 364 | | | | | | |
| | | Longitud (mm) | Anchura (mm) | Altura (mm) | n° fibras en sección rotura | |
| | | | 133 | | 124 | |
| | | $L_{0/15}$ (H) | $L_{15/30}$ (H) | $L_{30/45}$ (H) | $L_{45/60}$ (H) | |
| | | N/A | N/A | N/A | N/A | |
| F_L (KN) | F_1 (KN) | F_2 (KN) | F_3 (KN) | F_4 (KN) | α_{pre} | α_{post} |
| 23.09 | 30.38 | 30.39 | 27.37 | 27.25 | 1.001 | 100 |
| $f_{ct,fl}$ (MPa) | $f_{R,1}$ (MPa) | $f_{R,2}$ (MPa) | $f_{R,3}$ (MPa) | $f_{R,4}$ (MPa) | α_{pre} | α_{post} |
| 7.64 | 10.06 | 10.06 | 9.06 | 8.25 | 100 | 10 |



(a) P-CMOD

(b) $\sigma - \epsilon$

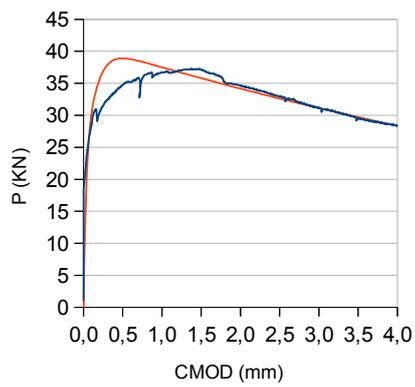
Observaciones:



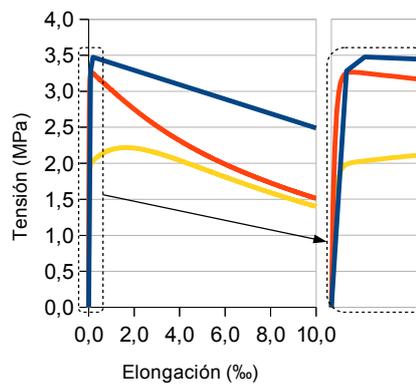
(a) Ubicación de la probeta

(b) Imagen de la probeta

| Probeta n° | | Longitud (mm) | Anchura (mm) | Altura (mm) | n° fibras en sección rotura | |
|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------------------|-----------------|
| 366 | | 596 | 144 | 138 | 154 | |
| | | $L_{0/15}$ (H) | $L_{15/30}$ (H) | $L_{30/45}$ (H) | $L_{45/60}$ (H) | |
| | | 2.269 | 2.369 | 2.354 | 1.924 | |
| F_L (KN) | F_1 (KN) | F_2 (KN) | F_3 (KN) | F_4 (KN) | α_{pre} | α_{post} |
| 24.60 | 34.75 | 37.12 | 32.97 | 29.52 | 1.001 | 100 |
| $f_{ct,fl}$ (MPa) | $f_{R,1}$ (MPa) | $f_{R,2}$ (MPa) | $f_{R,3}$ (MPa) | $f_{R,4}$ (MPa) | α_{pre} | α_{post} |
| 8.20 | 11.58 | 12.37 | 10.99 | 9.84 | 100 | 10 |

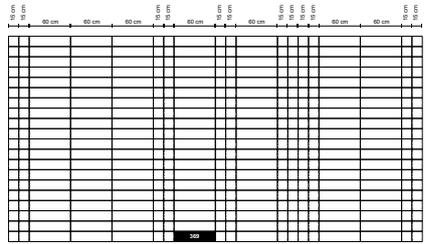


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

Observaciones:

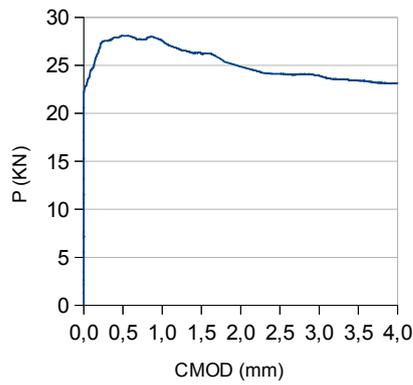


(a) Ubicación de la probeta

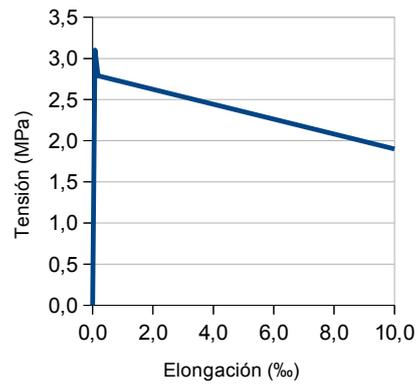


(b) Imagen de la probeta

| Probeta n° | | | | | | |
|--------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------------------|-----------------|
| 369 | | | | | | |
| | | Longitud (mm) | Anchura (mm) | Altura (mm) | n° fibras en sección rotura | |
| | | | 145 | | 135 | |
| | | $L_{0/15}$ (H) | $L_{15/30}$ (H) | $L_{30/45}$ (H) | $L_{45/60}$ (H) | |
| | | N/A | N/A | N/A | N/A | |
| F_L (KN) | F_1 (KN) | F_2 (KN) | F_3 (KN) | F_4 (KN) | α_{pre} | α_{post} |
| 23.42 | 28.09 | 26.16 | 24.11 | 23.56 | N/A | N/A |
| $f_{ct, f1}$ (MPa) | $f_{R,1}$ (MPa) | $f_{R,2}$ (MPa) | $f_{R,3}$ (MPa) | $f_{R,4}$ (MPa) | α_{pre} | α_{post} |
| 7.75 | 9.30 | 8.66 | 7.98 | 7.74 | N/A | N/A |

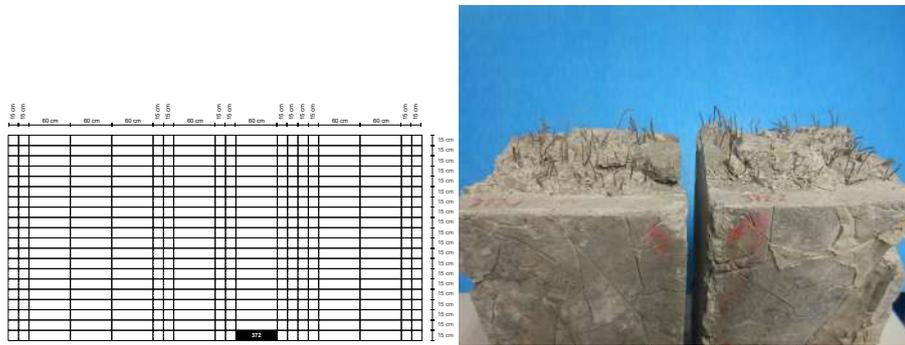


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

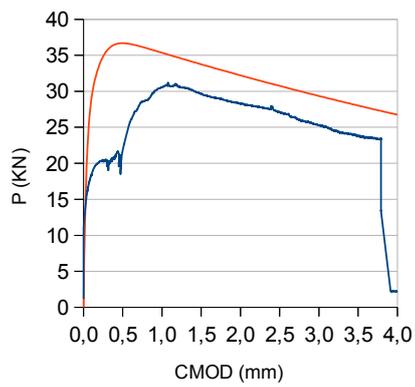
Observaciones:



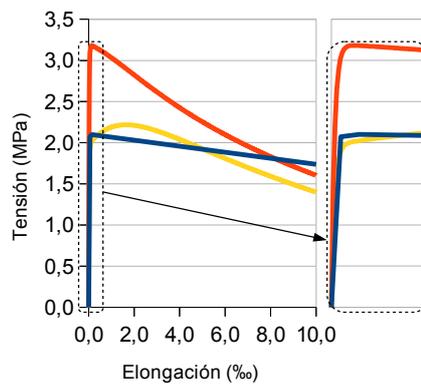
(a) Ubicación de la probeta

(b) Imagen de la probeta

| Probeta n° | | Longitud (mm) | Anchura (mm) | Altura (mm) | n° fibras en sección rotura | |
|----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------------------|-----------------|
| 372 | | 599 | 150 | 148 | 155 | |
| | | $L_{0/15}$ (H) | $L_{15/30}$ (H) | $L_{30/45}$ (H) | $L_{45/60}$ (H) | |
| | | 2.038 | 2.218 | 2.249 | 1.890 | |
| F_L (KN) | F_1 (KN) | F_2 (KN) | F_3 (KN) | F_4 (KN) | α_{pre} | α_{post} |
| 16.19 | 21.87 | 29.65 | 27.11 | 22.80 | 1.001 | 100 |
| $f_{ct,fl}$ (MPa) | $f_{R,1}$ (MPa) | $f_{R,2}$ (MPa) | $f_{R,3}$ (MPa) | $f_{R,4}$ (MPa) | α_{pre} | α_{post} |
| 5.18 | 7.00 | 9.49 | 8.68 | 7.62 | 100 | 10 |

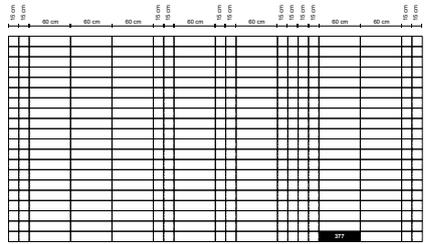


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

Observaciones:

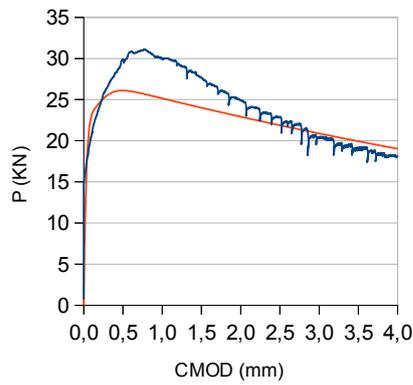


(a) Ubicación de la probeta

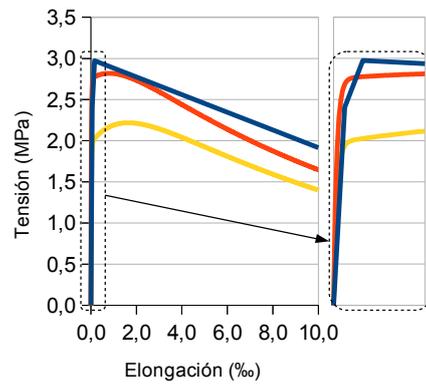


(b) Imagen de la probeta

| Probeta n° | | | | | | |
|-----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------------------|-----------------|
| 377 | | | | | | |
| | | Longitud (mm) | Anchura (mm) | Altura (mm) | n° fibras en sección rotura | |
| | | 602 | 145 | 152 | 88 | |
| | | $L_{0/15}$ (H) | $L_{15/30}$ (H) | $L_{30/45}$ (H) | $L_{45/60}$ (H) | |
| | | 1.498 | 1.729 | 1.446 | 1.132 | |
| F_L (KN) | F_1 (KN) | F_2 (KN) | F_3 (KN) | F_4 (KN) | α_{pre} | α_{post} |
| 18.16 | 29.93 | 27.69 | 22.88 | 19.16 | 1.001 | 100 |
| $f_{ct, f1}$ (MPa) | $f_{R,1}$ (MPa) | $f_{R,2}$ (MPa) | $f_{R,3}$ (MPa) | $f_{R,4}$ (MPa) | α_{pre} | α_{post} |
| 6.01 | 9.91 | 9.17 | 7.57 | 6.34 | 100 | 10 |

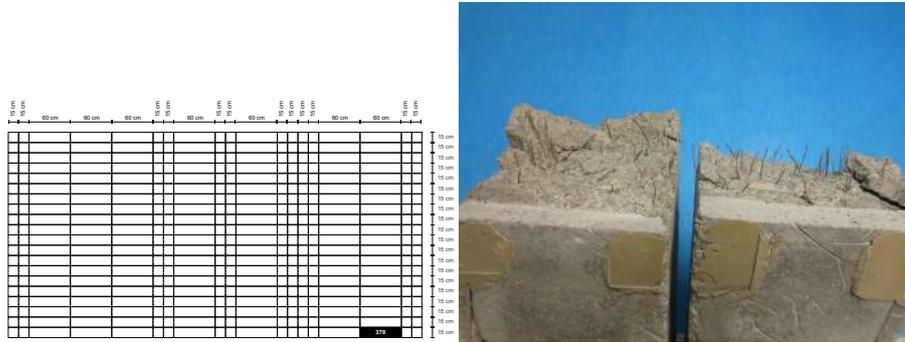


(a) P-CMOD

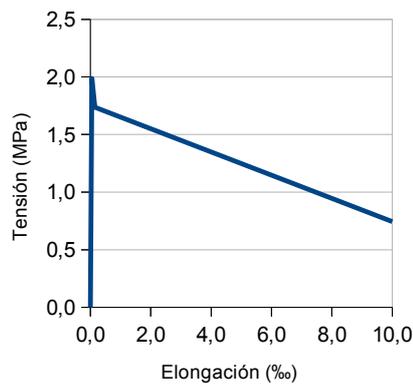
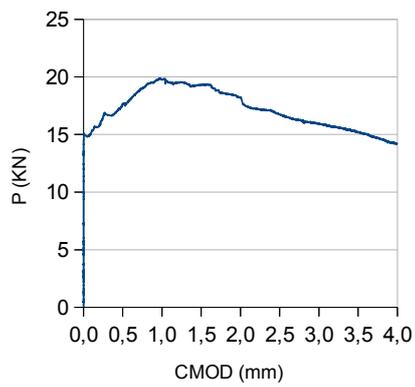


(b) $\sigma - \epsilon$

Observaciones:



| Probeta n° | | Longitud (mm) | Anchura (mm) | Altura (mm) | n° fibras en sección rotura | |
|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------------------|-----------------|
| 378 | | | 146 | | 65 | |
| | | $L_{0/15}$ (H) | $L_{15/30}$ (H) | $L_{30/45}$ (H) | $L_{45/60}$ (H) | |
| | | N/A | N/A | N/A | N/A | |
| F_L (KN) | F_1 (KN) | F_2 (KN) | F_3 (KN) | F_4 (KN) | α_{pre} | α_{post} |
| 15.11 | 17.61 | 19.33 | 16.74 | 15.20 | N/A | N/A |
| $f_{ct,fl}$ (MPa) | $f_{R,1}$ (MPa) | $f_{R,2}$ (MPa) | $f_{R,3}$ (MPa) | $f_{R,4}$ (MPa) | α_{pre} | α_{post} |
| 4.97 | 5.79 | 6.36 | 5.50 | 5.00 | N/A | N/A |



Observaciones:

ANEJOS **D**

Simulaciones computacionales

D.1. Comparativa respecto al viscosímetro BML

Las gráficas mostradas en las Figuras 7.5a y 7.5b del Apartado 7.2.1, se corresponden con los valores recogidos en la Tabla D.1. En realidad, se han omitido una serie de relaciones debido a que las medidas nulas (o bajas) del valor de la tensión de corte, originan una dispersión elevada, que no se corresponde con la realidad.

| τ (Pa) | μ (Pa·s) | D_f (mm) | T_{50} (s) | $\tilde{\tau}_0$ ($\cdot 10^{-3}$) | $\tilde{\mu}$ ($\cdot 10^{-3}$) |
|----------------|-----------------|---------------|-----------------|---|--------------------------------------|
| 19 | 24 | 635 | 1 | 9 | 5 |
| 14 | 33 | 695 | 1,7 | 7 | 19 |
| 12 | 26 | 713 | 1 | 7 | 5 |
| 15 | 31 | 655 | 1 | 8 | 5 |
| 31 | 41 | 570 | 2 | 10 | 20 |
| 11 | 20 | 740 | 1 | 6 | 6 |
| 12 | 30 | 665 | 1 | 8 | 6 |
| 19 | 32 | 660 | 1,3 | 8 | 11 |
| 28 | 41 | 585 | 1,3 | 10 | 9 |
| 29 | 37 | 558 | 1,5 | 10 | 11 |
| 0 | 69 | 590 | 2,1 | 9 | 22 |
| 3 | 48 | 665 | 1,7 | 7 | 17 |
| 4 | 60 | 635 | 2,5 | 6 | 33 |
| 35 | 48 | 560 | 2,1 | 10 | 22 |
| 5 | 55 | 640 | 1,7 | 8 | 17 |
| 0 | 85 | 640 | 3,4 | 0 | 64 |
| 26 | 63 | 580 | 2,8 | 8 | 35 |
| 26 | 61 | 602 | 1,2 | 9 | 8 |
| 17 | 60 | 635 | 2,3 | 7 | 28 |
| 11 | 71 | 662 | 1,8 | 7 | 19 |
| 26 | 71 | 590 | 2,7 | 8 | 33 |
| 21 | 60 | 615 | 3 | 4 | 46 |
| 21 | 66 | 600 | 2 | 9 | 21 |
| 0 | 79 | 685 | 2,3 | 5 | 32 |
| 13 | 69 | 715 | 2 | 5 | 27 |
| 10 | 83 | 683 | 2,6 | 3 | 41 |
| 17 | 45 | 660 | 2 | 7 | 24 |
| 12 | 67 | 575 | 3,3 | 0 | 61 |
| 0 | 76 | 750 | 1,4 | 6 | 13 |
| 0 | 128 | 640 | 3,3 | 0 | 61 |
| 0 | 107 | 700 | 2,3 | 4 | 33 |
| 7 | 88 | 675 | 2,6 | 2 | 44 |
| 26 | 93 | 535 | 4,1 | 0 | 80 |
| 0 | 80 | 680 | 3,2 | 0 | 60 |
| 28 | 51 | 610 | 1,7 | 9 | 16 |
| 59 | 13 | 605 | 0,7 | 9 | 0 |
| 35 | 14 | 650 | 1 | 8 | 5 |
| 42 | 38 | 580 | 2 | 10 | 20 |
| 35 | 46 | 595 | 1,9 | 9 | 19 |
| 21 | 44 | 620 | 1,6 | 9 | 15 |

Tabla D.1: Comparativa entre los resultados de Gerris y el viscosímetro BML.

Indice de Tablas

| | | |
|-------|---|-----|
| 2.1. | Clases de escurrimiento. | 31 |
| 2.2. | Clases de viscosidad. | 31 |
| 2.3. | Clases de resistencia al bloqueo. | 31 |
| 3.1. | Características de las fibras empleadas. | 48 |
| 3.2. | Granulometrias de los áridos. | 53 |
| 3.3. | Dosificación teórica. | 57 |
| 4.1. | Dosificación real. | 65 |
| 5.1. | Estimación del factor de orientación. | 84 |
| 5.2. | Características del marco y del bobinado. | 85 |
| 5.3. | Estimación del factor de orientación en base a métodos magnéticos. | 96 |
| 5.4. | Resultados del TAC en las probetas pequeñas. | 103 |
| 5.5. | Datos del estudio magnético y del análisis tomográfico. | 103 |
| 5.6. | Valores de penetración de agua bajo presión. | 105 |
| 6.1. | Resultados de la resistencia a compresión de las probetas cúbicas. | 108 |
| 6.2. | Resultados de la resistencia a compresión de las probetas cilíndricas. | 109 |
| 6.3. | Resultados del ensayo Barcelona. | 114 |
| 6.4. | Resultados del ensayo Barcelona en dirección Y. | 115 |
| 6.5. | Resultados de la resistencia indirecta de las probetas cilíndricas. | 118 |
| 6.6. | Resultados de la resistencia a cortante de las probetas. | 120 |
| 6.7. | Resultados de la resistencia a flexotracción de las probetas. | 123 |
| 6.8. | Ratio entre valores de resistencias reales y previstas. | 129 |
| 6.9. | Análisis de las diferencias entre las variaciones de inductancia esperadas para las líneas de regresión inicial (I) y final (F) en el caso de las diversas resistencias residuales. | 132 |
| 6.10. | Parámetros de entrada para la predicción del comportamiento del material. | 136 |
| 7.1. | Diferencias en las mediciones entre simulaciones con y sin cono. | 148 |
| 7.2. | Parámetros de partida para las funciones sigmoides. | 161 |
| 8.1. | Influencia relativa de diversos factores en el coste del HAC [Garrido (2004)]. | 168 |
| 8.2. | Esfuerzos máximos. | 175 |
| 8.3. | Dosificaciones comparadas. | 176 |
| 8.4. | Coefficientes de ponderación planteados. | 181 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 8.5. | Coefficientes de ponderación. | 182 |
| 8.6. | Optimización del contenido de cemento. | 183 |
| 8.7. | Optimización del tamaño de los áridos. | 184 |
| 8.8. | Optimización del agua de amasado. | 186 |
| 8.9. | Optimización de los aditivos químicos empleados en la dosificación. | 188 |
| 8.10. | Optimización del armado. | 189 |
| 8.11. | Control de impactos. | 191 |
| 8.12. | Reducción de tiempos de construcción. | 192 |
| 8.13. | Ensayos de control de calidad efectuados. | 193 |
| 8.14. | Comparativa de los casos de estudio. | 195 |
| | | |
| A.1. | Medidas completas del ensayo mediante pulsos ultrasónicos (dirección horizontal). | 230 |
| A.2. | Medidas completas del ensayo mediante pulsos ultrasónicos (dirección vertical). | 235 |
| | | |
| B.1. | Relación de valores de variación de inductancia en probetas cúbicas para diferentes bobinas. | 242 |
| B.2. | Relación de valores de variación de inductancia en probetas prismáticas. | 246 |
| | | |
| D.1. | Comparativa entre los resultados de Gerris y el viscosímetro BML. | 316 |

Indice de Figuras

| | | |
|-------|--|----|
| 1.1. | Tecnologías del hormigón combinadas en la investigación. | 4 |
| 1.2. | Optimización del HACRFA - vista general de las 7 partes que componen la tesis. | 6 |
| 2.1. | Incremento de ductilidad para diversas cuantías de fibras. | 12 |
| 2.2. | Efecto del tamaño máximo de árido [Johnston (1996)]. | 13 |
| 2.3. | Tipos de fibras. | 14 |
| 2.4. | Clasificación esquemática de los HRF [Rokugo et al (2009)]. | 16 |
| 2.5. | Clasificación gráfica de los HRF [Naaman and Reinhardt (2006)]. | 17 |
| 2.6. | Diagrama tensión-elongación $\sigma-\epsilon$ y tensión-abertura de fisura $\sigma-\omega$ del HRFA [Laranjeira et al (2010)]. | 19 |
| 2.7. | Relación carga-deslizamiento durante el ensayo de arrancamiento [Cunha (2010)]. | 20 |
| 2.8. | Tipos de configuraciones del ensayo a arrancamiento [Cunha (2010)]. | 21 |
| 2.9. | Limitación del giro de las fibras desde 3D a 2D. | 23 |
| 2.10. | Modelos constitutivos del HRFA [Blanco Álvarez et al (2010)]. | 24 |
| 2.11. | TAC sobre probetas de HRFA. | 28 |
| 2.12. | Influencia de varios de los componentes en el HAC [Wallevik (2003)]. | 32 |
| 2.13. | Comparativa de la reología de diversos hormigones [Wallevik (2003)]. | 33 |
| 2.14. | Rango de valores idóneos para el HAC [Wallevik (2003)]. | 34 |
| 2.15. | Dosificación de HAC y Hormigón convencional. | 35 |
| 2.16. | Ensayos en estado fresco del HAC. | 35 |
| 2.17. | Hormigonado de muro de HAC [Thrane (2007)]. | 37 |
| 2.18. | Modelos de fluidos no-newtonianos. | 40 |
| 3.1. | Modelo tridimensional de las fibras ensayadas. | 48 |
| 3.2. | Fibras embebidas en mortero y útiles de amarre. | 49 |
| 3.3. | Máquina de ensayo empleada para el arrancamiento de las fibras. | 50 |
| 3.4. | Curvas carga-desplazamiento para los diversos tipos de fibras | 52 |
| 3.5. | Parábola de Fuller y curva combinada. | 54 |
| 3.6. | Compacidad, resistencia y trabajabilidad en función del porcentaje de arena. | 55 |
| 3.7. | Saturación y retraso del fraguado por sobredosis de aditivo. | 56 |
| 3.8. | Insuficiente escurrimiento por falta de aditivo superplastificante. | 57 |
| 3.9. | Escurrimiento de la amasada en laboratorio. | 58 |
| 4.1. | Escurrimiento de la amasada definitiva. | 65 |
| 4.2. | Vista del encofrado y las juntas selladas. | 67 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 4.3. | Fisuras por retracción en zona superior de muro. | 68 |
| 4.4. | Vista del muro tras su desencofrado. | 69 |
| 4.5. | Forma moldeada por la presión de bombeo en el extremo de la manguera. | 70 |
| 4.6. | Esquema de corte del muro y distribución de probetas. | 73 |
| 4.7. | Vuelco de la estructura mediante grúa. | 74 |
| 4.8. | Procedimiento de corte del muro. | 74 |
| 5.1. | Colocación de palpadores. | 78 |
| 5.2. | Puntos de medida y recepción de la onda ultrasónica. | 79 |
| 5.3. | Velocidad de propagación de impulsos ultrasónicos por zonas (dirección horizontal). | 81 |
| 5.4. | Velocidad de propagación de impulsos ultrasónicos por zonas (dirección bertikal). | 82 |
| 5.5. | Fibras seccionadas en planos de corte ortogonales. | 83 |
| 5.6. | Bobinas utilizadas durante el estudio. | 85 |
| 5.7. | Procedimiento de medición en probetas cúbicas. | 86 |
| 5.8. | Procedimiento de medición en probetas prismáticas. | 86 |
| 5.9. | Probetas sobre las que se ha aplicado el método magnético (en negro). | 87 |
| 5.10. | Representación gráfica de la variación de la inductancia a lo largo del eje X. | 88 |
| 5.11. | Representación gráfica de la variación de la inductancia a lo largo del eje Y. | 89 |
| 5.12. | Representación gráfica de la variación de la inductancia a lo largo del eje Z. | 90 |
| 5.13. | Representación gráfica de la variación media de la inductancia. | 91 |
| 5.14. | Correlación entre medidas mediante diversas bobinas. | 92 |
| 5.15. | Medición de las probetas prismáticas. | 93 |
| 5.16. | Correlación entre medidas sobre probetas prismáticas y cúbicas. | 94 |
| 5.17. | Machaqueo, extracción y pesaje de las fibras de las probetas. | 94 |
| 5.18. | Relación entre los valores de variación medios de la inductancia y la densidad de fibras. | 95 |
| 5.19. | Curva de corrección del factor de orientación. | 96 |
| 5.20. | Tomógrafos empleados durante el estudio. | 98 |
| 5.21. | Testigo de probeta 292. | 100 |
| 5.22. | Testigo de probeta 273. | 101 |
| 5.23. | Probeta 328. | 102 |
| 5.24. | Relación entre el método magnético y la tomografía axial computarizada. | 103 |
| 5.25. | Arquitectura del sistema de medidas. | 104 |
| 5.26. | Probetas y frente de penetración medido. | 105 |
| 6.1. | Ubicación de las probetas cúbicas ensayadas a rotura por compresión (en negro). | 108 |
| 6.2. | Rotura de probetas tras ensayo a compresión. | 109 |
| 6.3. | Modelo de bielas y tirantes considerado [Mora (2008)] y configuración de ensayo ejecutado. | 111 |
| 6.4. | Ubicación de las probetas cúbicas ensayadas a doble punzonamiento (en negro). | 112 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 6.5. | Mecanismos idealizados de rotura, separación y deslizamiento [Mora (2008)]. | 113 |
| 6.6. | Patrón de rotura de probetas con orientaciones dispares. | 113 |
| 6.7. | Tenacidad del material. | 115 |
| 6.8. | Comparativa entre probetas de similar cuantía de fibras y similar orientación en el eje X. | 116 |
| 6.9. | Patrón de rotura de probetas con orientaciones similares. | 117 |
| 6.10. | Realización del ensayo a cortante. | 119 |
| 6.11. | Ubicación de las probetas cúbicas ensayadas a cortante (en negro). | 119 |
| 6.12. | Realización del ensayo a flexotracción. | 120 |
| 6.13. | Ubicación de las probetas cúbicas ensayadas a flexotracción (en negro). | 121 |
| 6.14. | Probetas agrupadas en función de su comportamiento mecánico. | 124 |
| 6.15. | Representación del comportamiento mecánico de las probetas en el conjunto de la estructura. | 125 |
| 6.16. | Relación entre la variación de la inductancia y el número de fibras en la sección de rotura. | 125 |
| 6.17. | Relación entre carga-inductancia y carga-nº de fibras para F_L | 126 |
| 6.18. | Relación entre carga-inductancia y carga-nº de fibras para F_1 | 127 |
| 6.19. | Relación entre carga-inductancia y carga-nº de fibras para F_2 | 127 |
| 6.20. | Relación entre carga-inductancia y carga-nº de fibras para F_3 | 128 |
| 6.21. | Relación entre carga-inductancia y carga-nº de fibras para F_4 | 128 |
| 6.22. | Relación entre inductancia y diversas resistencias. | 130 |
| 6.23. | Resultados del ensayo a flexotracción (cuadrados azules) y valores previstos (rombos rojos). | 131 |
| 6.24. | Resultados del ensayo flexotracción (en azul) y aproximación exponencial (en rojo). | 135 |
| 6.25. | Diagrama multilíneal [EHE-08 (2008)]. | 136 |
| 6.26. | Relación entre inductancia y diversas resistencias. | 137 |
| 6.27. | Diagrama multilíneal (en azul) y aproximación exponencial (en rojo). | 139 |
| 7.1. | Simulación del ensayo de escurrimiento mediante el cono de Abrams para diversas combinaciones de tensión de corte y viscosidad. | 146 |
| 7.2. | Diferencia de movimiento de la masa debido a la coacción del cono. | 147 |
| 7.3. | Variación de T_{50} en función de $\tilde{\mu}$ y $\tilde{\tau}_0$ | 148 |
| 7.4. | Variación de D_f en función de $\tilde{\mu}$ y $\tilde{\tau}_0$ | 149 |
| 7.5. | Relación entre medidas de τ_0 y μ del viscosímetro BML y $\tilde{\tau}_0$ y $\tilde{\mu}$ de simulaciones CFD. | 150 |
| 7.6. | Modelo de simulación del muro y sus condiciones de contorno. | 151 |
| 7.7. | Criterios y niveles de refinamiento. | 153 |
| 7.8. | Zona rellenada con hormigón y el refinamiento de la malla. | 153 |
| 7.9. | Campos de velocidades para $t = 112$ s. | 154 |
| 7.10. | Campos de velocidades para $t = 439$ s. | 155 |
| 7.11. | Progresión de los campos de velocidad para las probetas nº 85 y nº 294. | 157 |
| 7.12. | Superposición de orientaciones previstas y detectadas mediante métodos magnéticos. | 158 |
| 7.13. | Distribución Gaussiana de las orientaciones. | 159 |
| 7.14. | Predicción de las resistencias residuales basada en las orientaciones previstas. | 160 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 7.15. | Diagrama multilineal (en azul) y aproximación exponencial (en amarillo). | 163 |
| 8.1. | Ubicación de diversos depósitos de contención cilíndricos en las cercanías de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Bilbao. | 169 |
| 8.2. | Sección geométrica de una estructura tipo. | 170 |
| 8.3. | Armado de estructura tipo. | 171 |
| 8.4. | Detalles específicos de uniones y apoyos articulados. | 171 |
| 8.5. | Definición geométrica del depósito tampón. | 172 |
| 8.6. | Armado requerido en la construcción del depósito tampón. | 172 |
| 8.7. | Diferencia de desplazamientos y esfuerzos en depósitos de base empotrada y articulada. | 173 |
| 8.8. | Precios de hormigones con diferentes exigencias de contenidos mínimos de cemento en base a diversas exposiciones genéricas y específicas. | 176 |
| 8.9. | Diferencias en el coste porcentual de los componentes del hormigón con el mismo grado de exposición ambiental. | 177 |
| 8.10. | Diferencias porcentuales de los costes de la mano de obra y los materiales. | 178 |
| 8.11. | Esquema de los indicadores y su jerarquía para la determinación del ISMA. | 182 |
| 8.12. | Función de valor de la optimización del cemento. | 184 |
| 8.13. | Función de valor de la optimización del tamaño de los agregados. | 185 |
| 8.14. | Función de valor de la optimización del agua de amasado. | 187 |
| 8.15. | Función de valor de la optimización de la cantidad de aditivos empleados. | 189 |
| 8.16. | Función de valor de la optimización del armado. | 190 |
| 8.17. | Función de valor del control de los impactos. | 191 |
| 8.18. | Función de valor del plazo de ejecución. | 192 |
| 8.19. | Función de valor de la optimización de los residuos generados. | 194 |
| A.1. | Representación de la cuadrícula y las mediciones efectuadas. | 221 |
| A.2. | Líneas de regresión que mejor se ajustan a las medidas recogidas. | 222 |

Notaciones, símbolos y acrónimos

NOTACIONES

Letras mayúsculas romanas

| | | |
|-------------------|---|----------------------|
| A | Coeficiente de contribución social | [—] |
| A _i | Parámetro representativo de cada indicador (i=1→8) | [KN] |
| A _b | Asíntota inferior de la función sigmoide | [MPa] |
| A _t | Asíntota superior de la función sigmoide | [MPa] |
| B | Coeficiente de contribución por extensión de la vida útil . | [—] |
| C ₁ | Constante de integración | [—] |
| C ₂ | Constante de integración | [—] |
| C ₃ | Constante de integración | [—] |
| C ₄ | Constante de integración | [—] |
| D | Rigidez a flexión de la lámina | [N·m] |
| E | Módulo de elasticidad longitudinal | [MPa] |
| F _L | Carga correspondiente al límite de proporcionalidad | [KN] |
| F ₁ | Carga correspondiente a $\omega = 0.5$ mm | [KN] |
| F ₂ | Carga correspondiente a $\omega = 1.5$ mm | [KN] |
| F ₃ | Carga correspondiente a $\omega = 2.5$ mm | [KN] |
| F ₄ | Carga correspondiente a $\omega = 3.5$ mm | [KN] |
| H | Altura del depósito | [m] |
| II _γ | Segunda invariante del tensor deformación | [s ⁻²] |
| I _{cs} | Longitud crítica | [mm] |
| K | Factor de consistencia | [Pa·s ⁿ] |
| K _i | Parámetro representativo de cada indicador (i=1→8) | [KN] |
| L | Inductancia | [H] |
| P | Carga aplicada | [KN] |
| P _i | Valor de la función de cada indicador (i=1→8) | [KN] |
| P _{máx} | Carga máxima alcanzada | [KN] |
| P _{pre} | Carga del punto de referencia pre-fisuración | [KN] |
| P _{post} | Carga del punto de referencia post-fisuración | [KN] |
| R | Radio del depósito | [m] |
| R ² | Coeficiente de determinación | [—] |
| T _{δ=1} | Tenacidad a 1 mm de desplazamiento | [N·m] |
| T _{δ=2} | Tenacidad a 2 mm de desplazamiento | [N·m] |
| T _{δ=3} | Tenacidad a 3 mm de desplazamiento | [N·m] |

| | | |
|----------------|---|----------------------|
| $T_{\delta=4}$ | Tenacidad a 4 mm de desplazamiento | [N·m] |
| $T_{\delta=5}$ | Tenacidad a 5 mm de desplazamiento | [N·m] |
| $T_{\delta=6}$ | Tenacidad a 6 mm de desplazamiento | [N·m] |
| T_{50} | Tiempo de escurrimiento | [s] |
| T_v | Tiempo de flujo | [s] |
| TM | Tamaño máximo de árido | [mm] |
| U | Componente horizontal de la velocidad | [m·s ⁻¹] |
| V | Componente vertical de la velocidad | [m·s ⁻¹] |
| V_i | Coefficiente de valor para cada indicador (i=1→8) | [—] |
| Vol | Volumen de hormigón | [m ³] |
| X | Eje longitudinal del muro | [—] |
| Y | Eje transversal del muro | [—] |
| Z | Eje vertical del muro | [—] |
| Z^* | Presión sobre el depósito | [MPa] |

Letras minúsculas romanas

| | | |
|---------------|---|----------------------|
| a | Radio del punzón | [mm] |
| b | Dimensión de la caja | [m] |
| c | Valor del trazador | [—] |
| c_1 | Constante de forma del modelo cuadruple exponencial ... | [—] |
| c_2 | Constante de forma del modelo cuadruple exponencial ... | [—] |
| c_3 | Constante de forma del modelo cuadruple exponencial ... | [—] |
| c_4 | Constante de forma del modelo cuadruple exponencial ... | [—] |
| c_5 | Constante de forma del modelo cuadruple exponencial ... | [—] |
| c_6 | Constante de forma del modelo cuadruple exponencial ... | [—] |
| d | Diámetro de la fibra | [mm] |
| d_f | Escurrimiento | [mm] |
| $d_{J,f}$ | Escurrimiento en el anillo Japonés. | [mm] |
| e | Espesor | [m] |
| f_{ck} | Resistencia característica a compresión del hormigón ... | [MPa] |
| f_{cm} | Resistencia media a compresión del hormigón | [MPa] |
| $f_{cm,3}$ | Resistencia media a compresión del hormigón a 3 días ... | [MPa] |
| $f_{cm,7}$ | Resistencia media a compresión del hormigón a 7 días ... | [MPa] |
| $f_{cm,14}$ | Resistencia media a compresión del hormigón a 14 días .. | [MPa] |
| $f_{cm,28}$ | Resistencia media a compresión del hormigón a 28 días .. | [MPa] |
| f_{ct} | Resistencia a tracción del hormigón | [MPa] |
| $f_{ct,fl}^f$ | Resistencia a flexotracción del hormigón | [MPa] |
| $f_{ct,fl}$ | Resistencia a flexotracción del hormigón | [MPa] |
| $f_{R,1}$ | Primera resistencia residual a flexotracción del hormigón | [MPa] |
| $f_{R,2}$ | Segunda resistencia residual a flexotracción del hormigón | [MPa] |
| $f_{R,3}$ | Tercera resistencia residual a flexotracción del hormigón . | [MPa] |
| $f_{R,4}$ | Cuarta resistencia residual a flexotracción del hormigón .. | [MPa] |
| g | Gravedad | [m·s ⁻²] |
| h | Altura de la probeta prismática | [mm] |
| k | Módulo de fisuración | [KN/m ³] |
| l | Longitud de la fibra | [mm] |
| m_i | Parámetro representativo de cada indicador (i=1→8) | [KN] |

| | | |
|-------------------|--|----------------------|
| n | Índice de comportamiento de flujo | [—] |
| n _i | Parámetro representativo de cada indicador (i=1→8) | [KN] |
| p _{i,j} | Porcentaje de cada subcriterio (j=1→n) en cada indicador (i=1→8) | [%] |
| t | Tiempo | [s] |
| \tilde{t} | Tiempo adimensional | [—] |
| v | Velocidad | [m·s ⁻¹] |
| \tilde{v} | Velocidad adimensional | [—] |
| x ₀ | Punto de inflexión de la función sigmoide | [°] |
| x _{pre} | Abertura de fisura del punto de referencia pre-fisuración . | [mm] |
| x _{post} | Abertura de fisura del punto de referencia post-fisuración | [mm] |
| w | Ancho de la trnasción de la función sigmoide | [°] |

Letras mayúsculas griegas

| | | |
|--------------------|--|--------------------|
| $\Delta L_{0/15}$ | Variación de la inductancia en el primer cuarto de las probetas prismáticas | [H] |
| $\Delta L_{15/30}$ | Variación de la inductancia en el segundo cuarto de las probetas prismáticas | [H] |
| $\Delta L_{30/45}$ | Variación de la inductancia en el tercer cuarto de las probetas prismáticas | [H] |
| $\Delta L_{45/60}$ | Variación de la inductancia en el cuarto cuarto de las probetas prismáticas | [H] |
| ΔL | Variación media de la inductancia en los tres ejes principales | [H] |
| ΔL_x | Variación de la inductancia en el eje X | [H] |
| ΔL_y | Variación de la inductancia en el eje Y | [H] |
| ΔL_z | Variación de la inductancia en el eje Z | [H] |
| $\Delta L_{i, \%}$ | Porcentaje de variación de la inductancia en cada eje (X,Y,Z) | [%] |
| $\Delta L_{x, \%}$ | Porcentaje de variación de la inductancia en el eje X | [%] |
| $\Delta L_{y, \%}$ | Porcentaje de variación de la inductancia en el eje Y | [%] |
| $\Delta L_{z, \%}$ | Porcentaje de variación de la inductancia en el eje Z | [%] |
| $\sum X$ | Sumatorio de áreas proyectadas en dirección X | [mm ²] |
| $\sum Y$ | Sumatorio de áreas proyectadas en dirección Y | [mm ²] |
| $\sum Z$ | Sumatorio de áreas proyectadas en dirección Z | [mm ²] |

Letras minúsculas griegas

| | | |
|-----------------|---|--------------------|
| α_i | Coficiente de ponderación de cada indicador (i=1→8) .. | [—] |
| α_{pre} | Constante de forma del modelo cuadruple exponencial ... | [—] |
| α_{post} | Constante de forma del modelo cuadruple exponencial ... | [—] |
| β | Coficiente cilíndrico de forma | [m ⁻¹] |
| β_i | Coficiente de ponderación de cada indicador (i=1→8) .. | [—] |
| γ | Gradiente de deformación | [s ⁻¹] |
| $ \gamma $ | Tensor del gradiente de deformación | [s ⁻²] |
| γ_i | Coficiente de ponderación de cada indicador (i=1→8) .. | [—] |

| | | |
|-------------------|---|-----------------------|
| δ | Desplazamiento | [mm] |
| ϵ | Elongación | [—] |
| η | Viscosidad aparente | [Pa·s] |
| η_{θ} | Factor de orientación | [—] |
| $\eta_{i,\theta}$ | Factor de orientación medio en cada eje (X,Y,Z) | [—] |
| $\eta_{x,\theta}$ | Factor de orientación medio en el eje X | [—] |
| $\eta_{y,\theta}$ | Factor de orientación medio en el eje Y | [—] |
| $\eta_{z,\theta}$ | Factor de orientación medio en el eje Z | [—] |
| θ | Ángulo de la fibra | [°] |
| $\theta_{i,m}$ | Ángulo de orientación medio en cada eje (X,Y,Z) | [°] |
| $\theta_{x,m}$ | Ángulo de orientación medio en el eje X | [°] |
| $\theta_{y,m}$ | Ángulo de orientación medio en el eje Y | [°] |
| $\theta_{z,m}$ | Ángulo de orientación medio en el eje Z | [°] |
| $\lambda_{i,j}$ | Parámetro de cada subcriterio (j=1→n) en cada indicador (i=1→8) | [%] |
| μ | Viscosidad plástica | [Pa·s] |
| μ_h | Viscosidad plástica del hormigón | [Pa·s] |
| μ_a | Viscosidad plástica del aire | [Pa·s] |
| $\tilde{\mu}$ | Viscosidad plástica adimensional | [—] |
| ν | Coficiente de Poisson | [—] |
| ρ | Densidad | [Kg·m ⁻³] |
| ρ_h | Densidad del hormigón | [Kg·m ⁻³] |
| ρ_a | Densidad del aire | [Kg·m ⁻³] |
| σ | Tensión | [MPa] |
| σ_{pre} | Tensión del punto de referencia pre-fisuración | [MPa] |
| σ_{post} | Tensión de fisura del punto de referencia post-fisuración .. | [MPa] |
| τ_0 | Tensión de corte | [Pa] |
| $\tau_{0,h}$ | Tensión de corte del hormigón | [Pa] |
| $\tau_{0,a}$ | Tensión de corte del aire | [Pa] |
| $\tilde{\tau}_0$ | Tensión de corte adimensional | [—] |
| τ_v | Resistencia a cortante | [MPa] |
| ω | Abertura de fisura | [mm] |

ACRÓNIMOS

| | |
|-------------|---|
| AC-IS | Alternate Current Impedance Spectroscopy (Espectroscopia de Impedancia en Corriente Alterna) |
| CFD | Computational Fluid Dynamics (Dinámica de Fluidos Computacional) |
| CMOD | Crack Mouth Opening Displacement (Desplazamiento de Abertura de Boca de Fisura) |
| CPF | Controlled Permeability Formwork (Encofrado de Permeabilidad Controlada) |
| C.V. | Coficiente de Variación |
| DEM | Distinct Element Method (Método de Elementos Distintos) |
| DPD | Disipative Particles Dynamics (Dinámica de Partículas Disipativas) |

| | |
|---------|--|
| DVEM | Divided Viscoplastic Element Method (Metodo de Elementos Viscoplasticos Divididos) |
| ECC | Engineered Cementitious Composites (Compuestos Cementicios Ingenieriles) |
| EHE | Instrucción de Hormigón Estructural |
| ELU | Estados Límites Últimos |
| ELS | Estados Límites de Servicio |
| E.T.A.P | Estación de Tratamiento de Agua Potable |
| FCM | Fictitious Crack Model (Modelo de Fisura Ficticia) |
| FEM | Finite Element Method (Método de Elementos Finitos) |
| FEMLIP | Finite Element Method with Lagrangian Integration Points (Método de Elementos Finitos con Puntos de Integración Lagrangianos) |
| FRC | Fibre Reinforced Concrete (Hormigón Reforzado con Fibras) |
| FRCC | Fibre Reinforced Cementitious Composites (Compuestos Cementicios Reforzados con Fibras) |
| HAC | Hormigón Autocompactante |
| HACRFA | Hormigón Autocompactante Reforzado con Fibras de Acero |
| HAR | Hormigón de Alta Resistencia |
| HC | Hormigón Convencional |
| HPFRCC | High Performance Fibre Reinforced Cementitious Composites (Compuestos Cementicios de Altas Prestaciones Reforzados con Fibras) |
| HRF | Hormigón Reforzado con Fibras |
| HRFA | Hormigón Reforzado con Fibras de Acero |
| IBM | Immersed Boundary Method (Método del Límite Inmerso) |
| ICES | Índice de Contribución de la Estructura a la Sostenibilidad |
| ISMA | Índice de Sostenibilidad Medioambiental |
| LMA | Levenberg-Marquardt Algorithm (Algoritmo Levenberg-Marquardt) |
| LOP | Limit Of Proportionality (Límite de Proporcionalidad) |
| LSM | Level Set Method (Método del Conjunto de Nivel) |
| NDT | Non-Destructive Testing (Ensayos No Destructivos) |
| SP | Superplastificante |
| TAC | Tomografía Axial Computerizada |
| UFC | Ultra High Strength Fibre Reinforced Cementitious Composites (Compuestos Cementicios de Ultra Alta Resistencia Reforzados con Fibras) |
| VFEM | Viscoplastic Finite Element Method (Método de Elementos Viscoplasticos Finitos) |
| VSEM | Viscoplastic Suspended Element Method (Método de Elementos Viscoplasticos Suspendidos) |
| VOF | Volume of FLuid (Volumen de Fluido) |

Publicaciones

A continuación se listan las publicaciones de carácter internacional a las que ha dado lugar la investigación de la presente Tesis Doctoral:

ARTÍCULOS CIENTÍFICOS

Orbe, A., Cuadrado, J., Losada, R., Rojí, E. *Framework for the design and analysis of steel fiber reinforced self-compacting concrete structures*. Construct Build Mater 2012;35(0):676 – 686. (Q1)

Orbe, A., Rojí, E., Cuadrado, J., Losada, R. *Calibration patterns for predicting residual strengths of steel fibre reinforced concrete (SFRC)*. Compos Part B-Eng. Aceptado para su publicación. (Q1)

Orbe, A., Cuadrado, J., Losada, R., Rojí, E. *The prediction of bending strengths in SFRSCC using computational fluid dynamics (CFD)*. Comput Concrete. Bajo revisión. (Q2)

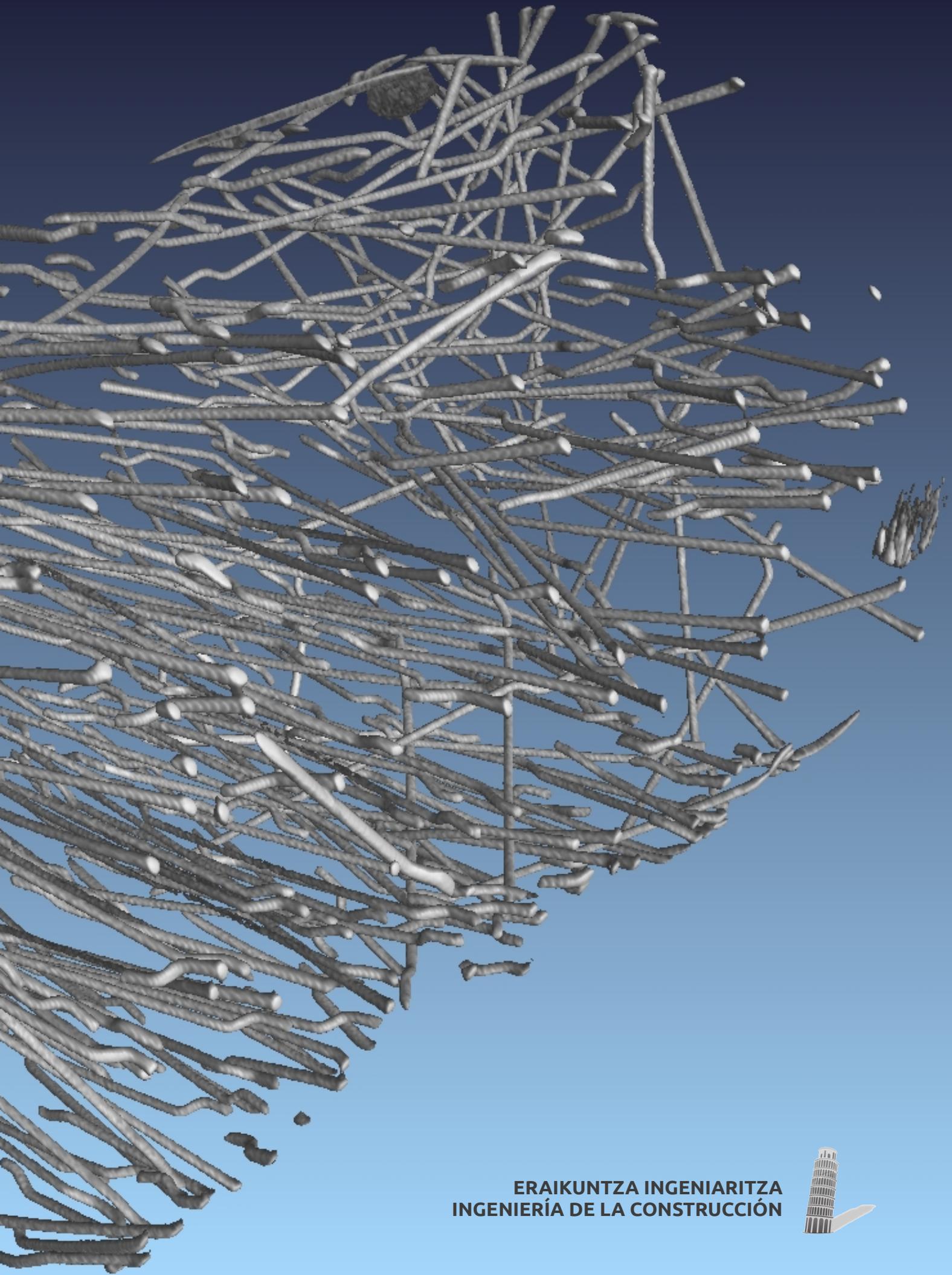
Orbe, A., Cuadrado, J., Losada, R., Rojí, E. *Estudio para la optimización de la composición de un HACRFA (Hormigón Autocompactante Reforzado con Fibras de Acero) estructural*, Inf Constr. Aceptado para su publicación. (Q3)

COMUNICACIONES EN CONGRESOS

Orbe, A., Cuadrado, J., Losada, R., Rojí, E. *Simulations of computational fluid dynamics (CFD) for the prediction of fibre orientation in SFRSCC*, In: Computational Technologies in Concrete Structures (CTCS13), KAIST, Jeju-do, South Korea, September 2013, p. 142 + CD.

Orbe, A., Cuadrado, J., Losada, R., Rojí, E., Maturana, A. *Desarrollo estructural del HACRFA: Hacia una caracterización de su composición*, In: V Congreso Internacional de Estructuras, Asociación científico-técnica del hormigón estructural (ACHE); Barcelona, Spain, October 2011. p. 213-214 + CD.

Orbe, A., Cuadrado, J., Losada, R., Rojí, E. *Diseño de estructuras de contención innovadoras*, In: XV International congress on project engineering, AEIPRO, Huesca, Spain, July 2011, p. 60 + CD.



ERAIKUNTZA INGENIARITZA
INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN

