

UPV EHU

GRADO DE INGENIERÍA EN TECNOLOGÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE GRADO

**<ESTUDIO DE MORTEROS DE CONSTRUCCIÓN
FABRICADOS MEDIANTE ESCORIAS
SIDERÚRGICAS>**

Alumno/Alumna: San Sebastian Aurre Josu

Director/Directora (1): Martínez González Javier Jesús

Director/Directora (2): Santamaria León Amaia

Curso: <2017-2018>

Fecha: 28/06/2018

ÍNDICE

1	. INTRODUCCIÓN	7
1.1	INDUSTRIA SIDEROMETALÚRGICA.....	8
1.2	PRODUCCIÓN MUNDIAL Y ESPAÑOLA DE ACERO	10
1.3	PRODUCCIÓN DE ACERO EN EUSKADI	11
1.4	PRODUCCIÓN DE ACERO	12
1.4.1	Fabricación de acero en horno eléctrico de arco.....	12
1.5	ECONOMÍA CIRCULAR.....	14
2	. OBJETO.....	16
3	. FUNDAMENTO TEÓRICO	17
3.1	EL MORTERO	18
3.1.1	COMPONENTES DEL MORTERO	19
3.1.2	ESTADOS DEL MORTERO	23
3.2	ESCORIAS.....	26
3.2.1	TIPOS DE ESCORIA	27
3.2.2	UTILIDAD DE LA ESCORIA BLANCA	28
4	METODOLOGÍA.....	29
4.1	MATERIAS PRIMAS EMPLEADAS.....	30
4.1.1	Cemento	30
4.1.2	Agua	31
4.1.3	Árido natural	31
4.1.4	Escoria blanca.....	32
4.1.5	Aditivos.....	33
4.2	PROCEDIMIENTOS.....	34
4.2.1	Aparatos utilizados.....	34
4.2.2	Procedimiento de amasada	35
4.2.3	Curado de probetas	37
4.2.4	Ensayo de flexión	38
4.2.5	Ensayo a compresión	41
4.2.6	Medida de retracción.....	42

5	RESULTADOS	43
5.1	ANALISIS GENERAL.....	44
5.2	RESULTADOS OBTENIDOS EN LOS MORTEROS SIN ESCORIA	45
5.2.1	Resultados M0	46
5.2.2	Retracción de los morteros M0	47
5.3	RESULTADOS OBTENIDOS EN LOS MORTEROS CON ESCORIA DE SÍLICE	49
5.3.1	Resultados MS10	49
5.3.2	Resultados MS20	50
5.3.3	Resultados MS30	51
5.3.4	Resultados MS40	52
5.3.5	Comparativa de los resultados de compresión	53
5.3.6	Comparativa de los resultados a tracción	54
5.3.7	Resultados de la retracción	55
5.4	RESULTADOS OBTENIDOS EN LOS MORTEROS CON ESCORIA DE ALÚMINA	57
5.4.1	Resultados MA10	57
5.4.2	Resultados MA20	58
5.4.3	Resultados MA30	59
5.4.4	Resultados MA40	60
5.4.5	Resultados de la retracción	61
6	DESCRIPCIÓN DE TAREAS	63
6.1	TAREAS.....	64
6.2	CRONOGRAMA	65
7	DESCRIPCIÓN DE GASTOS.....	66
8	CONCLUSIONES.....	68
8.1	CONCLUSIONES: MORTEROS CON ESCORIA DE SÍLICE.....	69
8.2	CONCLUSIONES: MORTEROS CON ESCORIA DE ALÚMINA.....	70
9	AGRADECIMIENTOS	71
10	BIBLIOGRAFÍA	72

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Horno de arco eléctrico.....	8
Ilustración 2. Horno de cuchara	9
Ilustración 3, Acerías vascas en la CAV	11
Ilustración 4. Esquema de la producción de acero mediante arco eléctrico	13
Ilustración 5. Ciclo de la economía circular.....	14
Ilustración 6. Fabricación esquemático del mortero	18
Ilustración 7. Fabricación esquemático del hormigón.....	18
Ilustración 8. Aireante.....	20
Ilustración 9. Efecto del plastificante.....	21
Ilustración 10. Adiciones: colorante.....	22
Ilustración 11. Medición de la consistencia	23
Ilustración 12. Bancada de ensayos	25
Ilustración 13. Fisuración por retracción	25
Ilustración 14. Escoria blanca.....	27
Ilustración 15. Cemento Portland	30
Ilustración 16. Moldes.....	34
Ilustración 17. Amasadora	34
Ilustración 18. Amasada.....	36
Ilustración 19. Moldes con masa fresca.....	37
Ilustración 20. Ensayo de flexión antes de rotura.....	38
Ilustración 21. Ensayo de flexión después de rotura	38
Ilustración 22. Apoyos de las probetas	38
Ilustración 23. Fuerzas y momentos ejercidos en la probeta	39
Ilustración 24. Esquema de tensiones.....	40
Ilustración 25. Fórmula de tensión máxima.....	40
Ilustración 26. Ensayo de compresión antes de rotura.....	41
Ilustración 27. Ensayo de compresión después de rotura	41
Ilustración 28. Esquema y formula de compresión.....	42
Ilustración 29. Reloj comparador	42
Ilustración 30. Diagrama de Gantt	65

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Estados el mortero según su consistencia.....	24
Tabla 2. Composición de las escorias blancas H y G	33
Tabla 3. Resultados de las probetas sin escoria.....	46
Tabla 4. Resultados de las probetas MS10.....	49
Tabla 5. Resultados de las probetas MS20.....	50
Tabla 6. Resultados de las probetas MS30.....	51
Tabla 7. Resultados de las probetas MS40.....	52

Tabla 8. Resultados de las probetas MA10	57
Tabla 9. Resultados de las probetas MA20	58
Tabla 10. Resultados de las probetas MA30	59
Tabla 11. Resultados de las probetas MA40	60
Tabla 12. Horas internas	67
Tabla 13. Amortizaciones	67
Tabla 14. Gastos energeticos	67
Tabla 15. Resumen de presupuesto	67
Tabla 16. Gastos	67

INDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Producción mundial de acero	10
Gráfico 2. Curva granulométrica de la arena caliza	31
Gráfico 3. Retracción del mortero sin escoria en seco	47
Gráfico 4. Retracción del mortero sin escoria en mojado	48
Gráfico 5. Comparativa de los morteros MS y morteros sin escoria	53
Gráfico 6. Comparativa de los morteros MS y morteros sin escoria	54
Gráfico 7. Comparativa de la retracción de los morteros MS y morteros sin escoria en seco ...	55
Gráfico 8. Comparativa de la retracción de los morteros MS y morteros sin escoria en mojado	56
Gráfico 9. Comparativa de la retracción de los morteros MA y morteros sin escoria en seco...	61
Gráfico 10. Comparativa de la retracción de los morteros MA y morteros sin escoria en mojado	62

✓ **RESUMEN TRILINGÜE**

El objetivo principal de este trabajo es producir morteros estructurales de escoria de buena resistencia mecánica y trabajabilidad, a la vez que se reduce el consumo de cemento Portland, cuya producción es una fuente creciente de preocupación ambiental. En este contexto, el estudio analiza la preparación de estos morteros con escoria siderúrgica en sustitución parcial de agregados convencionales como el cemento Portland que incluye una proporción notable de cenizas volantes. Se realizan análisis estructurales y mecánicos en las mezclas también, las contracciones de las mezclas se miden y se evalúan. El comportamiento a largo plazo de estas mezclas de escoria parece aceptable, abriendo así una línea de trabajo prometedora que finalmente establecerá las condiciones adecuadas para su uso.

The main objective of this work is to produce structural slag mortars of good mechanical strength and workability, while reducing the consumption of Portland clinker, the production of which is a growing source of environmental concern. In this context, the study looks at the preparation of these mortars with steelmaking slag in partial substitution of conventional aggregates, like the use of Portland cement that includes a notable proportion of fly-ash. Structural and mechanical analyses are performed on the mixes, also, shrinkage contraction of the mixtures are measured and evaluated. The long-term behavior of these slag mixes appeared acceptable, thereby opening a promising line of work that will eventually establish suitable conditions for their use.

Lan honen helburu nagusia, siderurgiako eskoriak erabiliz erresistentzia oneko mortero estrukturalak produzitzea da. Horrekin batera Portland zementuaren erabilpena murriztea du helburu; honen erabilpenak ingurugiroan eragin kaltegarriak bait ditu. Kontextu honetan, gure ikasketak mortero hauen analisisa egingo du, hau da, Portland zementuaren ordez siderurgiako eskoriak erabiltzen dituen morteroena. Nahasteetan analisi mekaniko eta estrukturala egingo da eta baita uzkurketen neurketa eta ebaluaketa ere. Nahaste hauen epe luzeko portaera egokia dela ikusi dugu, hórrela, honen inguruko lan línea bat zabalduz. Lan línea honek ezarriko ditu mortero hauen erabileren baldintzak.

1 . INTRODUCCIÓN

1.1 INDUSTRIA SIDEROMETALÚRGICA

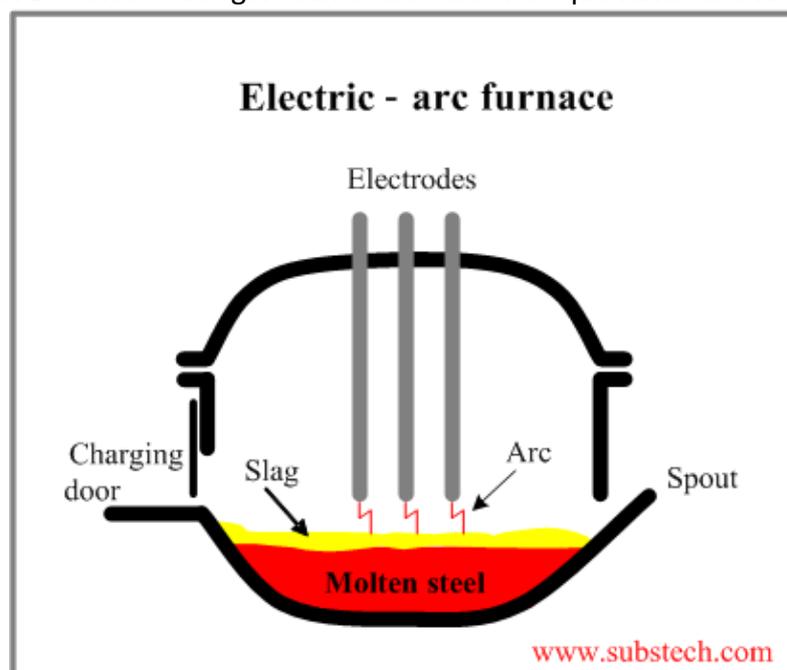
La industria siderometalúrgica es una de las industrias más importante del mundo con una producción que supera los 1,69 billones de toneladas. Esta industria se dedica a la producción y posterior manipulación de acero para obtener unos productos finales. Hoy en día dos son los procesos principales utilizados.

El mineral de hierro, el carbón y los fundentes para producir el acero son las materias primas en el primer proceso. Estos materiales se cargan en un alto horno y se someten a calor, alta presión e inyección de aire para completar la combustión, transformando los materiales de sólido a líquido y el óxido de hierro en hierro metálico. El arrabio caliente se obtiene de este proceso; este material tiene un contenido de hierro de aproximadamente 95% y un contenido de carbono de aproximadamente 4%. El arrabio debe ser transformado en el Horno de Oxígeno Básico para obtener acero. Se lleva a cabo un proceso de refinado en este horno para eliminar el exceso de carbono, fósforo y azufre. Luego, es necesario un ajuste final de la composición química del acero en una tercera etapa.

Por otro lado, tenemos el proceso de fabricación de acero eléctrico. En este proceso se utiliza acero reciclado que se funde a base de la energía liberada por los electrodos situados en el horno.

Al principio el arco eléctrico se utilizaba para la fabricación de aceros especiales. Sin embargo, hoy en día, este proceso permite producir casi todo tipo de aceros. Se diferencian dos etapas en este proceso.

La primera etapa es el proceso de fusión de acero que se lleva a cabo en un horno de arco eléctrico. Dos electrodos generan el arco eléctrico que funde la chatarra. Después,



se introduce oxígeno para purificar el acero y se añade la cal y flúor que se combinan con las impurezas, formando la escoria.

Una vez finalizado este proceso, el horno se inclina para fluir el acero en un cucharón, que también constituye un horno, después de que la escoria, que flota sobre la superficie, haya sido derramada.

La segunda etapa tiene lugar en el horno de cuchara: el proceso de refinado secundario o afino básico. Después del refinado ácido, el acero todavía contiene elementos dañinos que deben eliminarse. Se somete a un proceso de desoxidación, después del cual se produce la desulfuración, y luego se mueve a la cámara de vacío para eliminar los gases. Este proceso es posible debido a la formación en la superficie del acero fundido de una escoria básica con un alto contenido de cal y magnesio y un contenido inferior de sílice y alúmina. Finalmente, la composición química se ajusta para obtener el acero con las propiedades deseadas [1].

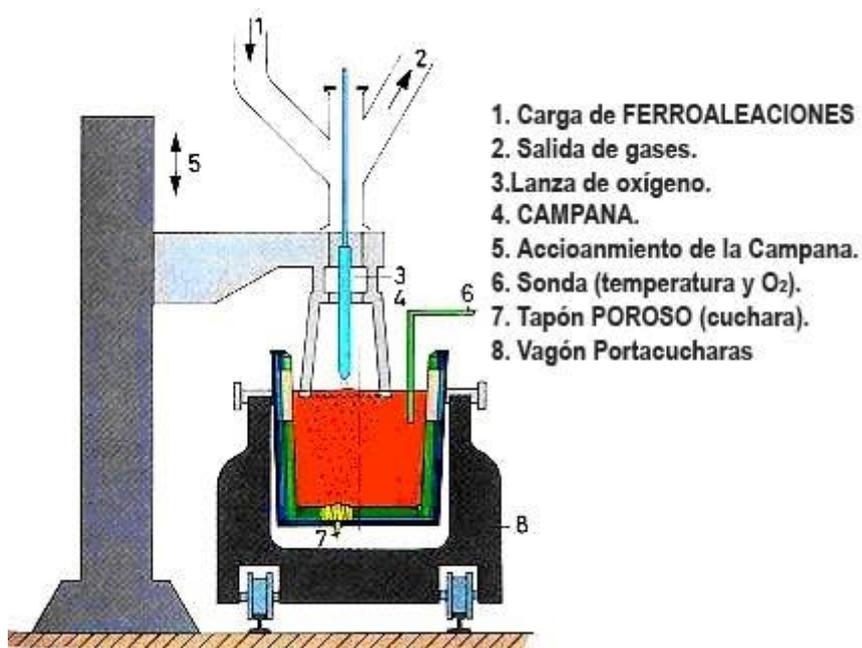


Ilustración 2. Horno de cuchara

1.2 PRODUCCIÓN MUNDIAL Y ESPAÑOLA DE ACERO

La producción mundial de acero se ha mantenido sin gran variación estos últimos cuatro años aunque años atrás haya tenido una evolución ascendente. Este aumento ha sido provocado por la industrialización de los países en crecimiento. En pocos años casi se ha duplicado la producción del acero y eso se debe mayormente a que Asia haya triplicado su producción. Aun así el mercado europeo no se ha recuperado por completo respecto a su producción de antes de la crisis. Esto se debe a que china invadió el mercado mundial del acero vendiéndolo a menor precio que los demás países; provocando un desplome generalizado de la cotización de estos materiales [2].

En el grafico de abajo se ve que ha habido un aumento de la producción de acero mundial a medida que pasan los años aunque, en ocasiones como el 2009 hubiera un descenso notorio. En los últimos años esta producción se haya mantenido mas o menos constante.

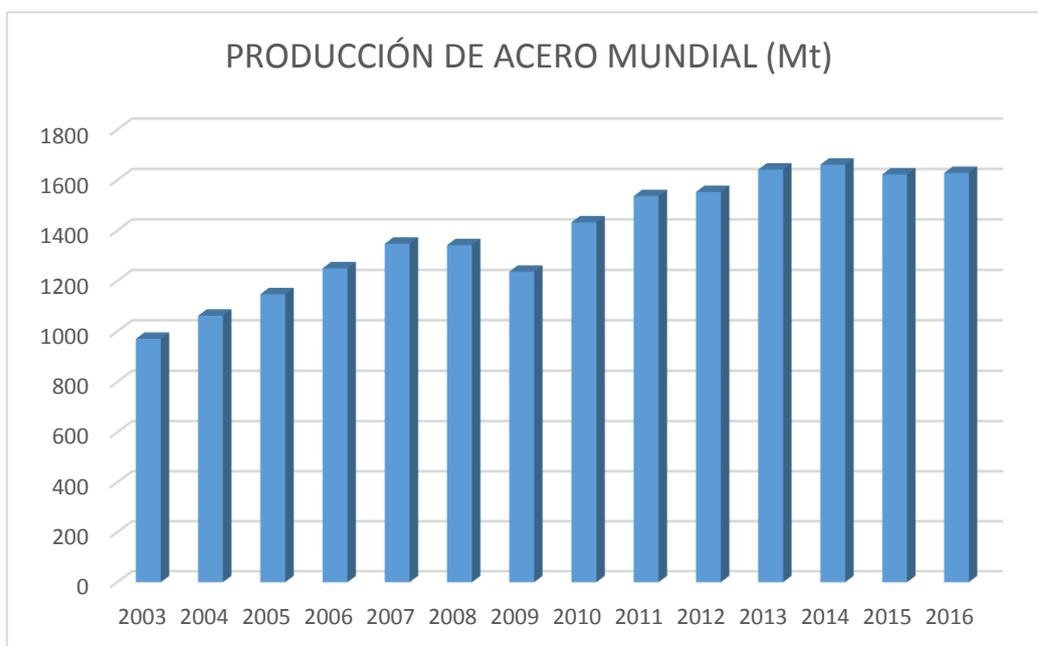


Gráfico 1. Producción mundial de acero

Aunque la crisis mundial del acero ha influido en la producción siderúrgica española, la siderurgia tiene un peso considerable en España que, en 2017 aumento la producción en 0,9 millones de toneladas respecto a 2016. Según los datos hechos públicos por la World Steel Association, la principal organización mundial del sector, la producción en el país en 2017 se situó en 14,5 millones de toneladas, un 6,2% mayor que los 13,6 del anterior [3].

En 2016 Euskadi produjo el 21% del acero español. Las empresas siderúrgicas vascas elaboraron unos 3 millones de toneladas de los 13,6 millones del conjunto del Estado.

Aunque no llegue a alcanzar la fuerza que tenía antes, la industria siderúrgica sigue siendo una de las industrias más potentes en Euskadi. Esta industria suministra materia prima para empresas de construcción, automoción, electrodomésticos, máquina-herramienta y otros sectores [6].

1.4 PRODUCCIÓN DE ACERO

El acero se obtiene de dos materias primas fundamentales:

- El arrabio, que se obtiene a partir de mineral de hierro en instalaciones con alto horno.
- De las chatarras: férricas e inoxidables.

Según qué materia prima utilicemos tendremos que escoger un tipo de fabricación u otro. Para fabricar acero a partir de arrabio se utiliza el convertidor con oxígeno, mientras que con la chatarra se utiliza el horno de arco eléctrico. Mirando desde un punto de vista ecológico el horno de arco eléctrico es más favorable dado que se puede utilizar chatarra como el 100% de la materia prima [7].

Hoy en día en el caso de España, apenas se fabrica mediante alto horno (Únicamente queda la fábrica de Asturias) y se ha apostado por la obtención de acero mediante horno eléctrico. En este proceso se utiliza la chatarra para obtener acero de buena calidad.

1.4.1 Fabricación de acero en horno eléctrico de arco

En la fabricación mediante horno eléctrico se utiliza la corriente eléctrica para fundir la chatarra. El horno consiste en un gran recipiente cilíndrico de chapa gruesa (15 a 30 mm de grosor) forrado de material refractario. El resto del horno está formado por paneles refrigerados por agua.

La bóveda se puede desplazar para poder meter la chatarra en su interior. Esta bóveda tiene unos orificios de los cuales se introducen los electrodos, que son gruesas barras de grafito de hasta 700mm de diámetro. Se puede regular la distancia de estos electrodos a medida que se van consumiendo. Estos electrodos están conectados a un transformador que les proporciona la tensión e intensidad adecuadas para crear el arco. Otro orificio en la bóveda se utiliza para evacuar los gases. Este horno puede oscilar para poder quitar la escoria que flota sobre el acero fundido y para poder vaciar el acero [8].

El proceso de fabricación se divide principalmente en dos fases:

- Fase de fusión: Se introduce la chatarra junto con los agentes reactivos y escorificantes (sobre todo cal). Se desplaza la bóveda para cerrar el horno y se desplazan los electrodos para crear el arco eléctrico que funde la chatarra. El proceso se repite hasta llenar el horno (será una colada).
- Fase de afino: Esta fase se lleva a cabo en dos etapas. La primera en el horno y la segunda en la cuchara. En el primer afino se eliminan las impurezas y se analiza la composición del acero fundido. También se realiza la primera inserciones de ferroaleaciones que contienen (cromo, níquel, molibdeno, vanadio o titanio). En el siguiente paso se vacía la colada en una cuchara, que hace la función de un segundo horno de afino en el que se termina de ajustar la composición del acero. También se le da la temperatura adecuada para la siguiente fase. En este tfg trabajaremos con las escorias que se generan en esta fase, denominadas escorias blancas o escorias de horno de cuchara.

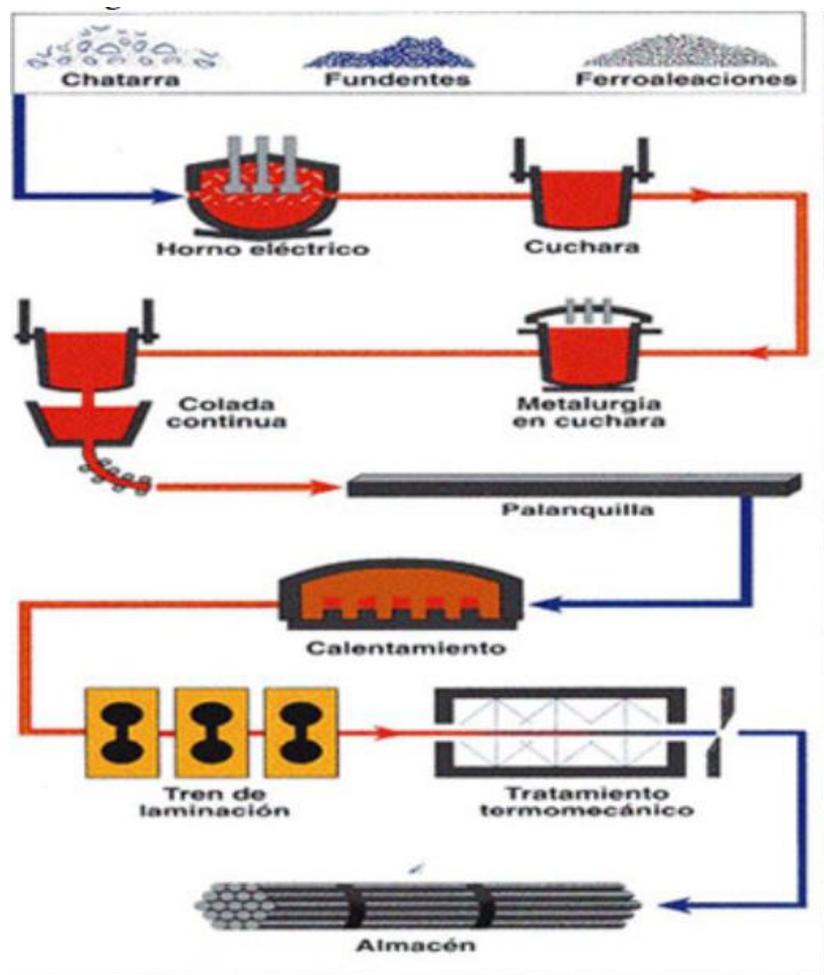


Ilustración 4. Esquema de la producción de acero mediante arco eléctrico

Una vez finalizado el afino la cuchara con la colada se lleva hasta un molde desplazable que tiene forma que sea precisa para luego poder utilizarlo en las plantas de fabricación.

1.5 ECONOMÍA CIRCULAR

Hoy en día el modelo económico más utilizado es el lineal; que se basa en “obtener materia prima, transformarlo, consumirlo y desecharlo”. Este proceso necesita grandes cantidades de energía y otros recursos baratos y de fácil acceso, pero está llegando al límite de su capacidad física. Para poder redirigir esta situación, distintas empresas han comenzado a explorar la economía circular que es una alternativa atractiva y viable [9].

Por definición, la economía circular es regenerativa y pretende que los productos mantengan su utilidad o valor en todo momento. Para ello, divide los componentes de los productos en dos grupos: biológicos y técnicos. Los productos biológicos se pueden introducir a la naturaleza una vez que ya no sirvan para el consumo u otros fines. Los productos técnicos son los componentes que normalmente no se pueden reintroducir en la naturaleza; por ello, son reutilizados una y otra vez sin entrar en la ella. Estos componentes se diseñan para poder ser ensamblados y desmontados para poder reutilizarlos adecuadamente y ahorrar energía [10].

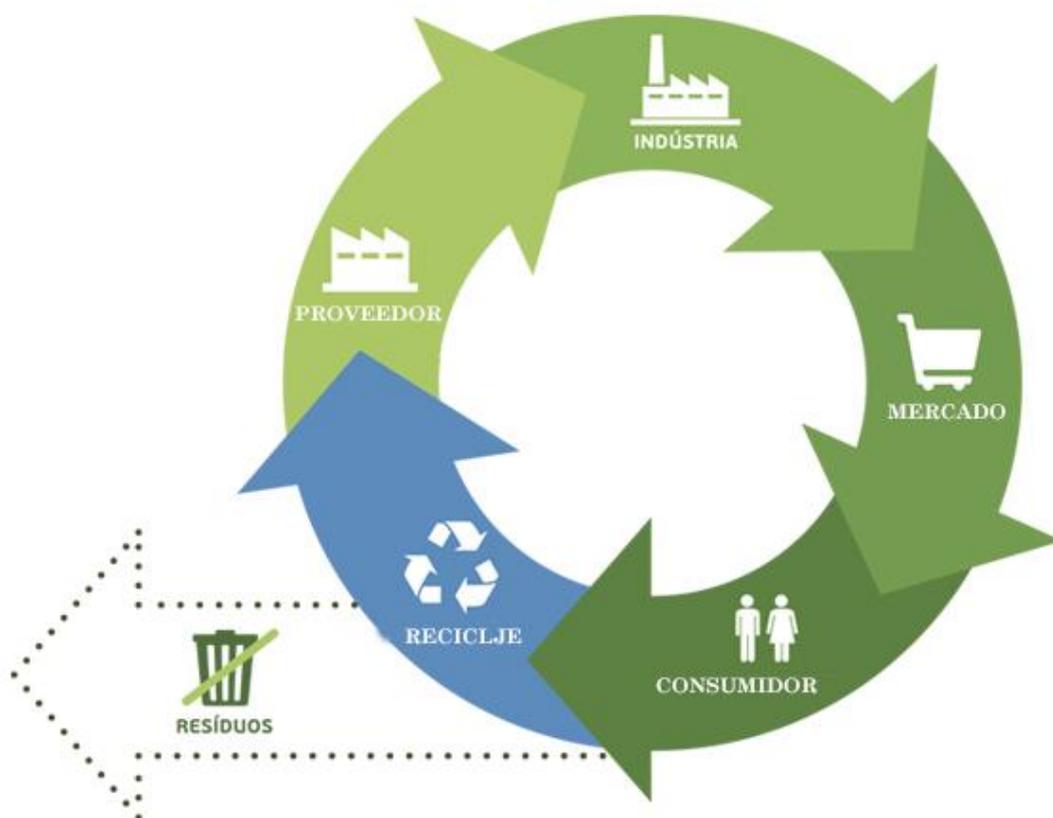


Ilustración 5. Ciclo de la economía circular

La economía circular se basa en los siguientes principios:

- Basura =Alimento: esto consiste en que desaparezca el concepto de basura. Los productos tanto biodegradables como los tóxicos pueden ser reutilizados en distintos modos.
- Diversidad: tener la capacidad de soportar una perturbación, manteniendo la estructura y el funcionamiento o ser capaces de recuperar la estructura y el funcionamiento tras una perturbación.
- Nuevo modelo de propiedad: el producto iría mejorando cada cierto tiempo utilizando las piezas del producto anterior; es decir, del producto que ha quedado obsoleto.
- La energía de fuentes renovables: sustituir las energías procedentes de los combustibles fósiles y nucleares a energías renovables como el sol, el viento, etc.
- Los precios verdaderos: los precios deben reflejar el coste real del producto para favorecer un consumo racional.

En el caso de la producción del acero, también se podría aplicar la economía circular. Hoy en día, por cada tonelada de acero que se produce se desechan 60-80 kg de escoria blanca. Pudiendo aprovechar este subproducto, la producción de acero sería sostenible dado que aprovecharíamos tanto la escoria creada como la chatarra de los productos de acero. Por lo tanto, sería muy conveniente implantar la economía circular en este sector.

En enero de 2012 la fundación de Ellen MacArthur encargó a la consultora McKinsey & Company un informe llamado hacia la economía circular. Este documento llega a la conclusión de que el sector de la producción podría ahorrar unos 650.000 millones de euros de aquí al 2025, rediseñando sus sistemas productivos mediante la economía circular.

También tenemos la filosofía de diseño “De la Cuna a la Cuna” que representa la aplicación de la economía circular al mundo de la producción industrial y del diseño. Esta obra escrita por William McDonough y Michael Braungart plantea la base de un diseño inteligente basado en el ciclo de la vida de los productos , tal y como ocurre en la naturaleza [11].

2 . OBJETO

Mediante este proyecto se pretende estudiar las propiedades mecánicas de los morteros estructurales. El estudio se hará tanto para el mortero en estado blando como para el endurecido. A diferencia del mortero convencional en este caso sustituiremos distintos porcentajes de escoria blanca de acerías por cemento portland y veremos que porcentajes son adecuados para obtener las propiedades requeridas. Se estudiarán todos los resultados y se obtendrán las prestaciones que nos ofrece cada caso. Se pretende ver hasta que punto el porcentaje de la escoria tienen resultados parecidos del mortero convencional (0% escoria).

Este trabajo esta enfocado a reutilizar residuos metalúrgicos y disminuir así el impacto que supone la extracción del cemento portland. Además, al reutilizar las escorias que en principio son “residuos” conseguimos un mortero mas barato.

Para poder lograr el objetivo principal, es necesario cumplir los objetivos parciales que vienen a continuación:

- Hacer probetas de distintas escorias y distintos porcentajes.
- Realizar ensayos de flexión de las probetas.
- Realizar ensayos a compresión de las probetas.
- Realizar ensayos de retracción de las probetas.
- Relacionar los resultados de las distintas probetas

3 . FUNDAMENTO TEÓRICO

3.1 EL MORTERO

El mortero es un material de construcción obtenido a partir de la mezcla de agua, aglomerante, árido (arena), aditivos y adiciones. Estos últimos sirven para conseguir distintas propiedades del mortero [12].



Ilustración 6. Fabricación esquemático del mortero

Una vez de hablar sobre el mortero también hay que mencionar el hormigón. La única diferencia entre ellas es que el mortero contiene árido fino, mientras que el hormigón utiliza árido fino más árido grueso o grava [13].



Ilustración 7. Fabricación esquemático del hormigón

3.1.1 COMPONENTES DEL MORTERO

3.1.1.1 Áridos

Los áridos que forman parte de morteros son materiales granulares inorgánicos de tamaño variable. Estos materiales son inertes ya que por sí solos no actúan químicamente frente a los componentes del cemento o frente a agentes externos (aire, agua, hielo, etc.). Sin embargo, sí influyen de forma determinante en las propiedades físicas del mortero, al unirse a un conglomerante. En general, no son aceptables áridos que contengan sulfuros oxidables, silicatos inestables o componentes de hierro igualmente inestables. Según su procedencia y método de obtención, los áridos pueden clasificarse en:

- **Áridos naturales.** Son los que se obtienen de los yacimientos mediante procedimientos mecánicos.
- **Áridos artificiales.** Son subproductos o residuos de procesos industriales. Son las escorias siderúrgicas, cenizas volantes de la combustión del carbón, etc.
- **Áridos reciclados.** Son los materiales inorgánicos que se han utilizado previamente en la construcción, por ejemplo, los procedentes del derribo de edificaciones, estructuras, etc.

Los áridos no toman parte activa en el fraguado y endurecimiento del mortero, pero, desempeñan un papel muy importante en las características de este material, porque conforman la mayor parte del volumen total del mortero. Por eso hay que conocer sus características tanto físicas como químicas [14].

3.1.1.2 Cemento

El cemento Portland es un conglomerante o cemento hidráulico que cuando se mezcla con áridos, agua y fibras de acero discontinuas y discretas tiene la propiedad de conformar una masa pétreo resistente y duradera denominada hormigón. Es el más usual en la construcción y es utilizado como conglomerante para la preparación del hormigón (llamado concreto en varias partes de Hispanoamérica). Como cemento hidráulico tiene la propiedad de fraguar y endurecer en presencia de agua, al reaccionar químicamente con ella para formar un material de buenas propiedades aglutinantes.

3.1.1.3 Agua

Se utilizan aguas de naturaleza inocua; es decir, agua que no contenga ningún agente que altere las propiedades del mortero; tales como: sulfatos, cloruros, etc. En el caso de

morteros armados, hay que tener cuidado especialmente que no contenga sustancias que produzcan la corrosión de los aceros.

En general, se pueden emplear todas aquellas aguas que se utilizan en la vida cotidiana. En otros casos es necesario proceder a su análisis.

3.1.1.4 Aditivos

Son sustancias o materiales añadidos que se utilizan en pequeñas cantidades con relación a la masa del cemento (su proporción no supera el 5%). Mediante estos aditivos se pretende obtener unas determinadas propiedades del mortero tanto en estado fresco como endurecido.

Estos componentes pueden producir una o varias modificaciones en las características del mortero. Los más comunes son los siguientes:

Aireantes

Son modificadores del contenido en aire del mortero. Se basa en introducir burbujas de aire, de entre 10 y 500 micras, durante el amasado. Estas burbujas son muy beneficiosas ya que:

- Actúan como lubricante del mortero en estado fresco, mejorando la docilidad (la facilidad con que una mezcla de áridos, cemento y agua se transforman en hormigón).
- Impide la penetración de agua y productos de la hidratación del cemento, protegiendo la masa del efecto de las heladas.
- Al incluir aire, disminuyen la densidad del mortero fresco, lo cual, unido a lo anterior, tiende a evitar la segregación del mortero en estado fresco.

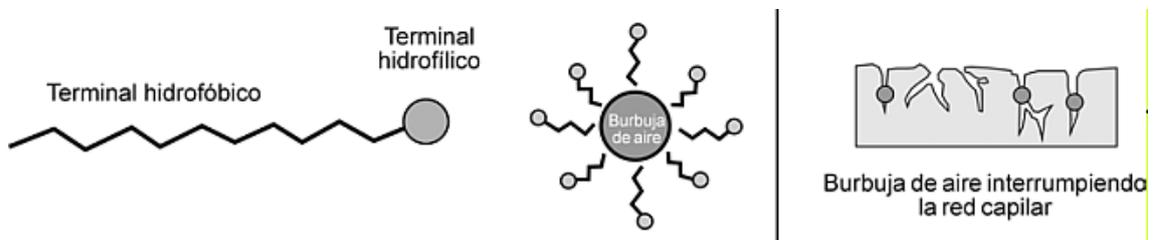


Ilustración 8. Aireante

Plastificante:

Esta sustancia provoca que aumente la docilidad del mortero en estado fresco. Se consigue mediante la dispersión temporal de las partículas de cemento, que origina:

- Reducción de la relación agua/cemento en beneficio de la resistencia mecánica y la durabilidad.
- Aumento de la plasticidad del mortero permaneciendo la mezcla trabajable durante un mayor período de tiempo.

Por el contrario, un inadecuado contenido de los plastificantes puede acarrear un excesivo tiempo de fraguado.

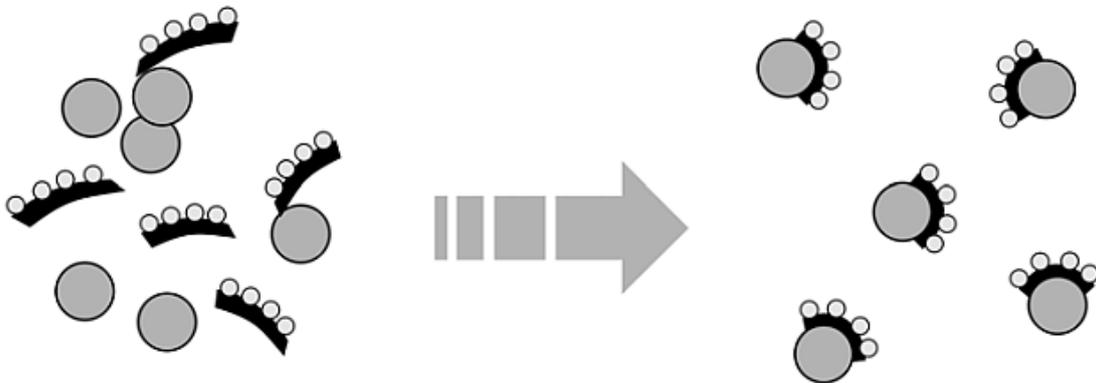


Ilustración 9. Efecto del plastificante

Retardantes:

Son aditivos que retrasan el tiempo de fraguado del cemento, de modo que aumenta el periodo necesario para que los morteros pasen del estado plástico al estado sólido. Así, prolongan el tiempo de trabajabilidad del mortero.

Resinas

Son ligantes orgánicos poliméricos que aportan principalmente adherencia química al mortero. Se utilizan para la fabricación de morteros cola, impermeables, de reparación, etc. Estos son los efectos destacables:

- Aumento de la capacidad adherente.
- Aumento de la elasticidad.

- Mejora de la impermeabilidad.

3.1.1.5 Adiciones

Las adiciones son materiales inorgánicos que se le añaden al mortero con el fin de mejorar sus propiedades o añadir propiedades especiales. Los siguientes son algunos de ellos: pigmentos, filleres minerales, puzolánicos, cenizas volantes, escorias, de sílice, etc.

Los colorantes son pigmentos, que se añaden al mortero en el momento de su fabricación con el fin de dar el color que se quiera para adquirir la estética que se quiera.



Ilustración 10. Adiciones: colorante

Los pigmentos empleados deben presentar gran estabilidad frente al paso del tiempo, variaciones térmicas y radiación solar.

Otro material muy utilizado son las cenizas volantes. Se suele incorporar directamente en la mezcla de mortero para modificar alguna de las características importantes. Su aplicación mejora: la trabajabilidad, la resistencia, la retracción de fraguado, el calor de hidratación, la impermeabilidad, la durabilidad y la reacción álcali-árido [14].

3.1.2 ESTADOS DEL MORTERO

Podemos distinguir dos estados físicos en el mortero: estado fresco y estado endurecido. La primera corresponde a la fase del mortero una vez mezclado y amasado. Su duración varía con el tiempo de fraguado que requiere la mezcla; la temperatura, humedad, etc. también influyen en la duración del estado fresco. En esta etapa el mortero es plástico y trabajable. Después de esta fase el mortero se endurece. Dicho esto, es importante saber diversas propiedades y exigencias en función del estado en que se encuentre el mortero [15].

3.1.2.1 Características del mortero fresco

❖ Consistencia

La consistencia de un mortero define la manejabilidad o trabajabilidad del mismo. La consistencia adecuada se consigue en obra mediante la adición de cierta cantidad de agua que varía en función de los materiales de la mezcla, las condiciones



Ilustración 11. Medición de la consistencia

ambientales, gusto de los operarios que lo utilizan, etc. La trabajabilidad mejora con la adición de cal, plastificantes o aireantes.

El valor viene medido por el escurrimiento (valor medio del diámetro en mm) de la probeta ensayada. En función de esta medida se distinguen tres tipos de consistencia:

Mortero Fresco	Consistencia (Ecurrimiento en mm)	Designación
Seco	< 140	S
Plástico	140 a 200	P
Fluido	> 200	F

Tabla 1. Estados el mortero según su consistencia

La trabajabilidad se logra con morteros de consistencia plástica, que permiten a la pasta conglomerante bañar la superficie del árido. En los otros casos se forman morteros excesivamente secos no trabajables; o bien, muy fluidos con tendencia a la segregación.

❖ **Tiempo de utilización o de trabajabilidad**

Es el tiempo durante el cual un mortero posee la suficiente trabajabilidad para ser utilizado sin adición posterior de agua con el fin de contrarrestar los efectos de endurecimiento por el principio del fraguado.. Responde al tiempo en minutos a partir del cual un mortero alcanza un límite definido de resistencia a ser penetrado con una sonda, referenciada en la citada norma.

❖ **Densidad**

La densidad del mortero está directamente relacionada con la de sus materiales componentes, así como con su contenido en aire.

Los morteros ligeros son más trabajables a largo plazo. Se clasifican como morteros ligeros aquellos cuya densidad es igual o menor que 1.300 kg/m^3

❖ **Capacidad de retención de agua**

De esta propiedad depende la trabajabilidad del mortero fresco. La retención de agua está relacionada con la superficie específica de las partículas de árido fino, así como con conglomerante y, en general, con la viscosidad de la pasta. La retención de agua influye en el grado de hidratación del conglomerante, lo que determinará el ritmo de endurecimiento del mortero.

3.1.2.2 Características del mortero endurecido

Desde su colocación existen factores que tienden a destruir el mortero. La durabilidad es la resistencia del mortero al ataque de un conjunto de agentes, tanto propios de la ejecución, como de su vida, que alteran sus condiciones físicas con el tiempo. De estas exigencias nace el estudio de las propiedades del mortero en estado endurecido.

❖ Resistencia mecánica

El mortero en la mayor parte de sus aplicaciones debe actuar como elemento de unión resistente compartiendo las sollicitaciones del sistema constructivo del que forma parte. El mortero utilizado en juntas debe soportar inicialmente las sucesivas hiladas de ladrillos o bloques. Las resistencias a compresión y flexión del mortero se obtienen con los resultados del ensayo de probetas prismáticas de 40x40x160 mm de 28 días de edad, conservadas en laboratorio según condiciones normalizadas **UNE-EN 1015-11**. Los morteros se designan según su resistencia a compresión a esta edad, medida en N/mm² anteponiéndoles la **letra M**.



Ilustración 12. Bancada de ensayos

❖ Retracción

La retracción es una contracción que experimenta el mortero por disminución de volumen durante el proceso de fraguado y principio de endurecimiento. Dicha retracción es provocada por la pérdida de agua sobrante tras la hidratación del mortero. Se ha demostrado que las retracciones son más elevadas cuanto más cemento y elementos finos tienen los morteros. También se ha observado

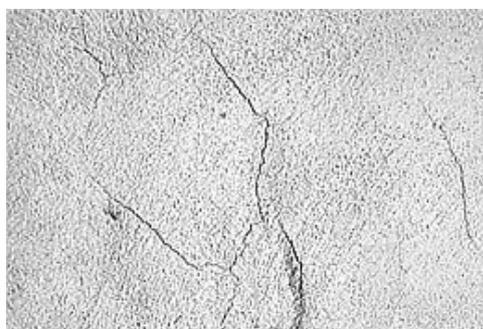


Ilustración 13. Fisuración por retracción

que la retracción aumenta cuando mayor es la cantidad de agua de amasado.

❖ **Densidad (estado endurecido)**

La densidad del mortero dependerá fundamentalmente de la que tengan sus componentes: arenas, adiciones, etc. También es determinante la granulometría y volumen que éstos ocupen. Además, incide en la densidad la relación agua/cemento del mortero. A medida que aumenta dicha relación más poroso es el mortero. Se considera que un mortero es ligero cuando su densidad es igual o menor que 1.300 kg/m³ [15].

3.2 ESCORIAS

Las escorias son un subproducto obtenidos en un proceso de fabricación del acero. Se puede decir que son una mezcla de óxidos metálicos; aunque, a veces contienen sulfuros de metal y átomos de metal en forma de elemento.

En la naturaleza, los minerales de metales como el hierro, el cobre, el aluminio y otros metales se encuentran en estados impuros, a menudo oxidados y mezclados con silicatos de otros metales.

Durante la fundición estas impurezas se separan del metal fundido y se pueden retirar. El compuesto que se retira es la escoria.

Se producen distintos tipos de escoria según la fundición. Por una parte, tenemos la fundición no ferrosa como el cobre y el plomo, que se diseña para eliminar el hierro y la sílice que contienen estos minerales y se separa como escoria basada en silicato de hierro. Por otra parte, tenemos la escoria que se genera en la fundición ferrosa, en el que se pretende minimizar la pérdida de hierro. Esta escoria ferrosa contiene principalmente calcio, magnesio y aluminio.

Hoy en día se produce una gran cantidad de escorias alrededor de todo el mundo. Por lo tanto, es necesario llevar a cabo investigaciones de este subproducto y utilizarlo como alternativa en otros sectores para reducir volúmenes excesivos de residuos. Al hacerlo, habría menos extracción de los recursos naturales que son necesarios en esas aplicaciones, que de otra manera podrían ser sustituidas por escorias [16].

3.2.1 TIPOS DE ESCORIA

Centrándonos en las escorias férreas podemos enumerar varios tipos de escorias:

- - Escoria de horno alto (BF slag en la terminología anglosajona)
- - Escoria de convertidor al oxígeno (BOF slag)
- - Escoria de horno eléctrico de arco (EAF slag)
- - Escoria de horno cuchara (LF slag)
- - Escoria de convertidor AOD, VOD
- - Escoria de cubilote

Actualmente hay grupos de investigación para cada tipo de escoria que pretenden reutilizar estas escorias. Sin duda, el sector de la construcción y la edificación emplean la mayor parte de estos subproductos.

Entre los tipos de escoria antes mencionados el BFS y CFS tienen la calidad más alta dado que después de refrigerarlos y pulidos demuestran buenas características hidráulicas y durabilidad excelente. En el caso de las EAFS y LFS es menos satisfactorio; aunque, en este trabajo estudiaremos su aplicación exitosa en el mortero. El tipo de escoria más problemático se obtiene del horno LD (BOFS), cuya expansión volumétrica no es nada satisfactoria.

En general, el uso de estas escorias (EAFS y LFS) cuando se aplican como áridos en mezclas hidráulicas ha sido relativamente exitoso; la observación de la hidráulica es escasa y requiere alta finura de partícula. En el caso de las EAFS se le da poca importancia



Ilustración 14. Escoria blanca

al factor hidráulico dado que en su estado natural es grava. Sin embargo, una ligera hidráulica puede ser analizada en el LFS, que se presenta en forma de polvo.

El comportamiento a largo plazo de las mezclas obtenidas con estas escorias parece aceptable, que ha abierto una prometedora línea de fabricación y rendimiento de mezclas de morteros de investigación que establecerá las condiciones adecuadas para su uso.

Este trabajo analiza las características de varios morteros estructurales en los que estas escorias(LFS) se utilizan como sustitución de clinker y evalúa la ligera hidráulica potencial del LFS. El objetivo principal es obtener una buena resistencia mecánica y una adecuada trabajabilidad, con el fin de minimizar el uso del clinker Portland.

La densidad del mortero y su durabilidad son los factores más importantes que se deben tener en cuenta. La contracción volumétrica es una característica también relevante de estos morteros, cuyo estudio es necesario para obtener mezclas estructurales de alta calidad que contengan escorias siderúrgicas [17].

3.2.2 UTILIDAD DE LA ESCORIA BLANCA

Como ya hemos mencionado antes, este trabajo se centra en investigar las propiedades del mortero en el cual sustituimos un porcentaje “x” de Clinker por escoria blanca. Esta escoria es el subproducto que se crea en la segunda fase de afino en el horno de cuchara. La densidad de esta escoria es menor que la del hierro fundido; así, queda flotando en la cuchara. La función de la escoria durante la fabricación del acero es la siguiente:

- La ausencia de contaminación del caldo por los gases de la atmosfera, puesto que, la escoria protege al líquido férreo.
- Aísla el caldo térmicamente evitando el gradiente térmico en él.
- Propicia reacciones químicas que mejoran las características del metal.

Existen actualmente dos métodos de saturación de la escoria, y por ende dos tipos de escoria blanca. Estas escorias son las que se han utilizado en este trabajo:

- Escoria blanca saturada en sílice
- Escoria blanca saturada en alúmina

En el primer método, la adición de sílice o alúmina durante la etapa de desulfuración forma silicatos de calcio o aluminatos de calcio. En el otro método, se saturan las escorias blancas mediante alumina, este método es más novedoso en España.

También hay que decir que las escorias blancas tienen una elevada proporción de finos. Cuanto más fina es la escoria, mejores propiedades cementicas adquiere. Por el contrario, el elevado porcentaje de finos dificulta su manipulación y la hace inadecuada como árido. La superficie específica de estas escorias se encuentra entre 2,664 y 3,091 cm²/g valores cercanos al del cemento Portland que varía entre 3 y 4 cm²/g [18].

4 METODOLOGÍA

4.1 MATERIAS PRIMAS EMPLEADAS

A continuación se realiza una descripción de las materias primas empleadas para la producción de los morteros.

Los materiales utilizados a lo largo de la investigación que ha formado la base para el desarrollo de este trabajo fin de grado son de uso estándar en la fabricación de mezclas hidráulicas.

Se han utilizado el agua del suministro urbano de la ciudad de Bilbao y diferentes tipos de cemento y piedra caliza triturada de diferentes tamaños de partículas. Las cantidades, tamaños y otras propiedades de estos materiales se incluirán en los siguientes capítulos.

Lo novedoso de esta investigación es el uso de la escoria de horno de cuchara en la fabricación de mezclas de morteros. A continuación se citan los materiales empleados.

4.1.1 Cemento

Se ha empleado un cemento común, CEM I, que contiene más del 95% de Clinker de Portland. Es el producto artificial que se obtiene calcinando hasta el punto de fusión mezclas de Caliza y Arcilla, obteniéndose un cuerpo llamado clínquer, constituido por silicatos y aluminatos anhidros, el cual hay que pulverizar junto con el Yeso, en proporción menor al 3%, para retrasar su fraguado.



Ilustración 15. Cemento Portland

4.1.2 Agua

Se ha utilizado agua de la red de suministros de agua potable de Bilbao.

4.1.3 Árido natural

Este árido que hemos utilizado es árido calizo procedente de la cantera Markomin_Goikoa, que está situado en Mañaria.

El árido calizo empleado está compuesto por un material de grano fino y color marrón claro, de alta cohesión, alta compacidad y con una densidad media de $2,67\text{g/cm}^3$.

En la siguiente imagen se puede apreciar la curva granulométrica del árido:

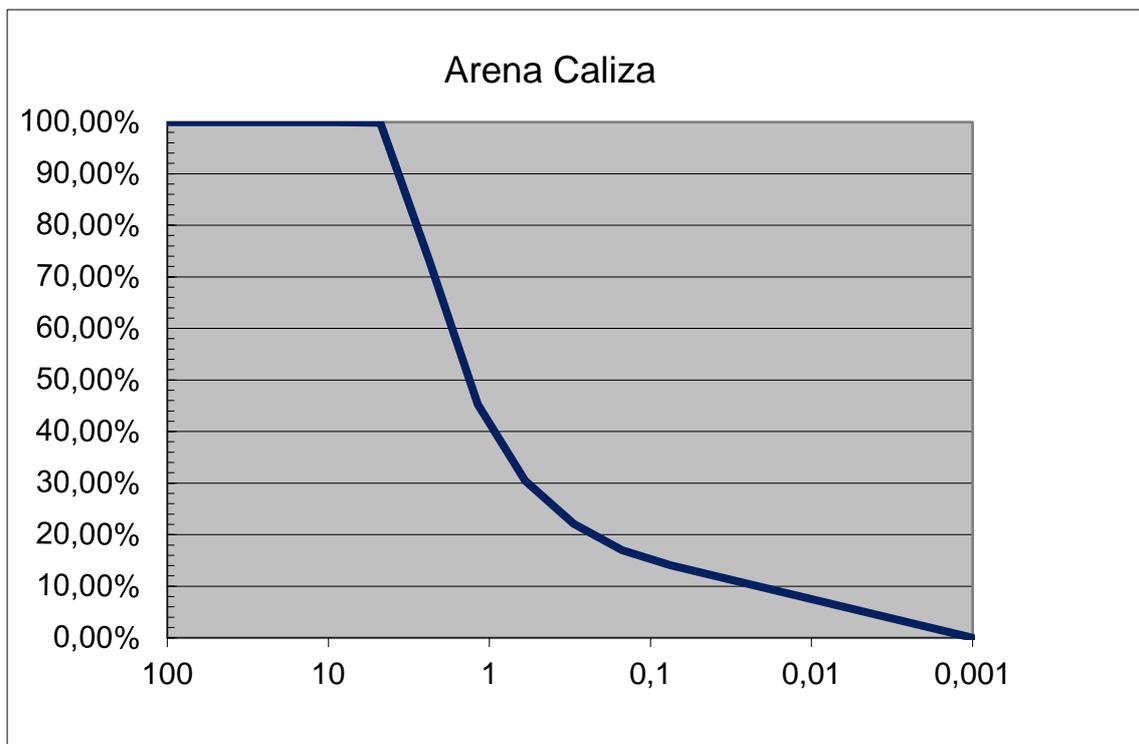


Gráfico 2. Curva granulométrica de la arena caliza

4.1.4 Escoria blanca

La escoria blanca se ha adquirido a través de la factoría Tubos Reunidos, S.A. en Amurrio (Araba). Son escorias obtenidas a partir de procesos metalúrgicos en horno cuchara (LF, Ladle Furnace).

En primer lugar presentaremos el tipo más habitual: escorias saturadas en sílice. Como hemos mencionado antes, la escoria se queda flotando en la cuchara. Después, se saca de la cuchara y se deja enfriar. Durante este proceso de enfriamiento, la LFS es inicialmente una masa sólida que se rompe en piezas de, aproximadamente, una pulgada. Posteriormente, la transformación del $\beta\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$ a $\gamma\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$ a una temperatura cercana a los 500°C produce la pulverización de la masa un enfriamiento rápido de la escoria, logra un material prácticamente amorfo, estable volumétricamente, quebradizo y poroso, con una densidad menor ($2,76\text{ g/cm}^3$ frente a $3,03\text{ g/cm}^3$) y una superficie mayor ($0,81\text{ m}^2/\text{g}$ frente a $0,75\text{ m}^2/\text{g}$) después del enfriamiento. Finalmente, la escoria blanca se transforma en polvo.

En el análisis granulométrico prevalecen partículas de tamaños entre 50 y $60\mu\text{m}$, sobre otras más pequeñas de entre 3 y $10\mu\text{m}$; siendo las partículas más elementales menores a $2,5\mu\text{m}$.

El otro tipo de escoria que vamos a emplear es una escoria saturada en alúmina ($22,59\%$). Las propiedades y morfologías descritas anteriormente sirven tanto para escorias con contenidos en alúmina bajos (o, al menos, no muy elevados) como las escorias de altos contenidos en SiO_2 .

Sin embargo, las escorias blancas saturadas en alúmina no sufren un proceso de meteorización tan severo como las anteriores (saturadas en sílice) debido a su menor proporción de SiO_2 y, en consecuencia, $\beta\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$. Por lo tanto se genera una escoria con una morfología diferente, que ahora aparece, compuesta por tres tamaños diferentes: grava, arena y polvo

La forma de estas partículas varía desde redondeadas hasta angulares. Se observan partículas laminares y gruesas. En cuanto al tacto, poseen diferentes asperezas y multitud de esquinas en las partículas angulares y voluminosas. La mayor parte de las partículas laminares tienen formas irregulares con baja esfericidad y puntiagudas. Finalmente se tritura para poder emplearlos en los morteros [19].

En la siguiente tabla aparecen las distintas composiciones de escorias blancas saturadas en sílice (tipo H) y en alúmina (tipo G):

COMPONENTES	TIPOS DE ESCORIA (Porcentajes en masa)	
	H	G
CaO	59,2 %	50,7 %
SiO ₂	21,3 %	10 %
Al ₂ O ₃	8,27 %	23,3 %
MgO	7,92 %	13,6 %
Fe ₂ O ₃	1 %	0,53 %
TiO ₂	0,17 %	0,1 %
MnO	0,26 %	0,15 %
C	0,13 %	0,2 %
S	1,39 %	0,2 %
Otros	0,36 %	1,22 %

Tabla 2. Composición de las escorias blancas H y G

4.1.5 Aditivos

Plastificante: El objetivo del superplastificante Glenium es reducir el agua de amasado. Ha sido suministrado por BASF.

4.2 PROCEDIMIENTOS

En este apartado nos centraremos en el procedimiento empleado para fabricar las probetas de mortero. Además, citaremos las pruebas que haremos para poder saber distintas propiedades mecánicas que tiene cada pieza a medida que pasan los días.

4.2.1 Aparatos utilizados

En primer lugar, mencionaremos los aparatos necesarios para poder hacer una amasada de mortero; son las siguientes:

- Tres recipientes: uno para cada material molido (cemento, arena y escoria) que vamos a utilizar.
- Un peso para poder controlar las cantidades que queremos mezclar. En este caso la mezcla tendrá la siguiente relación en peso: 1 de gual / 2 de escoria + cemento / 6 de árido.
- Una pipeta para poder controlar la cantidad de plastificante que tenemos que echar. Se calcula multiplicando la suma de escoria y cemento por 0,0125; es decir, se calcula el 1,25% de la cantidad de escoria + cemento (en gramos). Como la densidad de este plastificante es aproximadamente de 1,08 kg/L; debemos dividir este valor al resultado obtenido en el cálculo anterior, para poder sacar el volumen que debemos mezclar.
- El recipiente que meteremos en la amasadora de mortero.
- La amasadora de mortero.
- Los moldes para hacer las probetas.

También podemos mencionar como elementos secundarios que hay que utilizar los siguientes: guantes, bata, mascarilla, cuchara (para trasladar el material a los recipientes).



Ilustración 17. Amasadora



Ilustración 16. Moldes

4.2.2 Procedimiento de amasada

Una vez mencionados los materiales que vamos a utilizar, explicaremos el procedimiento llevado a cabo para hacer la amasada. Antes de empezar con este procedimiento tenemos que poner los guantes, la bata y la mascarilla. Una vez hecho esto empezaremos con el procedimiento que es el siguiente:

1. PESAJE DE MATERIALES

Introducimos los materiales que vamos a utilizar en sus respectivos recipientes, hasta conseguir el peso que queremos de cada material. En nuestro caso para saber cuáles son estas medidas, calculamos el volumen que tenemos que llenar para hacer las probetas. Tenemos dos tipos de probetas:

- Cuatro probetas de retracción que miden 25mm x 25mm x 285mm que serán probetas que vamos a utilizar para ver la retracción que sufrirá el mortero durante un tiempo determinado. Para hacer estas probetas tenemos dos moldes; cada cual sirve para moldear dos probetas.
- Doce probetas de 40mm x 40 mm x 160mm que utilizaremos para hacer obtener las resistencia a compresión y tracción (el ensayo será de flexión pero para calcular la tracción). En este caso tenemos cuatro moldes; en cada cual moldearemos tres probetas.

Sabiendo estos datos podemos calcular el volumen total que debemos calcular por cada tipo de probeta:

$$\begin{aligned} & - (25\text{mm} \times 25\text{mm} \times 285\text{mm}) \times 4 + (40\text{mm} \times 40\text{mm} \times 160\text{mm}) \times 12 = 3784500 \text{ mm}^3 \\ & = 3784,5 \text{ cm}^3 = \underline{3,7845 \text{ L}} \end{aligned}$$

En el cálculo anterior vemos que el volumen que tenemos que cubrir es de 3,78 litros aproximadamente. Como el recipiente de mezcla no tiene esa capacidad tenemos que hacer la amasada en tres turnos. En los dos primeros turnos mezclaremos los materiales para obtener 1,65L. En el siguiente turno, obtendremos 1,35L. Vemos que amasaremos material de sobra para no tener ningún problema. Aquí se menciona el material utilizado para cada turno:

- Para 1,65L :
 - 423,9 g de agua
 - 847,8 g de escoria + cemento
 - 2543 g de árido
 - 10,6 g plastificante (1,25% de escoria + cemento)
- Para 1,35L:
 - 346,8 g de agua
 - 693,6 g de escoria + cemento
 - 2080,8 g de árido
 - 8,67 g de plastificante (1,25% de escoria + cemento)

2. AMASAR EL MORTERO

Una vez de pesar los materiales procedemos a amasar. Para ello seguiremos los siguientes pasos:

- ❖ Primero meteremos el agua en el recipiente de amasado.
- ❖ Luego mezclamos la escoria y el cemento.
- ❖ Mezclamos cemento + escoria con el agua + plastificante y lo introducimos en la amasadora.
- ❖ Amasamos durante 30 segundos a velocidad lenta (seria 140 +- 5 r.p.m de rotación y 62 r.p.m de translación).
- ❖ Durante los siguientes 30 segundos introducimos el árido a la mezcla mediante un embudo que está situado en la parte superior de la amasadora. En este periodo también la amasadora está en marcha y utilizaremos la velocidad lenta.
- ❖ Los siguientes 30 segundos amasaremos a velocidad rápida (seria 285 +- 10 r.p.m de rotación y 125 r.p.m de translación).
- ❖ Después detenemos el amasado y dejamos reposar la mezcla durante 1 minuto y 30 segundos. Durante los primeros 15 segundos, rascamos y devolvemos al fondo los posibles fragmentos de mezcla que hayan quedado adheridos a las paredes del recipiente.
- ❖ Al final amasamos rápido durante un minuto.



Ilustración 18. Amasada

3. MINI CONO DE ASENTAMIENTO

Antes de introducir el mortero en los moldes debemos hacer una prueba. Esta prueba es similar al cono Abrams utilizado para medir la consistencia del hormigón, pero usando un cono con dimensiones más pequeñas. La prueba consiste en colocar el cono en la mesa y rellenarlo con mortero. El cono se levanta inmediatamente después de que se completa el llenado y el mortero se extiende sobre la mesa. Después, se dan 10 golpes a la mesa a 30 cm-s, aproximadamente, del mortero. Al final se mide el diámetro del mortero.

4. INTRODUCIR EN MOLDES

Una vez hecha la medición procederemos a introducir el mortero en los moldes. Antes de hacer esto, tenemos untar los moldes con desmoldante para que al desmoldar las probetas, el mortero no se peguen a las esquinas, facilitando su extracción y la limpieza del molde. Después hacemos lo siguiente:

- a. Llenamos hasta la mitad los moldes con el mortero.
- b. Levantamos ligeramente un extremo del molde y lo dejamos caer. Lo hacemos 20 veces por cada lado.
- c. Llenamos los moldes por completo y repetimos el punto b (lo que se cita en este puntos es para equivaler la vibración que se le suele hacer al hormigón).
- d. Por ultimo quitamos el sobrante que queda por encima en los moldes con una regla metálica y ponemos los moldes en las baldas para que se cure el mortero.



Ilustración 19. Moldes con masa fresca

4.2.3 Curado de probetas

Para el curado de las probetas hemos seguido la norma ASTM 109, apartado 8.5. Después de preparar las probetas, se dejan los moldes 24 horas en un ambiente húmedo. Pasado este tiempo, se desmoldean, se numeran, se pesan y se sumergen en un tanque de agua para que continúe el proceso de curado. En el caso de las probetas de retracción los medimos y dejamos dos de las probetas fuera y dos en el agua para que se curen y ver la diferencia.

4.2.4 Ensayo de flexión

Los ensayos a flexión se han realizado de acuerdo con lo establecido en la norma estadounidense ASTM C 348, cuyo procedimiento está enfocado a poder reutilizar las probetas ensayadas a flexión, después, en el ensayo a compresión ASTM C 309.

Para accionar el dispositivo se ha empleado una prensa electromecánica MEM-101/30A-SDC (Sistemas de Ensayo, S.L.), controlada a través de un ordenador.

Antes de realizar el presente ensayo, cada probeta se ha extraído del tanque de agua, se ha secado y se ha pesado.



Ilustración 20. Ensayo de flexión antes de rotura



Ilustración 21. Ensayo de flexión después de rotura

A continuación, se explica el fundamento teórico con el que se ha calculado la tensión a tracción que soporta el mortero. La tracción calcularemos a partir del ensayo de flexión. Este ensayo consiste en apoyar la probeta en dos apoyos simples (separados 10 cm-s entre sí), uno fijo y el otro deslizante; teniendo un sistema isostático.

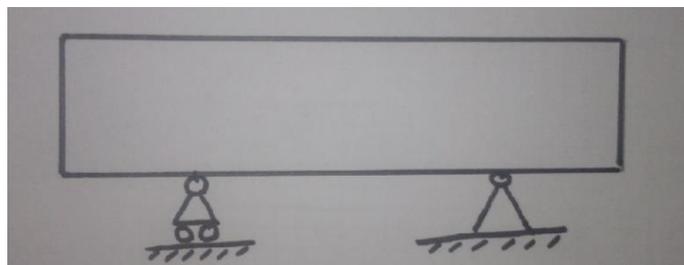


Ilustración 22. Apoyos de las probetas

Después, le ejercemos una fuerza F en el punto medio hasta que la probeta se rompa. Las fuerzas se descomponen $F/2$ en cada apoyo como aparece en la imagen de arriba. Si idealizamos los momentos M_z que soporta la probeta obtenemos una forma lineal desde cada apoyo al centro de la probeta siendo el momento máximo que se ejerce en la mitad. Viendo esto, el punto más crítico estará en esa sección y haremos el estudio en él.

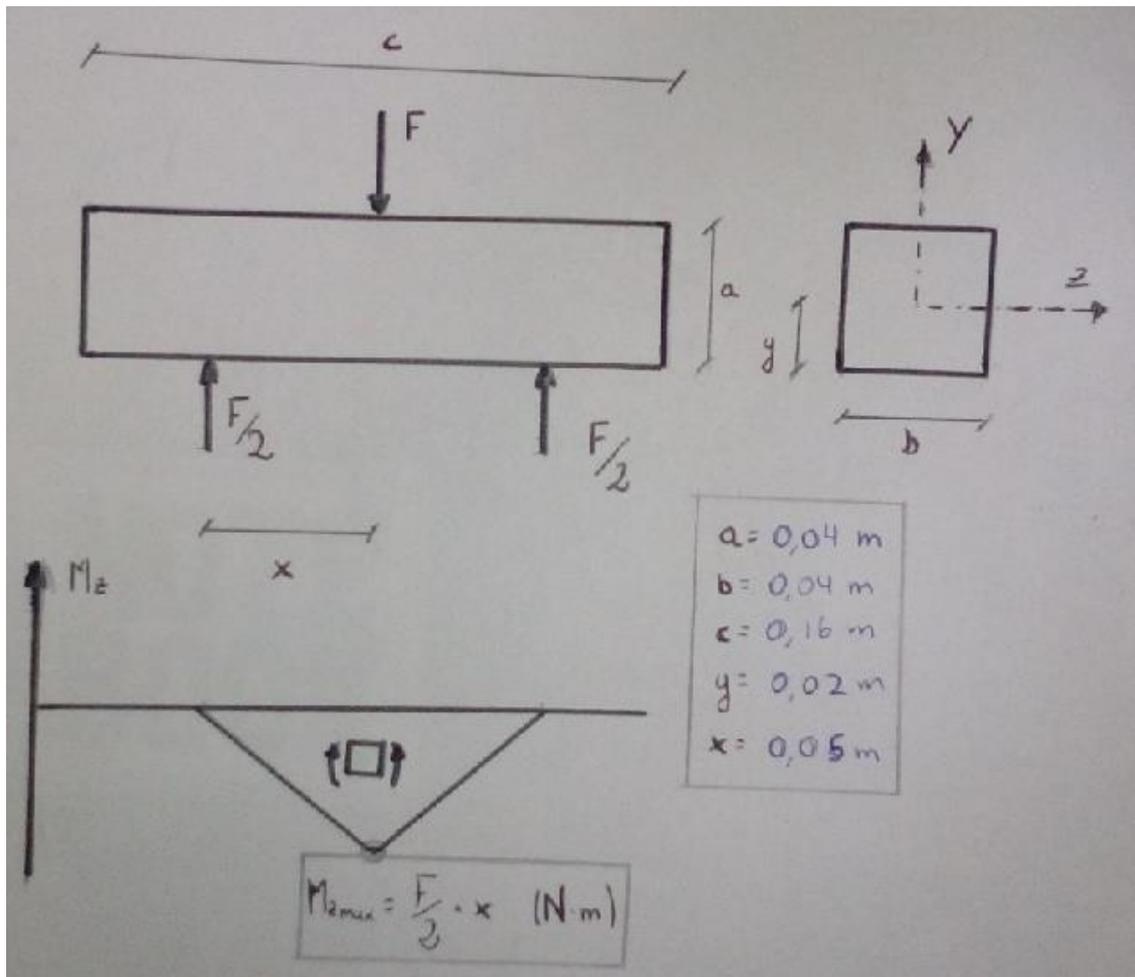


Ilustración 23. Fuerzas y momentos ejercidos en la probeta

Vemos en la imagen superior que en la sección "S" tenemos el punto crítico. En esa sección en la mitad de la altura de la probeta tenemos el plano neutro en el que la tensión es nula. Si subimos para arriba tenemos la tensión a compresión y si bajamos

para abajo del punto neutro tenemos la tensión a tracción. En este caso el mortero soportará mucho más a compresión que a tracción, entonces, se romperá por la parte de debajo de la probeta porque en ese punto tenemos la tracción máxima. Para obtener la tensión máxima a tracción utilizaremos la fórmula que viene en la foto de abajo en el

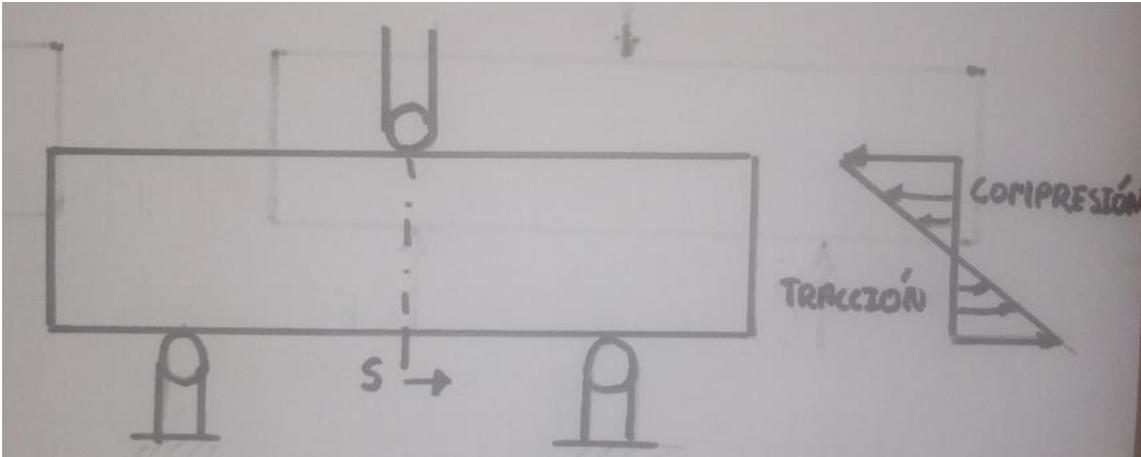


Ilustración 24. Esquema de tensiones

que la tensión máxima es la multiplicación del momento en esa sección "Mz" y la distancia del punto neutro a la periferia de la probeta "y" entre la inercia de la sección.

Antes de realizar el presente ensayo, cada probeta se ha extraído del tanque de agua, se ha secado y se ha pesado.

$$\sigma_{xx_{max}} = \frac{M_z \cdot y}{I_z} = \frac{F/2 \cdot x \cdot y}{\frac{b a^3}{12}} = \frac{6 \cdot F \cdot x \cdot \frac{b}{2}}{b \cdot a^3} = \frac{3 \cdot F \cdot x}{a^3} = \sigma_{xx_{max}} \text{ (Pa)}$$

Ilustración 25. Fórmula de tensión máxima

4.2.5 Ensayo a compresión

Los ensayos a compresión se han realizado de acuerdo con lo establecido en la norma estadounidense ASTM C 349, cuyo procedimiento está enfocado a poder reutilizar las probetas ensayadas a flexión mediante el ensayo a flexión ASTM C 309 para el presente ensayo a compresión. Para ello se ha empleado un dispositivo de compresión para morteros C-1700 (Sistemas de Ensayo, S. L.).

Al igual que en el ensayo a flexión, para accionar el dispositivo se ha empleado una prensa electromecánica MEM-101/30A-SDC (Sistemas de Ensayo, S. L.), controlada a través de un ordenador.



Ilustración 26. Ensayo de compresión antes de rotura



Ilustración 27. Ensayo de compresión después de rotura

Después de hacer el ensayo de flexión, procedemos a hacer el de compresión. En este caso por cada probeta tenemos dos mitades puesto que lo hemos partido en el ensayo de flexión. Para hacer este ensayo utilizaremos la bancada para ejercer una fuerza F en una superficie “ $a \times b$ ”. Para calcular la tensión dividiremos la fuerza máxima ejercida antes de romperse la probeta con la superficie en la que se ejerce la fuerza. En la imagen de abajo aparece el esquema y la formula.

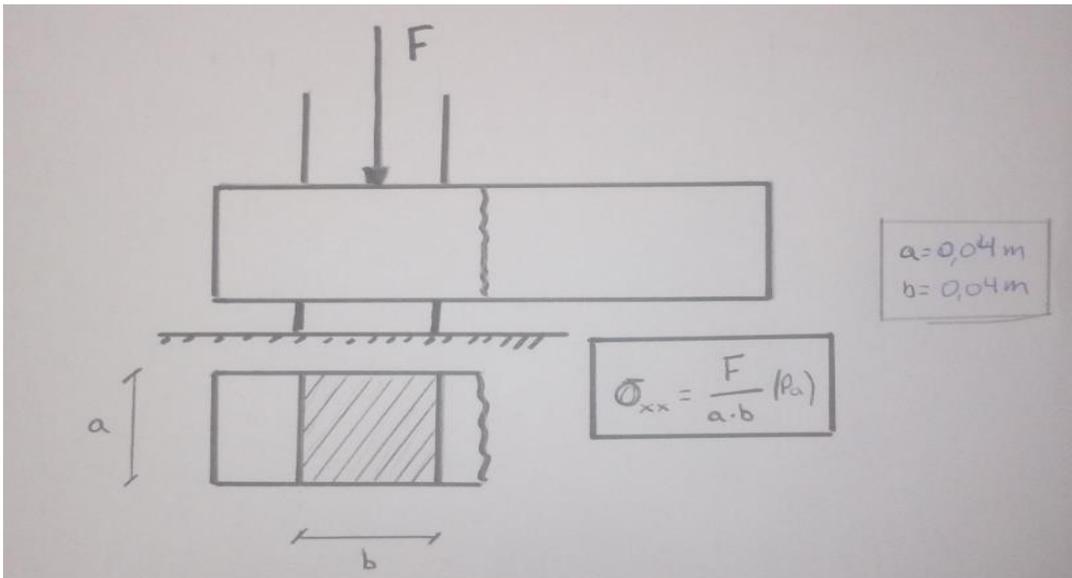


Ilustración 28. Esquema y fórmula de compresión

4.2.6 Medida de retracción

La medida de la retracción de las probetas se ha realizado de acuerdo con lo establecido en la norma estadounidense ASTM C 157.

Para realizar la medición de la longitud de las distintas probetas se ha empleado un medidor de longitud suministrado por la empresa Sistemas de Ensayo, S. L. que es un reloj comparador.



Ilustración 29. Reloj comparador

5 RESULTADOS

5.1 ANALISIS GENERAL

Antes de empezar a analizar los resultados obtenidos; vamos a hacer un análisis general de lo que se ha hecho para poder llevar a cabo este análisis.

Para empezar, citaremos los tres tipos de morteros que hemos fabricado para ver su comportamiento. Por un lado, se han fabricado doce probetas (40mmx40mmx160mm) por cada mortero que contenga alguna variable respecto a los demás. Estos doce morteros se utilizarán para hacer los ensayos de flexión y compresión. Se han utilizado tres probetas por cada periodo de tiempo desde moldear los morteros, que son: 8 días, 28 días y 90 días. Los tipos de mortero que hemos fabricado son los siguientes:

- Mortero sin escoria: en este caso el mortero no lleva escoria. Esto se hace para hacer una comparativa con los otros morteros que llevaran escorias. La nomenclatura que vamos a utilizar será la siguiente:
 - M0-1, M0-2, ..., M0-12.
- Mortero con escoria blanca saturada en sílice: utilizaremos distintos porcentajes (10%,20%,30%,40%) de escorias (sustituyendo el portland) en las probetas. Haremos doce probetas por cada porcentaje de escoria. La nomenclatura utilizada en este caso será la siguiente:
 - Para el 10% de escoria saturada en sílice: MS10-1, MS10-2, ..., MS10-12.
 - Para el 20% de escoria saturada en sílice: MS20-1, MS20-2, ..., MS20-12.
 - Para el 30% de escoria saturada en sílice: MS30-1, MS30-2, ..., MS30-12.
 - Para el 40% de escoria saturada en sílice: MS40-1, MS40-2, ..., MS40-12.
- Mortero con escoria blanca saturada en alúmina: el análisis que haremos en este caso será igual que el acaso anterior. La nomenclatura utilizada será la siguiente:
 - El 10% de escoria saturada en alúmina: MA10-1, MA10-2, ..., MA10-12.
 - El 20% de escoria saturada en alúmina: MA20-1, MA20-2, ..., MA20-12.
 - El 30% de escoria saturada en alúmina: MA30-1, MA30-2, ..., MA30-12.
 - El 40% de escoria saturada en alúmina: MA40-1, MA40-2, ..., MA40-12.

Por otro lado, también hemos fabricado cuatro probetas (25mmx25mmx285mm) por cada tipo de mortero diferente; para poder calcular la retracción que sufren mientras pasan los días. En este caso por cada cuatro probetas vamos a dejar dos en el agua y los otros dos fuera para poder analizar su comportamiento. Respecto a la nomenclatura vamos a utilizar la siguiente:

- Mortero sin escoria: MR0-1, MR0-2, MR0-3, MR0-4.
- Mortero con escoria saturada en sílice: MRS10-1, MRS10-2, MRS10-3, MRS10-4 este seria para el caso de 10%. Para los otros casos cambiamos el 10 por cada porcentaje (20%, 30%, 40%).
- Mortero con escoria saturada en alúmina: MRA10-1, MRA10-2, MRA10-3, MRA10-4 este seria para el caso de 10%. Para los otros casos cambiamos el 10% por cada porcentaje (20%, 30%, 40%).

5.2 RESULTADOS OBTENIDOS EN LOS MORTEROS SIN ESCORIA

En la primera tabla aparecen los resultados obtenidos mediante el ensayo de flexión y compresión para el caso general de 0% de escoria. Estos resultados utilizaremos para hacer la comparativa de las otras mediciones. Así, podremos saber si las proporciones (de escorias) son adecuadas para el uso en la obra civil, construcción, etc.

Como se puede observar en las tablas de abajo, en la primera columna aparecen las fuerzas de compresión obtenidas. En la siguiente columna aparecen las tensiones ejercidas a compresión y en las siguientes dos columnas las medias a compresión de cada probeta y la media total; sucesivamente. La compresión se ha calculado mediante la fórmula del apartado "4.2.5". En las siguientes tres columnas aparecen los resultados del ensayo de flexión. Hay que matizar que para obtener los resultados de tracción se han utilizado fórmulas de resistencia de materiales, para así poder calcular la tracción máxima que va a soportar la probeta antes de fallar en su función. Esta tracción, se ha calculado mediante los resultados obtenidos del ensayo de flexión como se puede observar en el apartado "4,2,4".

5.2.1 Resultados M0

			F(compresion kN)	δ (tension a compresion MPa)	MEDIA DE CADA PROBETA	MEDIA TOTAL	F(flexion kN)	δ (tension a traccion MPa)	MEDIA DE TRACCION
M0	DIA 7	M0-1	72,19 kN	45,12 MPa	46,50 MPa	50,98 MPa	4,30 kN	10,08 MPa	9,33 MPa
			76,62 kN	47,89 MPa					
		M0-2	86,71 kN	54,19 MPa	54,88 MPa		3,57 kN	8,37 MPa	
			88,89 kN	55,56 MPa					
		M0-3	79,35 kN	49,59 MPa	51,58 MPa		4,07 kN	9,54 MPa	
			85,69 kN	53,56 MPa					
	DIA 28	M0-4	115,85 kN	72,41 MPa	71,71 MPa	71,04 MPa	4,93 kN	11,55 MPa	11,07 MPa
			113,63 kN	71,02 MPa					
		M0-5	108,82 kN	68,01 MPa	68,28 MPa		5,02 kN	11,77 MPa	
			109,67 kN	68,54 MPa					
		M0-6	119,12 kN	74,45 MPa	73,12 MPa		4,22 kN	9,89 MPa	
			114,87 kN	71,79 MPa					
	DIA 90	M0-7	114,22 kN	71,39 MPa	74,48 MPa	71,93 MPa	5,35 kN	12,54 MPa	13,08 MPa
			124,11 kN	77,57 MPa					
		M0-8	110,05 kN	68,78 MPa	67,15 MPa		5,85 kN	13,71 MPa	
104,83 kN			65,52 MPa						
M0-9		115,90 kN	72,44 MPa	74,16 MPa	5,54 kN		12,98 MPa		
		121,42 kN	75,89 MPa						

Tabla 3. Resultados de las probetas sin escoria

Una vez llegados a este punto, Observamos, como era de esperar, que cuantos más días pasen más resistentes son las probetas; tanto a compresión como a tracción. En el caso de la tracción observamos un aumento de resistencia bastante progresiva. Sin embargo, en el caso de la compresión, aunque desde el día 7 al día 28 hay una diferencia notable, del día 28 al día 90 apenas hay diferencia. Eso se debe a que el mortero ya está prácticamente en sus mejores condiciones de resistencia a partir de los 28 días. También vemos que las resistencias que soporta este mortero son muy elevadas puesto que el séptimo día ya soporta mas de 50 MPa a compresión y a los 28 días 71 MPa aproximadamente. Viendo los resultados vemos que este mortero es un Mortero de Alta Resistencia (MAR) puesto que soporta más de 50 MPa a los 28 días.

5.2.2 Retracción de los morteros M0

5.2.2.1 Retracción de las probetas en seco

Estas probetas son las que se curan fuera del agua.

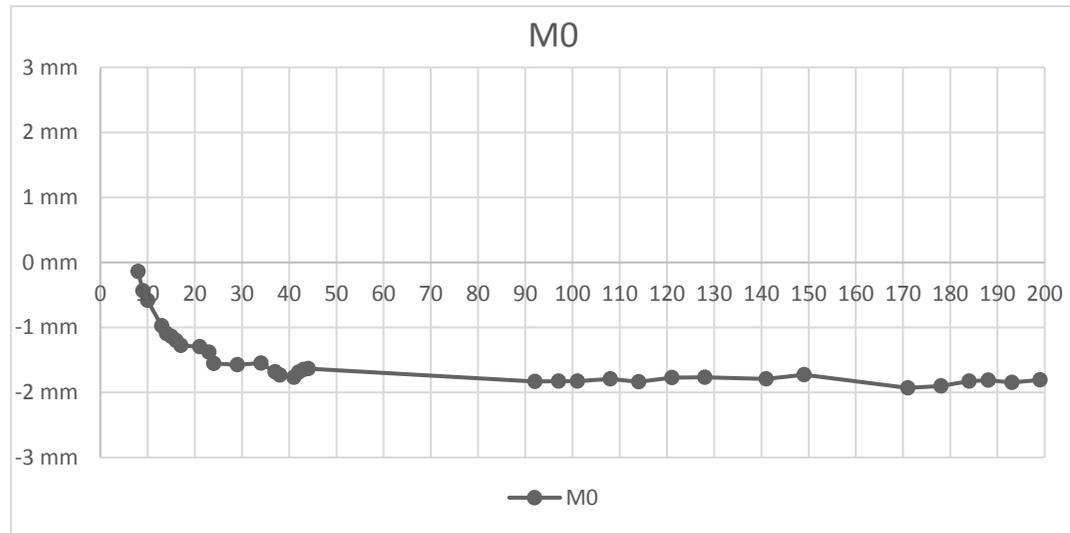


Gráfico 3. Retracción del mortero sin escoria en seco

Como podemos observar en el gráfico de arriba la retracción que sufren las probetas es exponencial. Los primeros 40 días aproximadamente las probetas llegan a su longitud final. A partir de entonces su longitud se mantiene mas o menos constante. Podemos ver que por cada metro de la probeta la retracción no llega a los 2mm.

5.2.2.2 Retracción de las probetas en mojado.

Estas son las probetas que se curan bajo el agua.



Gráfico 4. Retracción del mortero sin escoria en mojado

Como podemos observar en la tabla de arriba, la retracción de las probetas que se han curado bajo el agua es prácticamente nula. De hecho, podemos decir que en este caso se han dilatado las probetas un poco. Con estos resultados vemos que es muy importante mantener el mortero mojado mientras se cura para que no se contraiga y así no se produzcan fisuras.

5.3 RESULTADOS OBTENIDOS EN LOS MORTEROS CON ESCORIA DE SÍLICE

5.3.1 Resultados MS10

			F(compresion kN)	δ (tension a compresion MPa)	MEDIA DE CADA PROBETA	MEDIA TOTAL	F(flexion kN)	δ (tension a traccion MPa)	MEDIA DE TRACCION
MS10	DIA 7	MS10-1	89,39 kN	55,87 MPa	53,08 MPa	53,75 MPa	4,78 kN	11,20 MPa	9,88 MPa
			80,47 kN	50,29 MPa					
		MS10-2	86,99 kN	54,37 MPa	54,36 MPa				
			86,96 kN	54,35 MPa					
		MS10-3	86,29 kN	53,93 MPa	53,81 MPa				
			85,90 kN	53,69 MPa					
	DIA 28	MS10-4	107,71 kN	67,32 MPa	65,16 MPa	63,73 MPa	4,78 kN	11,20 MPa	
			100,79 kN	62,99 MPa					
		MS10-5	109,13 kN	68,21 MPa	66,21 MPa				
			102,75 kN	64,22 MPa					
		MS10-6	91,01 kN	56,88 MPa	59,82 MPa				
			100,41 kN	62,76 MPa					
	DIA 90	MS10-7	113,21 kN	70,76 MPa	65,52 MPa	65,95 MPa	4,98 kN	11,67 MPa	
			96,44 kN	60,28 MPa					
		MS10-8	110,28 kN	68,93 MPa	70,02 MPa				
113,77 kN			71,11 MPa						
MS10-9		105,77 kN	66,11 MPa	62,32 MPa					
		93,64 kN	58,53 MPa						

Tabla 4. Resultados de las probetas MS10

Al comparar los resultados de estas probetas (10% escoria) con las anteriores (0% escoria) observamos lo siguiente:

- En el caso de las resistencias del séptimo día, vemos que no hay mucha diferencia entre las dos.
- En las probetas del día 28 y 90 ya se ve que la resistencia a compresión disminuye en el caso de las probetas de 10 % de escoria.
- La resistencia a tracción disminuye solo en el caso de 90 días.
- Aun así las resistencias obtenidas en este caso no se alejan mucho de las obtenidas con las probetas de muestra. Viendo esto, podemos decir que esta mezcla puede ser utilizada en todos los casos en las que se utiliza el mortero de 0% de escoria; puesto que, su comportamiento será muy parecido. Esta mezcla también es un MAR.

5.3.2 Resultados MS20

			F(compresion kN)	δ (tension a compresion MPa)	MEDIA DE CADA PROBETA	MEDIA TOTAL	F(flexion kN)	δ (tension a traccion MPa)	MEDIA DE TRACCION
MS20	DIA 7	MS20-1	79,22 kN	49,51 MPa	50,28 MPa	47,99 MPa	3,91 kN	9,16 MPa	8,82 MPa
			81,67 kN	51,04 MPa					
		MS20-2	65,04 kN	40,65 MPa	44,85 MPa				
			78,47 kN	49,04 MPa					
		MS20-3	75,71 kN	47,32 MPa	48,85 MPa				
			80,61 kN	50,38 MPa					
	DIA 28	MS20-4	90,67 kN	56,67 MPa	57,56 MPa	55,53 MPa	5,26 kN	12,33 MPa	11,21 MPa
			93,51 kN	58,44 MPa					
		MS20-5	92,08 kN	57,55 MPa	55,73 MPa				
			86,25 kN	53,91 MPa					
		MS20-6	85,11 kN	53,19 MPa	53,32 MPa				
			85,50 kN	53,44 MPa					
DIA 90	MS20-7	92,65 kN	57,91 MPa	58,62 MPa	60,72 MPa	4,79 kN	11,23 MPa	10,17 MPa	
		94,92 kN	59,33 MPa						
	MS20-8	99,69 kN	62,31 MPa	61,92 MPa					
		98,46 kN	61,54 MPa						
	MS20-9	99,12 kN	61,95 MPa	61,61 MPa					
		98,04 kN	61,28 MPa						
						3,99 kN	9,35 MPa		

Tabla 5. Resultados de las probetas MS20

Este caso es muy similar al anterior, dado que, las diferencias de resistencias a tracción son mínimas en los primeros 28 días y luego al de 90 días disminuyen la resistencia frente al caso sin escoria. Se puede observar que la resistencia a compresión es menor que en los dos casos anteriores. Vemos que la resistencia final (90 días) disminuye en un orden de 5 MPa aproximadamente por cada 10% de escoria que le añadamos a la mezcla.

Si comparamos estas resistencias a compresión con las de las probetas de prueba, ya se nota la diferencia de resistencia que tienen. Aun así esta mezcla también tiene muy buena resistencia superando los 50 MPa de resistencia a compresión a los 28 días, siendo un MAR.

5.3.3 Resultados MS30

			F(compresion kN)	δ (tension a compresion MPa)	MEDIA DE CADA PROBETA	MEDIA TOTAL	F(flexion kN)	δ (tension a traccion MPa)	MEDIA DE TRACCION
MS30	DIA 7	MS30-1	67,46 kN	42,16 MPa	42,29 MPa	39,08 MPa	4,02 kN	9,42 MPa	8,84 MPa
			67,86 kN	42,41 MPa					
		MS30-2	66,11 kN	41,32 MPa	40,68 MPa				
			64,05 kN	40,03 MPa					
		MS30-3	41,02 kN	25,64 MPa	34,28 MPa				
			68,67 kN	42,92 MPa					
	DIA 28	MS30-4	80,99 kN	50,62 MPa	50,10 MPa	45,86 MPa	4,05 kN	9,49 MPa	10,30 MPa
			79,34 kN	49,59 MPa					
		MS30-5	70,45 kN	44,03 MPa	43,86 MPa				
			69,90 kN	43,69 MPa					
		MS30-6	66,15 kN	41,34 MPa	43,61 MPa				
			73,41 kN	45,88 MPa					
DIA 90	MS30-7	86,03 kN	53,77 MPa	55,33 MPa	53,38 MPa	5,21 kN	12,21 MPa	11,08 MPa	
		91,03 kN	56,89 MPa						
	MS30-8	85,44 kN	53,40 MPa	51,24 MPa					
		78,54 kN	49,09 MPa						
	MS30-9	95,45 kN	59,66 MPa	53,57 MPa					
		75,97 kN	47,48 MPa						

Tabla 6. Resultados de las probetas MS30

En este caso podemos observar que tampoco hay gran diferencia en las resistencias a tracción comparados con las anteriores probetas. Pero sí que podemos observar que baja considerablemente la resistencia a compresión. Y como normalmente la función principal de los morteros es a compresión; esta diferencia de 19 MPa de resistencia, comparándolo con el mortero de 0% de escoria, es significativa. Aun así, la resistencia al de 28 días casi llega a los 50 MPa y a los 90 días supera esa cifra. Entonces podemos considerar que este mortero también es de buena calidad.

5.3.4 Resultados MS40

			F(compresion kN)	δ (tension a compresion MPa)	MEDIA DE CADA PROBETA	MEDIA TOTAL	F(flexion kN)	δ (tension a traccion MPa)	MEDIA DE TRACCION
MS40	DIA 7	MS40-1	50,69 kN	31,68 MPa	31,88 MPa	34,01 MPa	3,42 kN	8,02 MPa	7,20 MPa
			51,32 kN	32,08 MPa					
		MS40-2	57,03 kN	35,64 MPa	33,98 MPa				
			51,72 kN	32,33 MPa					
		MS40-3	56,28 kN	35,18 MPa	36,18 MPa				
			59,50 kN	37,19 MPa					
	DIA 28	MS40-4	66,28 kN	41,43 MPa	39,77 MPa	37,03 MPa	3,79 kN	8,88 MPa	8,22 MPa
			60,98 kN	38,11 MPa					
		MS40-5	62,50 kN	39,06 MPa	38,65 MPa				
			61,18 kN	38,24 MPa					
		MS40-6	52,13 kN	32,58 MPa	32,67 MPa				
			52,42 kN	32,76 MPa					
DIA 90	MS40-7	63,01 kN	39,38 MPa	38,68 MPa	39,10 MPa	4,31 kN	10,10 MPa	10,13 MPa	
		60,76 kN	37,98 MPa						
	MS40-8	70,31 kN	43,94 MPa	44,48 MPa					
		72,04 kN	45,03 MPa						
	MS40-9	53,97 kN	33,73 MPa	34,13 MPa					
		55,24 kN	34,53 MPa						

Tabla 7. Resultados de las probetas MS40

En este último caso sí que podemos ver que las resistencias tanto a tracción como a compresión son menores que en los casos anteriores. Centrándonos en las resistencias a compresión podemos observar que son bastante bajas comparando con el primer caso (0% escoria). También observamos que no supera los 40 MPa ni a los 28 días ni a los 90. En este caso tendríamos que ver si estas resistencias son suficientes para fabricar lo que queramos o tenemos que utilizar otros que resistan más. Aun así las resistencias de este mortero son bastante buenas.

5.3.5 Comparativa de los resultados de compresión

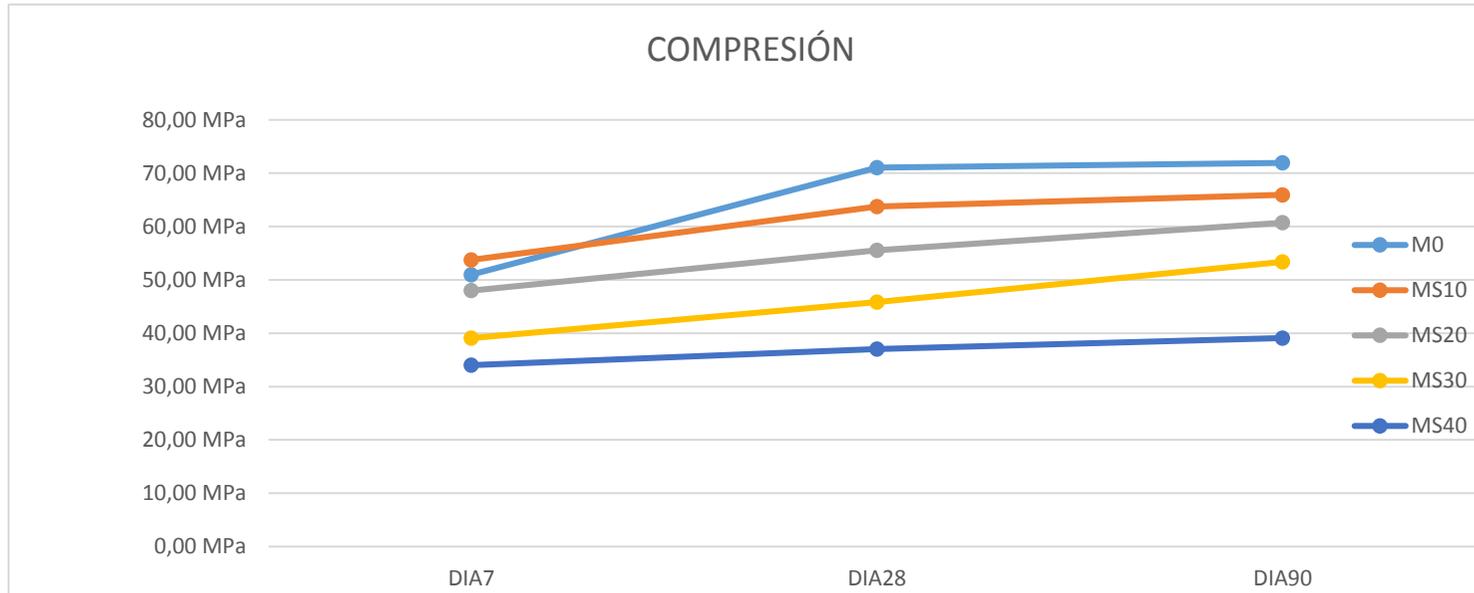


Gráfico 5. Comparativa de los morteros MS y morteros sin escoria

En el gráfico de arriba podemos ver la diferencia de las distintas probetas. Se puede ver que a medida que las probetas tienen más porcentaje de escoria su resistencia a compresión es menor.

5.3.6 Comparativa de los resultados a tracción

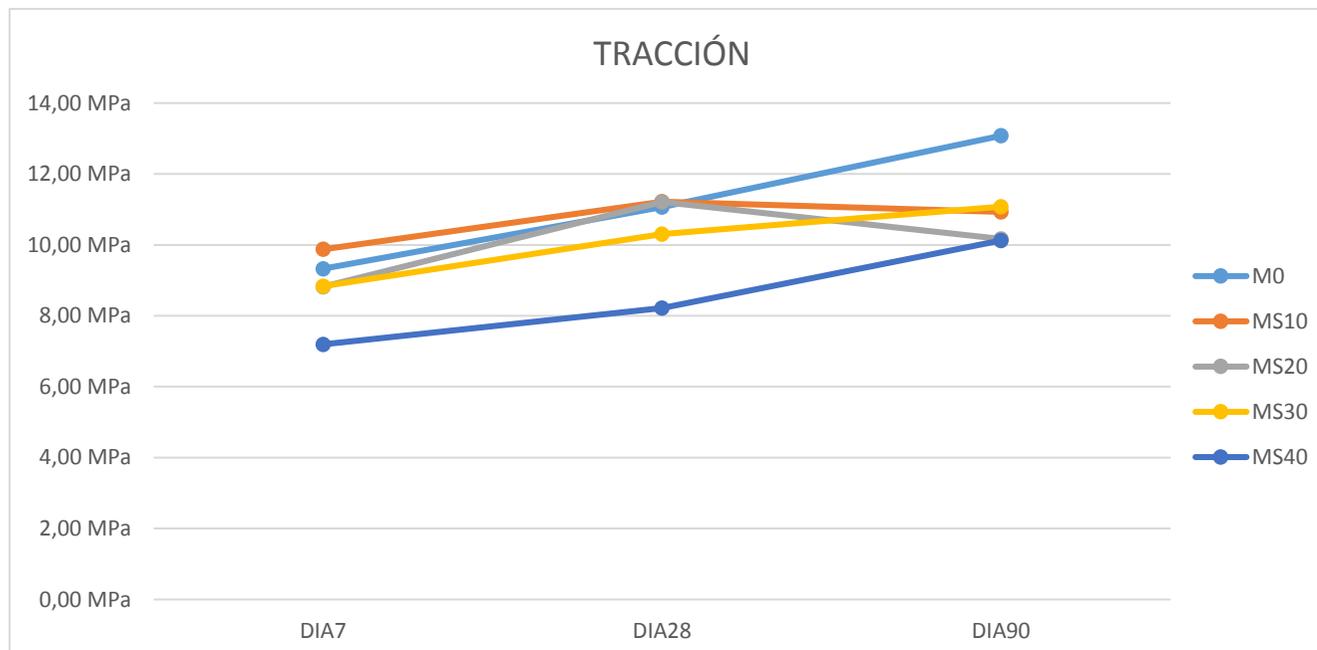


Gráfico 6. Comparativa de los morteros MS y morteros sin escoria

En el gráfico de arriba podemos ver las resistencias a tracción de cada tipo de probeta. Vemos que en los días 7 y 28 todas las probetas excepto la MS40 presentan una resistencia parecida. El día 90 sin embargo, todas las probetas menos la M0 tienen una resistencia parecida de 10-11 MPa. La probeta M0 tiene resistencia de 13 MPa aproximadamente.

5.3.7 Resultados de la retracción

La retracción es otro comportamiento que hay que comprobar en los morteros. Esto se debe a que al cubrir una superficie larga si la retracción es grande podemos tener problemas. Por eso hay que saber cuales son las retracciones aproximadas.

5.3.7.1 Retracción de las probetas curadas fuera del agua

A continuación, observaremos las retracciones que han sufrido las probetas que se han curado fuera del agua. Podemos observar en los primeros días las probetas se comprimen exponencialmente y luego ya se mantiene más o menos constante.

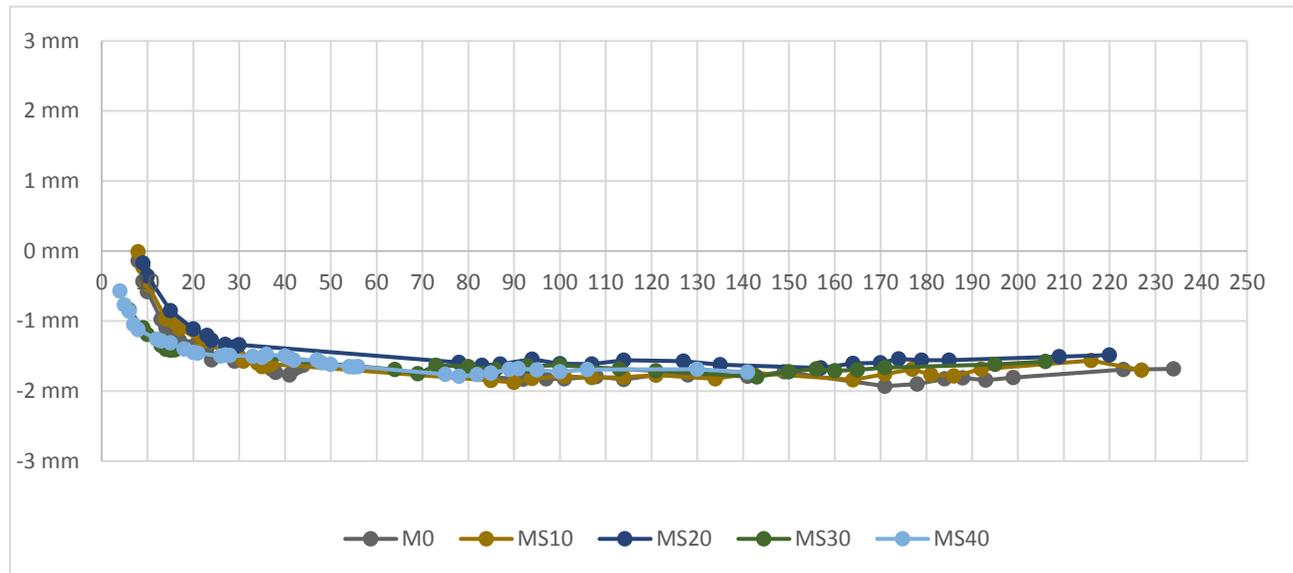


Gráfico 7. Comparativa de la retracción de los morteros MS y morteros sin escoria en seco

Como podemos observar en el gráfico de la página anterior la retracción que sufren las distintas probetas es muy parecida. Los primeros 40 días aproximadamente las probetas llegan a su longitud final. A partir de entonces su longitud se mantiene mas o menos constante. Podemos ver que por cada metro de la probeta la retracción no llega a los 2mm.

5.3.7.2 Retracción de las probetas curadas dentro del agua

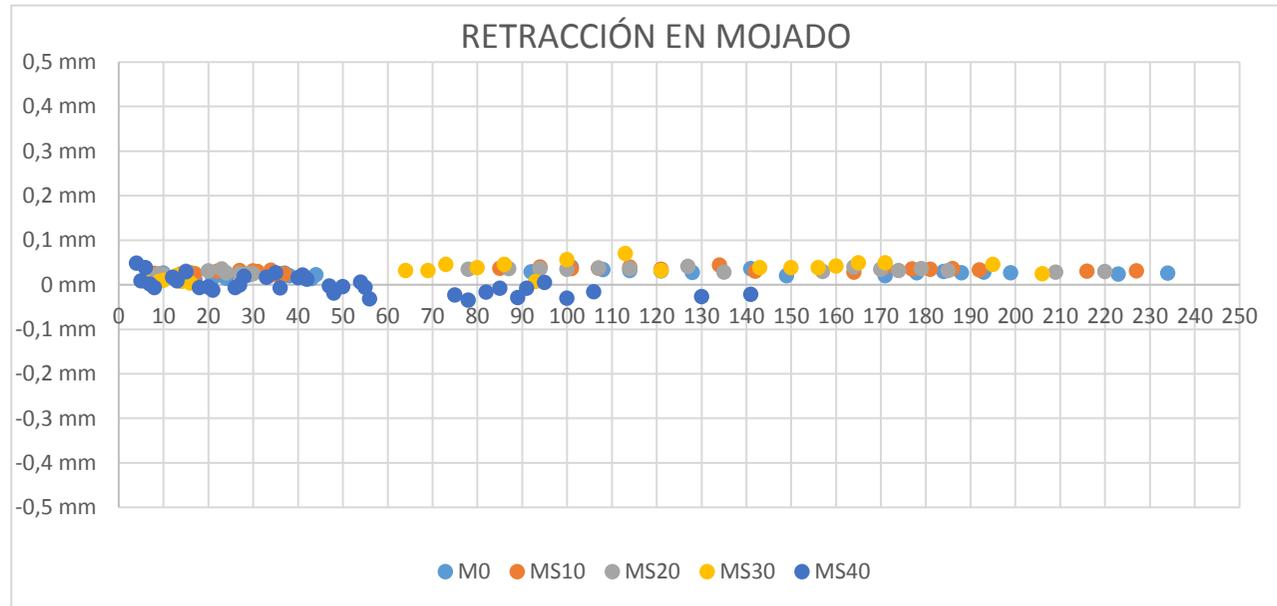


Gráfico 8. Comparativa de la retracción de los morteros MS y morteros sin escoria en mojado

Como podemos observar en la tabla de arriba, la retracción de las probetas que se han curado bajo el agua es prácticamente nula. De hecho, podemos decir que en la mayoría de los casos se han dilatado las probetas un poco. Con estos resultados vemos que es muy importante mantener el mortero mojado mientras se cura para que no se contraiga y así no aparezcan fisuras.

5.4 RESULTADOS OBTENIDOS EN LOS MORTEROS CON ESCORIA DE ALÚMINA

5.4.1 Resultados MA10

			F (compresion kN)	δ (tension a compresion MPa)	MEDIA DE CADA PROBETA	MEDIA TOTAL COMPRESION	F (flexion kN)	δ (tension a traccion MPa)	MEDIA DE TRACCION
MA10	DIA 7	MA10-1	89,41 kN	55,88 MPa	53,89 MPa	55,58 MPa	5,75 kN	13,48 MPa	8,32 MPa
			83,03 kN	51,89 MPa					
		MA10-2	87,67 kN	54,79 MPa	59,32 MPa		2,47 kN	5,79 MPa	
			102,16 kN	63,85 MPa					
		MA10-3	85,07 kN	53,17 MPa	53,52 MPa		2,43 kN	5,70 MPa	
			86,20 kN	53,88 MPa					
	DIA 28	MA10-4	113,13 kN	70,71 MPa	66,36 MPa	57,91 MPa	4,99 kN	11,70 MPa	10,25 MPa
			99,21 kN	62,01 MPa					
		MA10-5	96,95 kN	60,59 MPa	51,62 MPa		4,98 kN	11,67 MPa	
			68,24 kN	42,65 MPa					
		MA10-6	79,36 kN	49,60 MPa	55,76 MPa		3,15 kN	7,38 MPa	
			99,08 kN	61,93 MPa					
DIA 90	MA10-7	95,94 kN	59,96 MPa	60,40 MPa	63,53 MPa	4,17 kN	9,77 MPa	11,40 MPa	
		97,33 kN	60,83 MPa						
	MA10-8	87,98 kN	54,99 MPa	62,71 MPa		4,99 kN	11,70 MPa		
		112,68 kN	70,43 MPa						
	MA10-9	107,09 kN	66,93 MPa	67,50 MPa		5,43 kN	12,73 MPa		
		108,91 kN	68,07 MPa						

Tabla 8. Resultados de las probetas MA10

Si comparamos los resultados obtenidos en este caso (10% escoria saturada en alúmina) con los de 0% de escoria vemos que la resistencia a tracción es menor. Aun así, esta resistencia a tracción es muy elevada para un mortero. Si comparamos los resultados a compresión, vemos que al séptimo día no hay mucha diferencia entre uno y el otro. Los dos resultados superan los 50 MPa; dicho esto, se puede decir que son morteros de alta resistencia. Los días 28 y 90 vemos que las resistencias aumentan, pero muy poco. Aun así las resistencias obtenidas son muy altas.

5.4.2 Resultados MA20

			F (compresion kN)	δ (tension a cd)	MEDIA DE CADA PROBETA	MEDIA TOTAL	F (flexion kN)	δ (tension a traccion MPa)	MEDIA DE TRACCION
MA20	DIA 7	MA20-1	85,29 kN	53,31 MPa	50,48 MPa	43,41 MPa	4,71 kN	11,04 MPa	10,71 MPa
			76,26 kN	47,66 MPa					
		MA20-2	52,64 kN	32,90 MPa	36,89 MPa		4,82 kN	11,30 MPa	
			65,42 kN	40,89 MPa					
		MA20-3	74,88 kN	46,80 MPa	42,85 MPa		4,18 kN	9,80 MPa	
			62,25 kN	38,91 MPa					
	DIA 28	MA20-4	87,28 kN	54,55 MPa	47,53 MPa	50,70 MPa	4,03 kN	9,45 MPa	9,49 MPa
			64,83 kN	40,52 MPa					
		MA20-5	78,12 kN	48,83 MPa	50,82 MPa		3,98 kN	9,33 MPa	
			84,50 kN	52,81 MPa					
		MA20-6	84,90 kN	53,06 MPa	53,76 MPa		4,14 kN	9,70 MPa	
			87,12 kN	54,45 MPa					
DIA 90	MA20-7	80,15 kN	50,09 MPa	54,82 MPa	54,11 MPa	4,36 kN	10,22 MPa	10,99 MPa	
		95,26 kN	59,54 MPa						
	MA20-8	90,27 kN	56,42 MPa	57,38 MPa		4,81 kN	11,27 MPa		
		93,33 kN	58,33 MPa						
	MA20-9	77,51 kN	48,44 MPa	50,15 MPa		4,90 kN	11,48 MPa		
		82,96 kN	51,85 MPa						

Tabla 9. Resultados de las probetas MA20

Si comparamos estos resultados con los obtenidos en la tabla anterior, podemos observar que las resistencias a tracción son muy parecidas. En cambio, a compresión vemos que las resistencias disminuyen 10 MPa aproximadamente. Aunque esto sea una diferencia bastante notable vemos que a partir del día 28 la resistencia a compresión que resiste el mortero supera los 50 MPa. Dicho esto, este mortero también es un MAR.

5.4.3 Resultados MA30

			F(compresion kN)	δ (tension a compresion MPa)	MEDIA DE CADA PROBETA	MEDIA TOTAL A COMPRESION	F(flexion kN)	δ (tension a traccion MPa)	MEDIA DE TRACCION
MA30	DIA 7	MA30-1	67,13 kN	41,96 MPa	38,62 MPa	39,66 MPa	3,59 kN	8,41 MPa	8,48 MPa
			56,46 kN	35,29 MPa			8,41 MPa		
		MA30-2	63,44 kN	39,65 MPa	40,70 MPa		3,65 kN	8,55 MPa	
	66,81 kN		41,76 MPa	8,55 MPa					
	MA30-3		0,00 MPa	0,00 MPa			0,00 MPa		
			0,00 MPa	0,00 MPa			0,00 MPa		
	DIA 28	MA30-4	61,87 kN	38,67 MPa	44,66 MPa	40,88 MPa	3,61 kN	8,46 MPa	7,85 MPa
			81,05 kN	50,66 MPa	8,46 MPa				
		MA30-5	65,85 kN	41,16 MPa	37,10 MPa		3,09 kN	7,24 MPa	
			52,86 kN	33,04 MPa	7,24 MPa				
	MA30-6		0,00 MPa	0,00 MPa			0,00 MPa		
			0,00 MPa	0,00 MPa			0,00 MPa		
DIA 90	MA30-7	81,32 kN	50,83 MPa	46,59 MPa	45,93 MPa	3,90 kN	9,14 MPa	9,12 MPa	
		67,77 kN	42,36 MPa	9,14 MPa					
	MA30-8	73,70 kN	46,06 MPa	45,26 MPa		3,88 kN	9,09 MPa		
		71,13 kN	44,46 MPa	9,09 MPa					
MA30-9		0,00 MPa	0,00 MPa			0,00 MPa			
		0,00 MPa	0,00 MPa			0,00 MPa			

Tabla 10. Resultados de las probetas MA30

En estos resultados ya vemos que disminuye tanto la resistencia a tracción como a compresión. A tracción la resistencia no disminuye considerablemente. Sin embargo, en el caso de la compresión ya la diferencia es notable. Vemos que no llega a los 50 MPa de resistencia ni a los 90 días. Aun así, la resistencia que soporta es elevada.

5.4.4 Resultados MA40

			F (compresion kN)	δ (tension a compresion MPa)	MEDIA DE CADA PROBETA	MEDIA TOTAL MEDIA TOTAL A COMPRESION	F (flexión kN)	δ (tension a traccion MPa)	MEDIA DE TRACCION
MA40	DIA 7	MA40-1	57,75 kN	36,09 MPa	37,33 MPa	35,48 MPa	2,82 kN	6,61 MPa	7,28 MPa
			61,72 kN	38,58 MPa			3,36 kN	7,88 MPa	
		MA40-2	58,86 kN	36,79 MPa	37,72 MPa		3,14 kN	7,36 MPa	
			61,84 kN	38,65 MPa					
		MA40-3	47,43 kN	29,64 MPa	31,40 MPa		3,55 kN	8,32 MPa	
			53,05 kN	33,16 MPa					
	DIA 28	MA40-4	66,81 kN	41,76 MPa	39,75 MPa	39,80 MPa	3,30 kN	7,73 MPa	7,95 MPa
			60,40 kN	37,75 MPa					
		MA40-5	62,74 kN	39,21 MPa	39,64 MPa		3,32 kN	7,78 MPa	
			64,11 kN	40,07 MPa					
		MA40-6	66,86 kN	41,79 MPa	40,01 MPa		3,67 kN	8,60 MPa	
			61,18 kN	38,24 MPa					
DIA 90	MA40-7	67,18 kN	41,99 MPa	42,73 MPa	41,98 MPa	3,52 kN	8,25 MPa	8,54 MPa	
		69,57 kN	43,48 MPa						
	MA40-8	66,80 kN	41,75 MPa	41,17 MPa		3,74 kN	8,77 MPa		
		64,93 kN	40,58 MPa						
MA40-9	67,21 kN	42,01 MPa	42,05 MPa						
	67,34 kN	42,09 MPa							

Tabla 11. Resultados de las probetas MA40

En este ultimo caso, vemos que las resistencias obtenidas son un poco mas pequeños que del apartado anterior (30 % de escoria).

5.4.5 Resultados de la retracción

La retracción es otro comportamiento que hay que comprobar en los morteros. Esto se debe a que al cubrir una superficie larga si la retracción es grande podemos tener problemas. Por eso hay que saber cuales son las retracciones aproximadas.

5.4.5.1 Retracción de las probetas curadas fuera del agua

A continuación, observaremos las retracciones que han sufrido las probetas que se han curado fuera del agua. Podemos observar en los primeros días las probetas se comprimen exponencialmente y luego ya se mantiene más o menos constante.

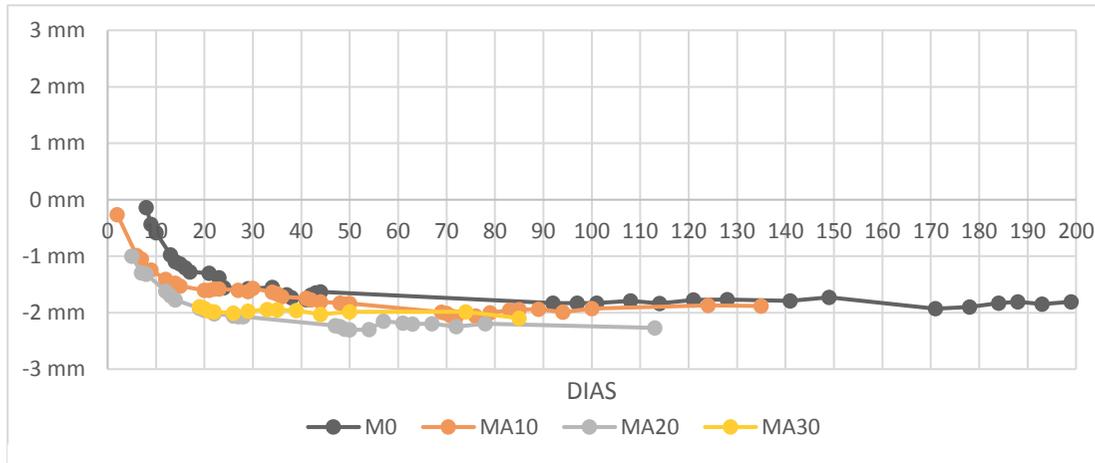


Gráfico 9. Comparativa de la retracción de los morteros MA y morteros sin escoria en seco

En la tabla de arriba podemos ver la contracción que sufre cada metro de mortero mientras pasan los días. Nuestras probetas no son de un metro, pero con una regla de tres hemos obtenido los siguientes resultados. Podemos observar los primeros 30 días aproximadamente son los que afectan a la contracción, a partir de entonces la contracción se mantiene mas o menos constante. Vemos que en el caso de MA10 y MA30 apenas contrae 2mm por metro. En el caso del MA20 si que lo supera siendo el valor máximo que ha contraído aproximadamente 2,3 mm por cada metro.

5.4.5.2 Retracción de las probetas curadas dentro del agua

Como podemos observar en la tabla de arriba, la retracción de las probetas que se han curado bajo el agua es prácticamente nula. De hecho, podemos decir que en la mayoría de los casos se han dilatado las probetas un poco. Con estos resultados vemos que es muy importante mantener el mortero mojado mientras se cura para que no se contraiga y así no aparezcan fisuras.

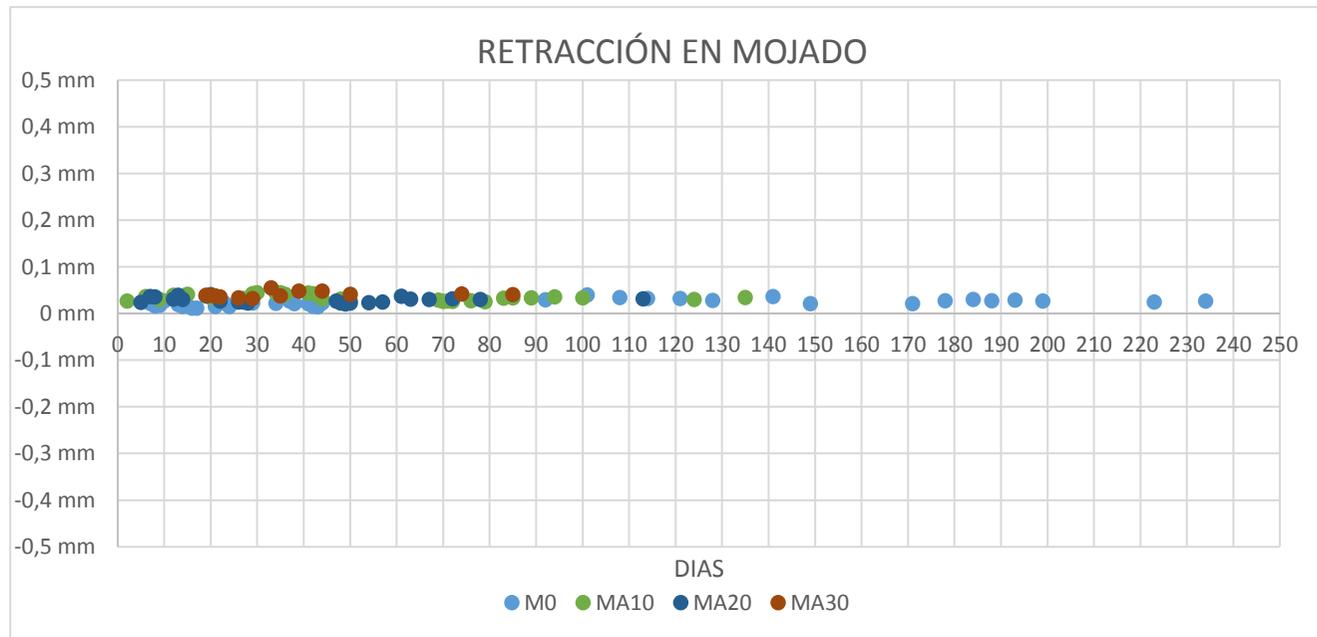


Gráfico 10. Comparativa de la retracción de los morteros MA y morteros sin escoria en mojado

6 DESCRIPCIÓN DE TAREAS

6.1 TAREAS

- **T1 Solicitud del TFG :**
Abierta la oferta de los distintos Trabajos Fin de Grado, se hace la solicitud, eligiendo el tutor y el proyecto.
- **T2 Presentación inicial del TFG:**
Tras asignar el TFG al alumno, este se reúne con el profesor que será su tutor en el proyecto. En esta reunión se hace un acercamiento al tema de estudio.
- **T3 Búsqueda de información:**
Una vez enfocado el tema, se busca la información necesaria de los distintos temas, recogiendo las distintas fuentes para su posterior uso.
- **T4 Parte experimental:**
Esta parte es la parte práctica. Vamos a proceder a hacer las probetas y hacer los ensayos de los cuales obtendremos los datos que posteriormente utilizaremos para redactar el TFG. En este apartado podemos distinguir dos grupos:
 - Amasadas y ensayos de probetas EBS (Escoria Blanca de Sílice)
 - Amasadas y ensayos de probetas EBA (Escoria Blanca de Alúmina)
- **T5 Escribir el TFG:**
Se procede, con la información recogida hasta el momento y con nuevas fuentes también, a redactar el trabajo.
- **T6 Matrícula del TFG:**
Hacer la matrícula con el nombre oficial y el aprobado del director y la universidad.
- **T7 Entrega del TFG:**
Entrega del TFG en la plataforma ADDI.
- **T8 Preparación de la presentación:**
Con la ayuda del director de proyecto se prepara la presentación final.
- **T9 Presentación oficial del TFG:**
Delante del tribunal oficial, se lleva a cabo la presentación por parte del autor del proyecto.

6.2 CRONOGRAMA

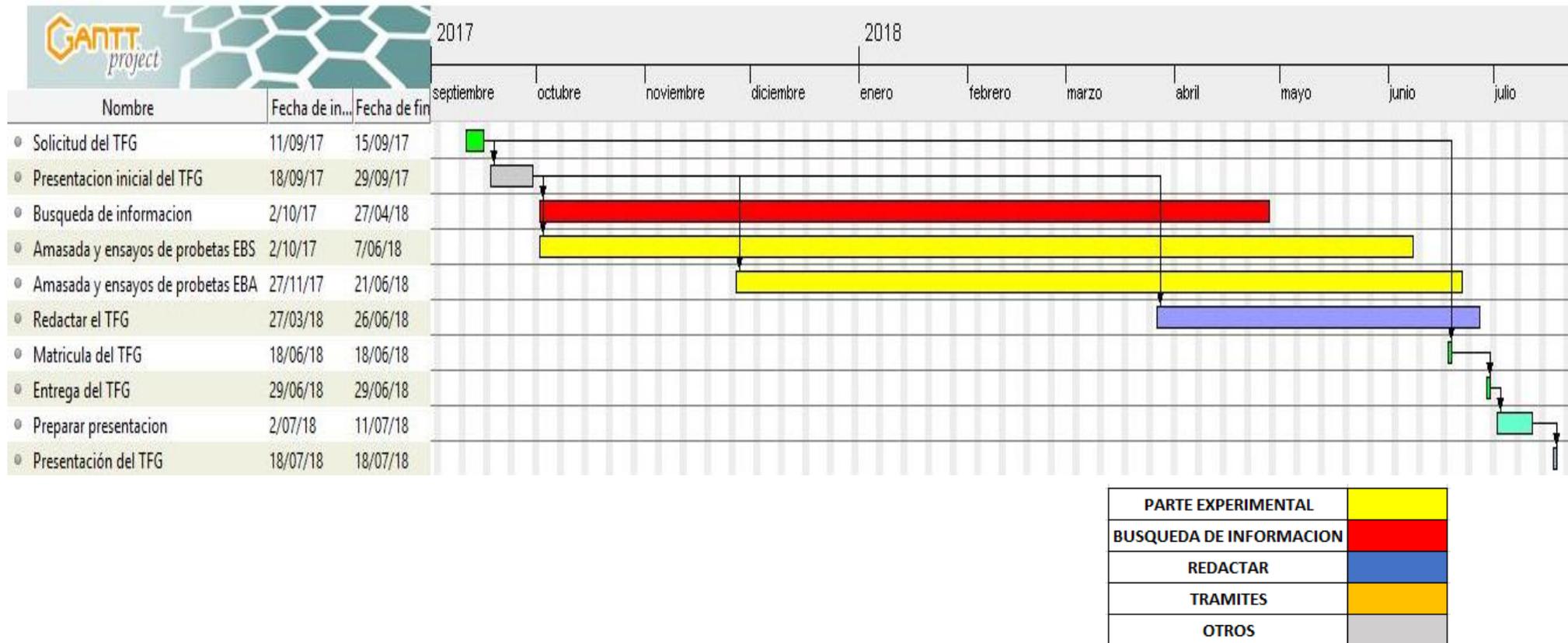


Ilustración 30. Diagrama de Gantt

7 DESCRIPCIÓN DE GASTOS

HORAS INTERNAS	HORAS	€/hora	COSTE
Estudiante	180 horas	12 €/hora	2.160,00 €
Profesor ingeniero	25 horas	30 €/hora	750,00 €
		TOTAL:	2.910,00 €

Tabla 12. Horas internas

AMORTIZACIONES	COSTE	USO (horas)	VIDA ÚTIL (años)	AMORTIZACIÓN
Ordenador 1	600,00 €	100 horas	6 años	1,14 €
Bancada + ordenador 2	12.000,00 €	20 horas	10 años	2,74 €
Amasadora	500,00 €	5 horas	10 años	0,03 €
Licencia Office	79,00 €	90 horas	2 años	0,41 €
			TOTAL:	4,32 €

Tabla 13. Amortizaciones

ENERGÍA	POTENCIA (W)	USO(horas)	€/(W*h)	GASTO
Ordenador 1	28 W	100 horas	0,0002 €/(W*h)	0,56 €
Bancada + Ordenador 2	3000 W	20 horas	0,0002 €/(W*h)	12,00 €
Amasadora	800 W	5 horas	0,0002 €/(W*h)	0,80 €
			TOTAL:	13,36 €

Tabla 14. Gastos energéticos

GASTOS	COSTE
Energía	13,36 €
Herramientas utilizadas	30,00 €
Materiales:	
arena	2,50 €
cemento	4,00 €
agua	0,50 €
plastificante	2,00 €
escorias	0,00 €
Transporte	15,00 €
Creditos UPV	57,57 €
TOTAL:	124,93 €

Tabla 16. Gastos

HORAS INTERNAS	2.910,00 €
AMORTIZACIONES	4,32 €
GASTOS	124,93 €
IMPREVISTOS	0,00 €
SUBCONTRATACIONES	0,00 €
TOTAL	3.039,25 €
COSTES INDIRECTOS (%7)	212,75 €
COSTE TOTAL	3.251,99 €
COSTE FINANCIERO (4%)	130,08 €
COSTE FINAL	3.382,07 €

Tabla 15. Resumen de presupuesto

8 CONCLUSIONES

8.1 CONCLUSIONES: MORTEROS CON ESCORIA DE SÍLICE

Viendo los resultados obtenidos en las pruebas y comparándolas con los resultados de la muestra (0% escoria) llegamos a estas conclusiones:

- En el caso de la resistencia a compresión, vemos que a medida que el porcentaje de escoria que tiene la probeta sube; la resistencia a compresión disminuye. Además, esta bajada de resistencia no es lineal. En los casos de 10% y 20% de escoria sí que es más o menos lineal, pero en los casos de 30% y 40% la bajada de resistencia es exponencial.
Aparte de lo citado anteriormente, vemos que, aunque las resistencias disminuyen las probetas son muy resistentes a compresión. Vemos que utilizando hasta 20% de escoria obtenemos un mortero de alta resistencia (supera los 50 MPa a los 28 días) y en la de 30 % por poco no llega a los 50 MPa. En el caso de 40% de escoria ya las resistencias no llegan a 40 MPa; entonces depende de las necesidades que tengamos habría que tener cuidado con este mortero.
- Si observamos la resistencia a tracción, vemos que hasta 30% de escoria disminuye muy poco la resistencia de las probetas. En el caso de 40 % ya se ve que baja algo mas esa resistencia de 11 a 8 MPa aproximadamente. Aun así, estas resistencias a tracción son elevadas.
- Centrándonos en los resultados de la retracción; vemos que no hay gran diferencia comparándolo con la muestra (0% escoria).

En resumen, los resultados de tracción y retracción se ve que no van a ser restrictivos en estos casos; sin embargo, la resistencia a compresión sí. Vemos que hasta los 30% de escoria el mortero es muy resistente y se podría utilizar como mortero estructural; per a partir de ese porcentaje ya tendríamos que tener en cuenta que las resistencias disminuyen exponencialmente y que ya la resistencia no es tan elevada.

8.2 CONCLUSIONES: MORTEROS CON ESCORIA DE ALÚMINA

Viendo los resultados obtenidos en las pruebas y comparándolas con los resultados de la muestra (0% escoria) llegamos a estas conclusiones:

- En este caso también como en el caso anterior, a medida que el porcentaje de escoria sube; la resistencia a compresión baja. Pero en este caso vemos que la resistencia a compresión disminuye más comparando con el mismo porcentaje de escoria que en el caso anterior. Vemos que hasta 20 % de escoria el mortero es de alta resistencia; pero ya en los dos siguientes porcentajes (30%, 40%) la resistencia a los 28 días está cerca de 40 MPa. Aun así, las resistencias obtenidas son muy elevadas.
- Si observamos la resistencia a tracción, vemos que hasta 20% de escoria disminuye muy poco la resistencia de las probetas. A partir de 30% ya se ve que baja algo más esa resistencia de 11 a 8 MPa aproximadamente (a los 28 días). Aun así, estas resistencias a tracción son elevadas.
- Centrándonos en los resultados de la retracción; vemos que las probetas con escoria de alúmina se contraen un poco más que las probetas con escoria de sílice y las probetas sin escoria. Vemos que en algunos casos la retracción supera los 2 mm por cada metro. Habría que tener cuidado en utilizarlo en superficies extensas; puesto que, la retracción podría ser un problema que crearía fisuras.

En resumen, los resultados de tracción van a ser restrictivos en estos casos; sin embargo, la resistencia a compresión sí y la retracción también la tendríamos que tener en cuenta. Vemos que hasta los 20% de escoria el mortero es muy resistente y se podría utilizar como mortero estructural; pero a partir de ese porcentaje ya tendríamos que tener en cuenta que las resistencias disminuyen a los 40 MPa y que ya la resistencia no es tan elevada. En el caso de la retracción, si procedemos a construir superficies poco extensas la retracción no sería un problema. Pero, si ya la superficie es considerable, tendríamos que tener cuidado con la retracción que sufre el mortero; puesto que, podría fisurar la estructura.

9 AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, tengo que agradecer a Javier Jesús Gonzalez por haberme dado la oportunidad de poder hacer este trabajo novedoso, práctico y a la vez entretenido que es y será de gran utilidad tanto para mí como para el sector de construcción que en poco tiempo empleara este tipo de escorias en sus obras.

Por otra parte, y no menos importante, tengo que agradecer a Amaia Santamaría por estar en todo momento pendiente de mí, ayudándome tanto en la parte práctica de este trabajo como en la parte teórica.

El presente trabajo de investigación ha sido parcialmente financiado con fondos provenientes del MINECO y FEDER (contrato “BlueCons” BIA2014-55576-C2-2-R) y del Grupo Consolidado del Gobierno Vasco (IT781-13: <https://www.ehu.eus/es/web/scm/home>)

Por lo tanto no me queda más que agradecer a todas las personas y entidades que han apoyado este trabajo.

10 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Tamara Herrero Vazquez. Estudio del efecto de la hidratación de la escoria blanca de acería de HEA : aplicación en pastas y morteros de cemento (2015). Departamento de materiales. Universidad del País Vasco / Euskal Herriko Unibertsitatea.
- [2] Producción mundial acero archivos – Metales y metalurgia < www.metalesymetalurgia.com>
- [3] Artículo del ABC: La producción de acero en España volvió a crecer en 2017 < www.abc.es>
- [4] País Vasco < https://es.wikipedia.org/wiki/País_Vasco >
- [5] Historia del Pin Vasco ::: La industrialización < kondaira.net>
- [6] Artículo del deia: Euskadi produce el 21% del acero español, la mitad que antes de la crisis <www.deia.eus>
- [7] José María Palacios Reparaz, José Luis Arana Bilbao, José Ignacio Larburu Ereño, Luis Iniesta de Bricio. La fabricación del acero. UNESID (2002).
- [8] Proceso de fabricación del acero < <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3319/55868-7.pdf?sequence=7>>
- [9] Economía circular <<https://www.ellenmacarthurfoundation.org/es/economia-circular/concepto>>
- [10] Economía circular <http://www.lessonsfromnature.org/es/index.php?option=com_content&view=article&id=104&Itemid=>>
- [11] Amaia Santamaría León. Development of cementitious matrix materials, with improved performance, incorporating BY-Products from the steel making industry (2017). Departamento de materiales. Universidad del País Vasco / Euskal Herriko Unibertsitatea.
- [12] Mortero (construcción)- Wikipedia, la enciclopedia libre < [https://es.wikipedia.org/wiki/Mortero_\(construcci%C3%B3n\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Mortero_(construcci%C3%B3n))>
- [13] Concreto – Wikipedia, la enciclopedia libre <<https://es.wikipedia.org/wiki/Concreto>>
- [14] Componentes del Mortero. <https://www.construmatica.com/construpedia/Componentes_del_Mortero._Caracter%C3%ADsticas>

- [15] Características de los Morteros.
<https://www.construmatica.com/construpedia/Caracter%C3%ADsticas_de_los_Morteros>
- [16] M. Skaf, V. Ortega-Lopez, J.A. Fuente-Alonso, A. Santamaría, J.M. Manso. Ladle furnace slag in asphalt mixes. *Construction and Building Materials* 122 (2016) 488–495.
- [17] Tamara Herrero Vazquez. Estudio del efecto de la hidratación de la escoria blanca de acería de HEA : aplicación en pastas y morteros de cemento (2015). Departamento de materiales. Universidad del País Vasco / Euskal Herriko Unibertsitatea.
- [18] Escorias de acería de horno de arco eléctrico - Cedex
<www.cedex.es>
- [19] Amaia Santamaría, Eduardo Roji, Marta Skaf, Ignacio Marcos, Javier J, Gonzalez. The use of steelmaking slags and fly ash in structural mortars. *Construction and Building Materials* (2016) 364–373