

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA MECÁNICA

TRABAJO FIN DE MÁSTER

CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE MUELAS ABRASIVAS DE CAUCHO

Estudiante	<i>Clemente, Fernández, Eder</i>
Director/Directora	<i>Godino, Fernández, Leire</i>
Departamento	<i>Departamento de Ingeniería Mecánica</i>
Curso académico	<i>2021-2022</i>

Bilbao, 18/09/22

RESUMEN

Castellano

El proyecto que se explicará a continuación pertenece al ámbito del rectificado, y tiene como principal objetivo el desarrollo de una metodología de ensayo, que permita obtener, de una manera sencilla y precisa, el límite elástico “E” de muelas abrasivas que emplean el caucho como aglomerante.

Históricamente, las muelas de aglomerante vítreo han sido ampliamente estudiadas y empleadas, se conocen sus propiedades con precisión, y su consecuente comportamiento. Sin embargo, esto no es aplicable al caucho, ya que, debido a sus propiedades de elastómero, es realmente complejo de tratar, precisando de equipos y procedimientos especiales para su correcto empleo. Todo ello hace que su interés industrial decrezca en gran medida, siendo apenas empleado en comparación a otros aglomerantes. Por ello, con el presente proyecto se pretende aumentar los conocimientos en torno a dicho material.

Para cumplir con el objetivo principal, se realizará un análisis bibliográfico en el que se investigará, además de las características de las muelas vítreas y de caucho diferentes tipologías de ensayo, entre las que se destacan el *Brazilian Test*, y los análisis de flexión. De entre todos ellos, se ha escogido los ensayos de flexión de 3 puntos como procedimiento de ensayo de las probetas, para así calcular su módulo de elasticidad.

Inicialmente se realizará un análisis de ensayos sobre probetas vítreas, diferenciando entre probetas obtenidas de muelas abrasivas y compactadas de aglomerante. Estos fueron realizados en la *Universidad de Burdeos*, y emplean varias fuentes de medición, para así comparar sus resultados individualmente, incluyendo un software informático.

Posteriormente, se analizan probetas de aglomerante de caucho, diferenciando entre unos primeros ensayos preliminares y los finales. Se ensayarán una serie de probetas, obtenidas de diferentes muelas y procedimientos de tratados. De estos ensayos se obtendrá el límite elástico en función de los valores máximo de rotura y el método de la pendiente de sus curvas Fuerza-Desplazamiento. Estos ensayos fueron realizados en la *Escuela de Ingeniería de Gipuzkoa*.

Finalmente, una vez obtenidos los resultados de estos ensayos, se obtendrán las conclusiones sobre la metodología desarrollada, y podrán ser comparados frente a los ensayos vítreos, para ver así la variabilidad del módulo elástico de acuerdo a diversas características.

Euskera

Orain aurkeztuko den proiektua artezketaren arlokoa da, eta saiakuntza-metodologia bat garatzea dauka helburu nagusitzat, aglomeratzaile gisa kautxua erabiltzen duten gurpil urratzaileen "E" modulu elastikoa lortzea ahalbidetzen duena.

Historikoki, beirazko harriak asko aztertu eta erabili dira industrian, haien propietateak eta ondoriozko portaera zehatz ezagutzen baitira. Hala ere, hau ez da aplikagarria kautxuarentzat; izan ere, bere propietate elastomerikoak direla eta, beharrezkoa den tratamendua benetan konplexua da, ekipamendu eta prozedura bereziak behar baititu behar bezala garatzeko. Ondoriz, bere interes industrialak neurri handian murrizten da, beste otatoko aglutinatzaileekin alderatuta ia ez dira erabiltzen. Hori dela eta, proiektu honek material honi buruzko ezagutza areagotzea dauka helburu gisa.

Helburu nagusia betetzeko, azterketa bibliografikoa garatu da, non beirazko eta kautxuzko harrienn ezaugarriez gain, entsegu mota ezberdinak ikertu dira, horien artean *Brazilian Test*-a eta flexio-analisiak nabarmentzen direnak. Horiek guztiak kontuan hartuta, 3 puntuko fexio-probak aukeratu egin dira saiakuntza-prozedura gisa, horrela probeten elastikotasun modulua lortzeko.

Hasiera batean, beirazko probetetan egindako proben analisia garatu da, non harrietatik lortutako probetak eta aglutinatzailea trinkotuz lortutakoak bereizten dira. Proba hauek *Bordeleko Unibertsitatea*-n egin ziren, eta hainbat neurketa iturri erabiltzen dituzte, baita software informatiko bat, haien arteko emaitzak alderatzeko.

Ondoren, kautxuzko aglutinatzaileen aleak aztertu dira, atariko lehen probak eta azkenekoak bereiziz. Artezketa-harri eta tratamendu-prozedura ezberdinetatik lortutako probeta sorta bat entseatu da. Proba horietatik, modulu elastikoa lortu egin da hausturaren balio maximoetan eta bere Indar-Desplazamendu kurben maldetan oinarrituta. Entsegu hauek *Gipuzkoako Ingeniaritza Eskola*-n egin dira.

Azkenik, behin saiakuntza horien emaitzak lortu ziren, garatutako metodologiari buruzko ondorioak erdietsiz gain, beirazko entseguekin alderatu ahal izan dira, hainbat ezaugarrien araberrako modulu elastikoen aldakortasuna ikusteko

English

The project that will be explained now belongs to the grinding field and its main objective is the development of a test methodology, which allows to obtain, in a simple and precise way, the elasticity modulus “E” of abrasive wheels that use rubber as bonding.

Historically, vitrified wheels have been widely studied and used, their properties and consequent behaviour are well known. Nevertheless, this does not apply to rubber, due to its elastomer properties, that make it really complex to process, even requiring special procedures and equipment for a correct use. All this means that its industrial interest decreases to a large degree, being hardly used in comparison to other bondings. Because of that, the present Project aims to increase knowledge around this material.

In order to fulfill the main objective, a bibliographic análisis has been carried out in which, apart from the characteristics of vitrified and rubber grinding wheels, different types of tests are investigated, among which the *Brazilian Test* and flexural analysis highlight. Considering all of them, the 3-point flexural tests have been chosen as the procedure for testing the specimens, to calculate their elastic limit.

Initially, tests on vitrified specimens have been analyzed, differentiating those obtained from abrasive wheels and from compacted bonding. These experiments were carried out at the *University of Bordeaux*, using various measurement sources, including a computer software, in order to compare their results individually.

Subsequently, rubber bonding specimens are analysed, studying first preliminary and final tests. A large group of specimens, obtained from different grinding wheels and treatment processes, have been be tested. In those experiments, the elasticity modulus has been obtained according to the maximum values of breakage, and the slope of their Force-Displacement curves. These tests were carried out at the *Gipuzkoa School of Engineering*.

Finally, once the results of the tests were obtained, conclusions are obtained about the methodology developed, allowing to compare them with the vitreous tests, with the purpose of studying the variability of the elastic modulus according to different characteristics.

Palabras clave

- Rectificado
- Muelas abrasivas
- Aglomerante vítreo
- Aglomerante de caucho
- Ensayo de flexión de 3 puntos
- Probeta
- Núcleo
- Resina
- Módulo elástico
- Tensión máxima
- Fuerza
- Desplazamiento

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN
INGENIERÍA MECÁNICA**

TRABAJO FIN DE MÁSTER

***CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE MUELAS
ABRASIVAS DE CAUCHO***

DOCUMENTO I - ÍNDICE

Estudiante	<i>Clemente, Fernández, Eder</i>
Director/Directora	<i>Godino, Fernández, Leire</i>
Departamento	<i>Departamento de Ingeniería Mecánica</i>
Curso académico	<i>2021-2022</i>

Bilbao, 18/09/22

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	15
2	CONTEXTO	15
3	OBJETIVOS Y ALCANCE DEL TRABAJO	16
4	BENEFICIOS	17
5	ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ARTE	18
5.1	CONCEPTOS BÁSICOS DEL RECTIFICADO.....	18
5.2	MUELAS ABRASIVAS.....	20
5.2.1	MUELAS VITRIFICADAS.....	24
5.2.2	MUELAS DE CAUCHO.....	26
5.2.3	USO DE MUELAS DE CAUCHO	30
5.3	CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO	33
5.3.1	MATERIALES FRÁGILES	33
5.3.2	MATERIALES CUASI-FRÁGILES	35
5.3.3	PRINCIPALES TIPOS DE ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN.....	37
5.3.4	CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE MUELAS ABRASIVAS.....	43
6	PROBLEMÁTICA A ESTUDIAR	45
7	CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE MUELAS DE ALÚMINA CON AGLOMERANTE VÍTREO	46
7.1	CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE PROBETAS DE MUELAS ABRASIVAS	46
7.2	CONCLUSIONES DE LOS ENSAYOS VÍTREOS	56
8	CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE MUELAS DE ALÚMINA CON AGLOMERANTE DE CAUCHO....	58
8.1	MATERIALES E INSTRUMENTACIÓN A EMPLEAR	58
8.1.1	EQUIPOS EMPLEADOS	58
8.1.2	PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS A ENSAYAR	59
8.2	PROCEDIMIENTO DE ENSAYO	65
8.3	RESULTADOS DE ENSAYOS	67
8.3.1	RESULTADOS DE LOS ENSAYOS PRELIMINARES	67
8.3.2	RESULTADOS DE LOS ENSAYOS FINALES	84
9	CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS	101
10	BIBLIOGRAFIA	106

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN
INGENIERÍA MECÁNICA**

TRABAJO FIN DE MÁSTER

***CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE MUELAS
ABRASIVAS DE CAUCHO***

***DOCUMENTO II – LISTA DE
FIGURAS, TABLAS Y
NOMENCLATURA***

Estudiante	<i>Clemente, Fernández, Eder</i>
Director/Directora	<i>Godino, Fernández, Leire</i>
Departamento	<i>Departamento de Ingeniería Mecánica</i>
Curso académico	<i>2021-2022</i>

Bilbao, 18/09/22

FIGURAS

Figura 1. Escuela de Ingeniería de Bilbao.	15
Figura 2. Abrasivos Manhattan.	16
Figura 3. Elementos en una operación de rectificado [1].	18
Figura 4. Estructura de una muela abrasiva [4].	20
Figura 5. Designación para muelas de abrasivos convencionales [5].	23
Figura 6. Muela de aglomerante vítreo.	24
Figura 7. Etapas de fabricación de una muela vitrificada [7].	25
Figura 8. Muela de aglomerante de caucho.	26
Figura 9. Reacción de vulcanización [8].	27
Figura 10. Logo de Abrasivos Manhattan [13].	32
Figura 11. Logo de Artiflex [16].	32
Figura 12. Curva Tensión-Deformación de un material frágil frente a uno dúctil [17].	33
Figura 13. Fractura frágil frente a dúctil [18].	34
Figura 14. Curva Tensión-Deformación de un material cuasi-frágil [21].	35
Figura 15. Fractura de material cuasi-frágil [18].	36
Figura 16. Ensayos de 3 y 4 puntos [21].	37
Figura 17. Grindo-Sonic [24].	39
Figura 18. Ultrasonic Grader [25].	40
Figura 19. Brazilian Test [27].	40
Figura 20. Ensayo de dureza Knoop [29].	42
Figura 21. Curva Tensión-Deformación del hormigón [31].	43
Figura 22. Setup del ensayo de 3 puntos para probetas de muela vítrea.	46
Figura 23. Ejemplo de lectura en el GOM.	47
Figura 24. Ensayo sobre probeta obtenida de muela vítrea.	48
Figura 25. Rotura de probeta obtenida de muela vítrea.	48
Figura 26. Resultados de desplazamientos medidos en el GOM.	51
Figura 27. Curvas Tensión-Deformación de las probetas convencionales.	51
Figura 28. Zona lineal de las curvas Fuerza-Desplazamiento de las probetas convencionales.	52
Figura 29. Curvas Tensión-Deformación de las probetas 50% monocristal.	52
Figura 30. Zona lineal de las curvas Fuerza-Desplazamiento de las probetas 50% monocristal.	53
Figura 31. Curvas Tensión-Deformación de las probetas 100% monocristal.	53
Figura 32. Zona lineal de las curvas Fuerza-Desplazamiento de las probetas 100% monocristal.	54
Figura 33. Valores máximos de desplazamiento para ensayos sobre probetas obtenidas de muela vítrea.	56
Figura 34. Máquina Instron para la realización de los ensayos de flexión de 3 puntos.	58
Figura 35. Láser optoNCDT 1902LL.	59
Figura 36. Muela WACL400MB1.	60
Figura 37. Corte de la muela WACL400MB1.	60
Figura 38. Muela WACL400MB1 cortada a la mitad.	61
Figura 39. Sierra metalográfica Servocut 302.	61
Figura 40. Pulidora Forcipol 102.	62
Figura 41. Conjunto de probetas obtenidas de la muela WACL400MB1.	62
Figura 42. Probetas suministradas por Manhattan para los ensayos preliminares.	63
Figura 43. Grupos de probetas suministradas por Manhattan para los ensayos finales.	64
Figura 44. Ensayo sobre la probeta IK2.	64
Figura 45. Sentido de fabricación de las probetas radiales.	67
Figura 46. Aparición de grieta de fractura en una probeta radial.	68
Figura 47. Fractura de probeta radial.	68
Figura 48. Curva Tensión-Deformación de las probetas radiales.	69
Figura 49. Zona lineal de la curva Fuerza-Desplazamiento de las probetas radiales.	69
Figura 50. Sentido de fabricación de las probetas axiales.	70
Figura 51. Curva Tensión-Deformación de las probetas axiales.	71
Figura 52. Zona lineal de la curva Fuerza-Desplazamiento de las probetas axiales.	72
Figura 53. Ensayo sobre probeta axial.	72
Figura 54. Fractura en una probeta axial.	72

DOCUMENTO II – LISTA DE FIGURAS, TABLAS Y NOMENCLATURA

Figura 55. Curva Tensión-Deformación de las probetas de sección aumentada.	73
Figura 56. Zona lineal de la curva Fuerza-Desplazamiento de las probetas de sección aumentada....	74
Figura 57. Curva Tensión-Deformación de las probetas resinoides de Manhattan.	75
Figura 58. Zona lineal de la curva Fuerza-Desplazamiento de las probetas resinoides de Manhattan.	76
Figura 59. Fractura de probeta resinoide epoxi de Manhattan.	76
Figura 60. Fractura de probeta resinoide estándar de Manhattan.	76
Figura 61. Curva Tensión-Deformación de las probetas de caucho de Manhattan (I).	78
Figura 62. . Curva Tensión-Deformación de las probetas de caucho de Manhattan (II).	78
Figura 63. Zona lineal de la curva Fuerza-Desplazamiento de las probetas de caucho de Manhattan (I).	79
Figura 64. Zona lineal de la curva Fuerza-Desplazamiento de las probetas de caucho de Manhattan (II).	79
Figura 65. Ensayo sobre probeta de caucho de Manhattan.	80
Figura 66. Fractura de la probeta de caucho de Manhattan.	80
Figura 67. Curva Tensión-Deformación de las probetas mixtas de Manhattan.	81
Figura 68. Zona lineal de la curva Fuerza-Desplazamiento de las probetas mixtas de Manhattan.	82
Figura 69. Ensayo sobre probeta mixta de Manhattan.	82
Figura 70. Fractura de probeta mixta de Manhattan (I).	83
Figura 71. Fractura de probeta mixta de Manhattan (II).	83
Figura 72. Fractura de probeta mixta de Manhattan (III).	83
Figura 73. Curva Tensión-Deformación de las probetas resinoides de epoxi de los ensayos finales..	86
Figura 74. Zona lineal de la curva Fuerza-Desplazamiento de las probetas resinoides de epoxi de los ensayos finales.	86
Figura 75. Curva Tensión-Deformación de las probetas resinoides estándar de los ensayos finales. .	87
Figura 76. Zona lineal de la curva Fuerza-Desplazamiento de las probetas resinoides estándar de los ensayos finales.	87
Figura 77. Ensayo sobre probeta resinoide estándar de los ensayos finales.	88
Figura 78. Probeta longitudinal de epoxi de los ensayos finales.	88
Figura 79. Curva Tensión-Deformación de las probetas longitudinales de epoxi de los ensayos finales.	90
Figura 80. Zona lineal de la curva Fuerza-Desplazamiento de las probetas longitudinales de epoxi de los ensayos finales.	91
Figura 81. Curva Tensión-Deformación de las probetas longitudinales estándar de los ensayos finales.	91
Figura 82. Zona lineal de la curva Fuerza-Desplazamiento de las probetas longitudinales estándar de los ensayos finales.	92
Figura 83. Ensayo sobre probeta longitudinal de los ensayos finales.	92
Figura 84. Probeta transversal de epoxi de los ensayos finales.	93
Figura 85. Curva Tensión-Deformación de las probetas transversales de epoxi de los ensayos finales.	95
Figura 86. Zona lineal de la curva Fuerza-Desplazamiento de las probetas transversales de epoxi de los ensayos finales.	96
Figura 87. Curva Tensión-Deformación de las probetas transversales estándar de los ensayos finales.	96
Figura 88. Zona lineal de la curva Fuerza-Desplazamiento de las probetas transversales estándar de los ensayos finales.	97
Figura 89. Curva Tensión-Deformación de las probetas de otros fabricantes de los ensayos finales.	99
Figura 90. Zona lineal de la curva Fuerza-Desplazamiento de las probetas de otros fabricantes de los ensayos finales.	99
Figura 91. Ensayo sobre probeta IK de los ensayos finales.	100
Figura 92. Ejemplo de rotura de probeta con núcleo resinoide.	102
Figura 93. Comparativa de las tensiones de rotura entre resinas epoxi.	103
Figura 94. Comparativa de las tensiones de rotura entre resinas epoxi.	103
Figura 95. Comparativa entre tensiones de probetas con resina epoxi.	104
Figura 96. Probeta de aglomerante sin pintar.	110
Figura 97. Probeta de aglomerante pintada.	110
Figura 98. Curvas Fuerza-Desplazamiento para probetas de aglomerante.	111
Figura 99. Lectura en GOM del ensayo 5 de las probetas de aglomerante.	112

DOCUMENTO II – LISTA DE FIGURAS, TABLAS Y NOMENCLATURA

Figura 100. Lectura en GOM del ensayo 6 de las probetas de aglomerante.	112
Figura 101. Módulo elástico obtenido de las diferentes fuentes de medición para las probetas aglomeradas.	113
Figura 102. Representación de nodos y antinodos en una onda estacionaria [33].	114
Figura 103. Muela para análisis modal.	115
Figura 104. Pesaje de la muela del análisis modal.	115
Figura 105. Desplazamientos del primer modo de vibración [34].	117
Figura 106. Desplazamientos del segundo modo de vibración [34].	117
Figura 107. Martillo excitador y cabezales.	118
Figura 108. Posicionamiento del ensayo para la obtención de ambos modos de vibración en un único ensayo.	119
Figura 109. Transductor CoCo 80.	119
Figura 110. Acelerómetro y cera.	120
Figura 111. Cables coaxiales.	120
Figura 112. Apoyo suave seleccionado.	120
Figura 113. Valor de la primera frecuencia.	124
Figura 114. Valor de la segunda frecuencia.	124

TABLAS

Tabla 1. Relación entre el acabado obtenido en la pieza y el tamaño de grano [5].	22
Tabla 2. Relación entre el tipo de muela y su grado [5].	22
Tabla 3. Relación entre el tipo de muela y su estructura [5].	23
Tabla 4. Ensayos normalizados en elastómeros vulcanizados [9].	29
Tabla 5. Comparativa entre parámetros de una muela de caucho frente a una vítrea.	31
Tabla 6. Valores máximos de desplazamiento y fuerza para ensayos sobre probetas obtenidas de muela vítrea.	48
Tabla 7. Resultados para las probetas obtenidas de muela vítrea.	50
Tabla 8. Resultados del módulo elástico obtenido en ensayos mecánicos sobre muela vítrea.	55
Tabla 9. Resultados del láser en ensayos mecánicos sobre muela vítrea.	55
Tabla 10. Dimensiones de las probetas radiales.	67
Tabla 11. Resultados de las probetas radiales.	68
Tabla 12. Resultados de las probetas radiales.	70
Tabla 13. Dimensiones de las probetas axiales.	70
Tabla 14. Resultados de las probetas axiales.	71
Tabla 15. Dimensiones de las probetas de sección aumentada.	73
Tabla 16. Resultados de las probetas de sección aumentada.	73
Tabla 17. Dimensiones de las probetas resinoides de Manhattan.	75
Tabla 18. Resultados de las probetas resinoides de Manhattan.	75
Tabla 19. Resultados de las probetas de caucho de Manhattan.	77
Tabla 20. Resultados de las probetas de caucho de Manhattan.	77
Tabla 21. Dimensiones de las probetas mixtas de Manhattan.	80
Tabla 22. Resultados de las probetas mixtas de Manhattan.	81
Tabla 23. Dimensiones de las probetas resinoides de epoxi de los ensayos finales.	84
Tabla 24. Resultados de las probetas resinoides de epoxi de los ensayos finales.	84
Tabla 25. Dimensiones de las probetas resinoides estándar de los ensayos finales.	85
Tabla 26. Resultados de las probetas resinoides estándar de los ensayos finales.	85
Tabla 27. Dimensiones de las probetas longitudinales de epoxi de los ensayos finales.	88
Tabla 28. Resultados de las probetas longitudinales de epoxi de los ensayos finales.	89
Tabla 29. Dimensiones de las probetas longitudinales estándar de los ensayos finales.	89
Tabla 30. Resultados de las probetas longitudinales estándar de los ensayos finales.	89
Tabla 31. Dimensiones de las probetas transversales de epoxi de los ensayos finales.	93
Tabla 32. Resultados de las probetas transversales de epoxi de los ensayos finales.	93
Tabla 33. Dimensiones de las probetas transversales estándar de los ensayos finales.	94
Tabla 34. Resultados de las probetas transversales estándar de los ensayos finales.	94
Tabla 35. Distribución de las almenas en las probetas transversales de epoxi de los ensayos finales.	94
Tabla 36. Distribución de las almenas en las probetas transversales estándar de los ensayos finales.	95
Tabla 37. Dimensiones de las probetas IK de los ensayos finales.	97
Tabla 38. Resultados de las probetas IK de los ensayos finales.	98
Tabla 39. Dimensiones de las probetas NOR de los ensayos finales.	98
Tabla 40. Dimensiones de las probetas NOR de los ensayos finales.	98
Tabla 41. Ejemplos de muelas de Manhattan.	101
Tabla 42. Valores de desplazamientos máximos para las probetas de aglomerante.	111
Tabla 43. Valores de módulo elástico para las probetas de aglomerante.	112
Tabla 44. Parámetros iniciales del análisis modal.	116
Tabla 45. Frecuencias obtenidas al excitar el perímetro exterior.	121
Tabla 46. Frecuencias obtenidas al excitar el cambio de material.	122
Tabla 47. Frecuencias obtenidas al excitar el perímetro interior.	122
Tabla 48. Selección de las frecuencias del perímetro exterior.	123
Tabla 49. Selección de las frecuencias para el cambio de material.	123
Tabla 50. Selección de las frecuencias para el perímetro interior.	123

NOMENCLATURA

A	[mm]	Anchura de la muela
t	[mm]	Anchura de la probeta
h	[mm]	Altura de la sección de la probeta
f	[mm]	Avance
b	[mm]	Base de la sección de la probeta
P	[N]	Carga aplicada
ν	[mm]	Coefficiente de Poisson
ΔL	[mm]	Deformación previa a la rotura
φ	[g/mm ³]	Densidad
D	[mm]	Diámetro exterior
d	[mm]	Diámetro interior
L	[mm]	Distancia entre apoyos
HK	[HK]	Dureza Knoop
y	[mm]	Flecha
f_1	[Hz]	Frecuencia natural de vibración
G	[MPa]	Módulo de cizalladura
K	[MPa]	Módulo de rigidez
m_w	[-]	Módulo de Weibull
E	[MPa]	Módulo elástico o de Young
E_1	[MPa]	Módulo elástico empleando los valores máximo de fuerza y desplazamiento
E_2	[MPa]	Módulo elástico empleando la pendiente de la zona lineal de la curva Fuerza-Desplazamiento
I	[mm ⁴]	Momento de inercia
m	[-]	Pendiente
p	[mm]	Profundidad de pasada
R	[mm]	Radio de la probeta
σ_t	[MPa]	Resistencia a tracción
σ_0	[MPa]	Resistencia característica de Weibull

DOCUMENTO II – LISTA DE FIGURAS, TABLAS Y NOMENCLATURA

a	[mm]	Semilongitud de la grieta
σ_f	[MPa]	Tensión en la grieta
σ_{max}	[MPa]	Tensión máxima
V_c	[m/s]	Velocidad de corte
V_w	[m/min]	Velocidad de la pieza

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA MECÁNICA

TRABAJO FIN DE MÁSTER

CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE MUELAS ABRASIVAS DE CAUCHO

DOCUMENTO III - MEMORIA

Estudiante	<i>Clemente, Fernández, Eder</i>
Director/Directora	<i>Godino, Fernández, Leire</i>
Departamento	<i>Departamento de Ingeniería Mecánica</i>
Curso académico	<i>2021-2022</i>

Bilbao, 18/09/22

1 INTRODUCCIÓN

En el presente proyecto se pretende realizar un estudio en torno a la caracterización del comportamiento mecánico de muelas abrasivas que emplean caucho como aglomerante, en base a su límite elástico, partiendo de un análisis de un estudio previo de muelas vitrificadas.

Históricamente, las muelas de aglomerante vítreo han sido ampliamente estudiadas, se conocen sus propiedades en gran medida, y es posible predecir su comportamiento de una manera precisa, dotando a las muelas que lo emplean de un especial interés en la industria. Sin embargo, la situación es totalmente diferente con el aglutinante de caucho. Se trata de un elastómero complejo de tratar, ya que su elevada elasticidad hace que la fabricación de las muelas sea especialmente compleja, precisando de equipos y procedimientos especializados para ello. De esta forma, se pretende desarrollar una metodología de ensayo para la caracterización mecánica de muelas abrasivas de caucho, que, debido a estos factores, no se encuentren en tales cantidades como las vítreas en la industria.

A lo largo de este documento se explica el contexto en el que se desarrolla el proyecto, los objetivos que se esperan cumplir, el estado del arte del que se parte para realizar el estudio e incluso la solución seleccionada para abordar así la problemática principal. Además, se detalla la metodología desarrollada durante los ensayos experimentales, mostrando los resultados obtenidos en ellos y conclusiones de los mismos.

2 CONTEXTO

Este trabajo se realiza en colaboración con el Departamento de Ingeniería Mecánica de la *Escuela de Ingeniería de Bilbao* (Figura 1), y en cooperación educativo junto a *Abrasivos Manhattan*, situada en el polígono industrial de Betoño-Larragana, en Vitoria, Álava. Se trata de un fabricante de muelas abrasivas especializado en el rectificado sin centros, y considerado uno de los líderes en la fabricación de muelas aglomeradas en caucho.



Figura 1. Escuela de Ingeniería de Bilbao.

Abrasivos Manhattan (Figura 2) se caracteriza por sus labores de investigación y desarrollo dentro del proceso productivo de muelas abrasivas. Ofrecen soluciones tecnológicas a medida para sus clientes, con una fase posterior de seguimiento para supervisar y optimizar los resultados obtenidos. Poseen un amplio abanico de muelas abrasivas, las cuales abarcan desde el desbaste hasta el super-acabado, destacando principalmente las que emplean caucho a modo de aglutinante. Generalmente, estas están destinadas al mundo de la automoción, siendo empleadas en la fabricación amortiguadores, horquillas de suspensión o cremalleras direccionales, entre otros productos. Sin embargo, también presentan interés dentro del rectificado, aspecto que será tratado en el proyecto.



Figura 2. Abrasivos Manhattan.

Cabe destacar que el trabajo se desarrolla en los talleres de la *Escuela de Ingeniería de Bilbao*, de la *Universidad del País Vasco*. Aun así, se mantiene un contacto directo y continuo entre ambos centros, para así agilizar el desarrollo del proyecto. Respecto a los ensayos para desarrollar la metodología, los que estudian muelas abrasivas de caucho han sido realizados en la *Escuela de Ingeniería de Gipuzkoa*, ya que en las instalaciones de Bilbao no se precisaba del equipamiento necesario para su correcto desarrollo. Por otro lado, los ensayos estudiados en torno a muelas de aglomerante vítreo fueron realizados en las instalaciones de la *Escuela de Ingeniería de Burdeos*.

3 OBJETIVOS Y ALCANCE DEL TRABAJO

Atendiendo al contexto previamente planteado, con este trabajo se buscará la obtención de una metodología de ensayo que caracterice el comportamiento mecánico de muelas abrasivas de caucho. Para ello, se realiza una revisión bibliográfica en torno a estas herramientas, seguido de un primer análisis basado en estudios realizados sobre muelas vitrificadas. A continuación, se detalla el procedimiento llevado a cabo, mediante diferentes ensayos, para la obtención del límite de elasticidad de muelas de caucho. De esta forma, se centrará el interés del proyecto en esta tipología de muela, partiendo de unos primeros ensayos vítreos.

Por consiguiente, el principal objetivo del proyecto es el siguiente:

- Desarrollar una metodología industrial, basada en ensayos de flexión de 3 puntos, que permita calcular el módulo elástico “E” de muelas abrasivas que emplean caucho como aglutinante.

Para un correcto estudio de dicho objetivo principal, se plantean varios objetivos secundarios a desarrollar:

- Realizar un estudio de cuál es el mejor medio de medición de la flecha en ensayos de flexión de 3 puntos.
- Analizar los resultados obtenidos siguiendo la metodología para descubrir así cual es la mejor disposición de fabricación de las probetas de caucho.

4 BENEFICIOS

Respecto a los beneficios que se obtienen del presente proyecto, se destaca la profundización en torno al comportamiento mecánico de muelas abrasivas de caucho. Además, se espera que la metodología desarrollada sea aplicable a la totalidad de esta tipología de muela, haciendo así que su estudio teórico pueda realizarse de manera más sencilla. De esta forma, se trata de aumentar el conocimiento en torno a esta clase de muelas, precisamente respecto a su comportamiento mecánico.

Cabe mencionar que los ensayos han sido realizados en equipamiento propio de ensayos de flexión de 3 puntos, sin embargo, esto no se considera una limitación, ya que también podría plantearse una metodología de desarrollo en otra tipología de ensayo, aunque bien es cierto que su comportamiento y posterior validez serían desconocidos. De esta forma, se le atribuye una facilidad de desarrollo a la metodología planteada, haciendo que pueda llevarse a cabo sin demasiada complejidad, simplemente se precisa de un equipo capaz de ello.

Por último, en cuanto a los conocimientos obtenidos, el proyecto profundiza en aspectos teóricos de ambos tipos de muela. Con ello, además de una correcta sintetización de los conocimientos propios de muelas vítreas, aporta una contextualización del caucho como aglomerante, con el fin de aumentar, o al menos, aclarar, los pocos conocimientos precisados a nivel industrial en torno a este.

5 ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ARTE

En el siguiente apartado se realizará, en primer lugar, una introducción al rectificado y a las muelas abrasivas, centrandose principalmente la atención en las que emplean aglomerante vítreo y de caucho. Posteriormente, se tratará la caracterización del comportamiento mecánico de materiales frágiles y cuasi-frágiles, seguido de las principales técnicas y ensayos empleados para llegar a dicho fin. Por último, se particularizará esto para las muelas abrasivas.

5.1 CONCEPTOS BÁSICOS DEL RECTIFICADO

El rectificado es un proceso de mecanizado abrasivo con arranque de viruta, generalmente destinado a piezas que precisen de dimensiones y tolerancias exigentes, ya sean geométricas, dimensionales o incluso superficiales, que se emplea en las últimas etapas de su ciclo de fabricación, con el fin de aumentar la calidad y garantizar esas tolerancias [1]. Es un proceso que, en cierta medida, siempre ha sido poco considerado en la industria frente a otros como el torneado o el fresado, principalmente por su coste o baja eficiencia. Sin embargo, en los últimos años, debido a nuevos aportes tecnológicos y desarrollos, se le atribuye un gran valor añadido a la pieza, por lo que su uso se está viendo aumentado en gran medida.

Dentro del proceso de rectificado existen una serie de elementos comunes que intervienen siempre (Figura 3), como la muela abrasiva, con sus especificaciones, la máquina rectificadora, considerando su tipo y características, el sistema de diamantado, con las diferentes tecnologías posibles, el fluido de corte y la propia pieza a trabajar. Por otro lado, están las variables que intervienen dentro del rectificado, como pueden ser la profundidad de pasada, el avance, la velocidad de la pieza o las condiciones de diamantado, entre otras. Todos estos elementos relacionados con las condiciones de la operación se encuentran estrechamente ligados a los resultados necesarios para el proceso.

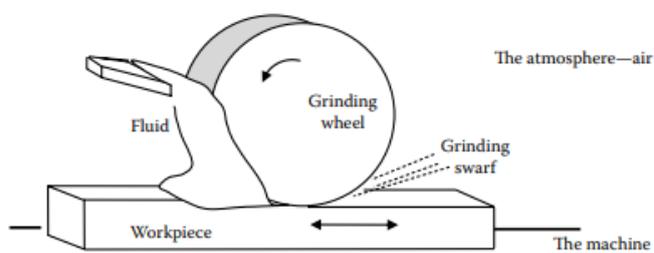


Figura 3. Elementos en una operación de rectificado [1].

Existe una gran cantidad de variantes dentro del rectificado, las cuales abarcan desde el tipo de máquina a emplear, ya sea plana o cilíndrica, o la estrategia a seguir, como frontal o tangencial, hasta tipo de diamantador, destacando los monopunta y los multipunta, o variaciones en los parámetros mencionados. En función de los requerimientos en la pieza, se seleccionarán las características necesarias para cada uno de los elementos y los parámetros mencionados previamente.

El proceso de rectificado se basa en el uso de partículas abrasivas de dureza elevada como mecanismo de corte, las cuales se aglutinan mediante un elemento aglomerante que las fija, obteniendo así la muela abrasiva, en la que se induce cierta porosidad, dependiendo de aspectos propios como su dureza o estructura, que posteriormente serán detallados en mayor medida [2]. El comportamiento de las muelas puede ser altamente flexible, dependiendo del material del abrasivo y el del aglomerante, entre otras cosas, por lo que es necesaria una selección en función de la aplicación. Los principales tipos de aglomerante incluyen el vítreo y el caucho, que son a los que se les prestará especial interés en el presente proyecto.

Entonces, para garantizar un proceso de rectificado adecuado es necesario controlar algunos parámetros, entre los que se destacan los siguientes [3]:

- Velocidad de corte (V_c). Es la velocidad tangencial de la muela, asociada al movimiento principal. Se expresa en metros por segundo, siendo la expresión para su cálculo la siguiente:

$$V_c = \frac{\pi * D * n}{60000} \quad (1)$$

- Velocidad de la pieza (V_w). Es la velocidad relativa entre el movimiento de la pieza y la muela, asociada al movimiento secundario. Se expresa en metros por minuto, y puede obtenerse de acuerdo a la siguiente expresión:

$$V_w = \frac{\pi * D * n}{1000} \quad (2)$$

- Avance (f). El avance representa la distancia que se mueve la muela respecto a la pieza por cada revolución, por lo que se representa en mm/rev. Para mayores avances, el rectificado se realizará más rápido, pero existe el riesgo de quemado de la pieza, por lo que debe controlarse con precisión dicho parámetro.
- Profundidad de pasada (p). Este parámetro es el principal encargado de la penetración de la muela en la pieza, puede considerarse el espesor a arrancar en cada pasada. La elección de la profundidad de pasada depende principalmente de la operación a realizar y el material a rectificar.

Lógicamente, existen gran cantidad de parámetros a parte de los destacadas, como pueden ser el caudal específico de viruta, el ratio de velocidades o el ratio de solapamiento, que, en función del tipo de rectificado a realizar, adquirirán mayor o menor importancia y complejidad de cálculo.

5.2 MUELAS ABRASIVAS

Como se ha mencionado, las muelas abrasivas son los elementos con los que se realiza el proceso de rectificado. Están constituidas por tres elementos principales (Figura 4), los granos abrasivos, el material aglomerante y una cierta porosidad. Por todo esto, pueden considerarse como materiales compuestos. Cada una de estas partes presenta una función concreta.

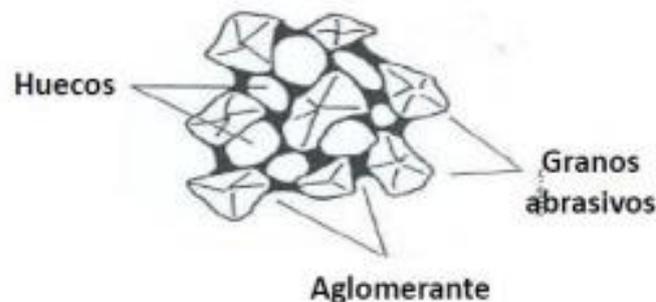


Figura 4. Estructura de una muela abrasiva [4].

Los granos abrasivos, constituyen el medio de corte principal de la muela, que puede ser de uno o varios tipos, mientras que el aglomerante además de unir y fijar los granos, ofrece rigidez y transmite esfuerzos, entre otras cosas [1]. Respecto a la porosidad de la muela, se encarga de suministrar el espacio necesario para el alojamiento de la viruta generada durante el proceso de rectificado que se esté llevando a cabo, hasta su evacuación, y de transportar lubricantes y refrigerantes. A continuación, se presentan los aspectos de mayor importancia dentro de una muela abrasiva, además del material del grano abrasivo y el aglutinante.

➤ Granos abrasivos

Los granos abrasivos son el principal elemento dentro de las muelas de rectificado. Se consideran micropartículas de una dureza extremadamente elevada, que mediante rozamiento realizan la abrasión del material rectificado [5]. Por esto, se puede considerar cada grano individualmente como una micro herramienta de corte. Existe un diverso abanico de tipos de abrasivos a emplear, pudiendo combinar varios de ellos en una única muela, pudiendo seleccionar uno u otro en función del material a trabajar, sus propiedades resistentes o las condiciones de trabajo, entre otros aspectos. Aun así, siempre debe cumplirse que la dureza del abrasivo deberá ser superior a la del material a rectificar, para poder desarrollar el proceso de una manera fructífera.

Principalmente, existen dos grandes grupos de materiales abrasivos, los convencionales y los superabrasivos. Los abrasivos convencionales son materiales sintéticos, más frecuentes en la industria, y poseen un uso mucho más extendido. Los dos más empleados son el óxido de aluminio (Al_2O_3), destinado al rectificado de materiales féreos a velocidades medias, y el carburo de silicio (SiC), para el rectificado de carburos, cerámicas, fundiciones y materiales no féreos.

En segundo lugar, se encuentran los denominados superabrasivos, fabricados con componentes más resistentes que las muelas convencionales. En este caso, se pueden distinguir las muelas de diamante, empleadas en operaciones de rectificado a altas velocidades de cerámicas y metal duro, y las de nitruro de boro cúbico (CBN), para rectificado a altas velocidades de materiales féreos de muy alta dureza y aleaciones termorresistentes.

➤ **Aglomerante**

El material aglomerante es otro de los elementos claves de una muela abrasiva, como se ha mencionado previamente [5]. Estos materiales tienen una serie de funciones: garantizar una correcta unión entre granos evitando la pérdida prematura de estos, desprender los granos que hayan perdido los filos de corte, ofrecer rigidez a la muela, transmitir las fuerzas generadas en el contacto al resto de la muela y a la estructura de la máquina, resistir las fuerzas de rectificado, temperaturas altas y ataques químicos, disipar calor...

El aglomerante tiene una gran influencia en el proceso de rectificado [1]. Las muelas que poseen un aglomerante impreciso y sin tratamientos térmicos se desgastan mucho más rápido que las que presentan uno bien endurecido y con alta precisión, perdiendo antes su geometría idónea. Existen cuatro tipos principales de aglomerante, entre los cuales se seleccionará en función de las propiedades requeridas para la aplicación en cuestión que se esté tratando. Estos son los aglomerantes resinoides, los metálicos, los vítreos y el caucho. En este proyecto, se centrará el interés en los dos últimos de ellos.

Los aglomerantes vítreos son los más extendidos en la industria, aplicables a gran cantidad de procedimientos, materiales y condiciones de trabajo [5], [6]. Poseen una serie de propiedades que les otorga un gran interés entre los fabricantes, como pueden ser su fácil control de la porosidad o resistencias. En segundo lugar, se encuentran los aglomerantes resinoides, fabricados en resinas termoestables. Presentan una porosidad baja y su flexibilidad es mayor, lo que los hace idóneas para muelas ductiles y arranques suaves.

Para el caso de los metálicos, se emplean en muelas superabrasivas en las que generalmente el aglomerante es en base Níquel. Presentan una porosidad prácticamente nula, lo que, combinado con la elevada fuerza de retención de granos, hace que su precio sea realmente elevado en comparación a los otros tipos. Por último, el aglomerante de caucho, de uso mucho más limitado. Al tratarse de un elastómero, presenta una gran viscosidad y elasticidad, lo cual hace que su tratamiento sea realmente complejo, precisando de operaciones y tratamientos especiales, entre los que se destaca la vulcanización.

➤ **Tamaño de grano**

La principal característica a estudiar referente a los granos es su tamaño . Este parámetro se representa mediante el tamaño medio, en micras, de los granos de la muela. En función del tamaño de grano, la muela presentará unas características diferentes, las cuales influirán en el acabado superficial reproducido en las piezas y su precisión, y el propio desgaste de la muela.

Como norma general, los granos grandes son capaces de arrancar mayor cantidad de material, obteniendo superficies de mayor rugosidad, pero su resistencia al desgaste es notablemente elevada [5]. Por ello, se emplean para operaciones de desgaste y de acabado superficial pobre. Por el contrario, los granos pequeños reproducen superficies de forma precisa, siendo menos agresivos para la muela, por lo que se usan para operaciones de acabado, de alta precisión y de acabado superficial bueno.

Tabla 1. Relación entre el acabado obtenido en la pieza y el tamaño de grano [5].

TAMAÑO DE GRANO (mm)	ACABADO OBTENIDO
4-10	Muy grosero
10-24	Grosero
30-60	Medio
70-180	Fino
200-600	Muy fino

➤ **Grado**

El grado o dureza de la muela está determinada por la resistencia que presenta el aglomerante para evitar el desprendimiento de las partículas abrasivas. El grado de una muela se indica mediante letras, siendo las letras iniciales para muelas más blandas, y las finales para más duras.

Tabla 2. Relación entre el tipo de muela y su grado [5].

GRADO	TIPO DE MUELA
A-E	Muelas extremadamente blandas
F-K	Muelas blandas
L-Q	Muelas de dureza media
R-T	Muelas duras
U-Z	Muelas extremadamente duras

➤ **Estructura**

La estructura de la muela se relaciona con la concentración volumétrica de material en esta, y está estrechamente ligado a la porosidad. Generalmente, las muelas abiertas se emplean para materiales blandos y operaciones de desbaste. Se caracterizan por tener una porosidad elevada para transportar refrigerante a la zona de contacto de la muela y prevenir el embotamiento de esta.

Por el contrario, las muelas cerradas se destinan a materiales frágiles y operaciones de acabado, variantes en las que la precisión y el acabado superficial adquieren especial interés. Las muelas con esta estructura no son adecuadas para eliminar grandes volúmenes de material, ya que no hay espacio suficiente para albergar la viruta generada.

Tabla 3. Relación entre el tipo de muela y su estructura [5].

GRADO	TIPO DE MUELA	POROSIDAD
1-3	Cerrada	Alta
4-6	Media	Media
7-9	Abierta	Baja
10-12	Muy abierta	Muy baja

➤ Designación normalizada

Las muelas se designan mediante un código identificativo en el que se indican las características previamente mencionadas [5] (Figura 5). Para materiales abrasivos convencionales, la designación normalizada es la siguiente:

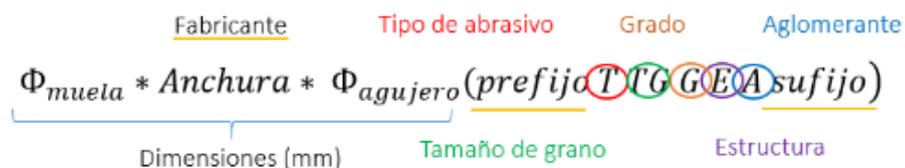


Figura 5. Designación para muelas de abrasivos convencionales [5].

Sin embargo, esta designación presenta varios inconvenientes. Por un lado, no es representativa para muelas de materiales superabrasivos, ya que presentan una nomenclatura propia de la empresa de fabricación. Por otro lado, no referencia los procesos llevados a cabo durante su fabricación, ni propiedades mecánicas de interés, aspectos realmente importantes de cara a la selección de una muela abrasiva sobre otras.

5.2.1 MUELAS VITRIFICADAS

Entonces, a lo largo del presente proyecto se estudiarán las probetas y muelas que emplean dos aglomerantes de los ya mencionados previamente. El primero de ellos es el aglomerante vítreo. Este es el más empleado de todos, debido al fácil control de la porosidad y la estructura, lo cual permite ajustar con gran facilidad la muela y sus propiedades resistentes a la aplicación a realizar, dotándola de una fácil eliminación del abrasivo. Esta clase de aglomerante puede ser empleado para trabajar la gran parte de los metales, son considerados de uso general [5].



Figura 6. Muela de aglomerante vítreo.

La adición de estos resulta en muelas rígidas y frágiles, con una porosidad fácilmente controlable, dotándole de un gran interés a nivel industrial. Gracias a su resistencia a altas temperaturas, y la insensibilidad a aceites y agua, son aplicables a gran parte de las operaciones de rectificado, desde desbastes y eliminaciones de rebaba, hasta rectificadas de alta precisión, donde se destaca su uso particularmente. Además, debido al auge de las muelas de superabrasivo CBN de los últimos años, su uso ha crecido en mayor medida, presentando actualmente un uso de más del 50% de los abrasivos convencionales.

Los aglomerantes vítreos se representan con la letra “V” [6], y existe una gran cantidad de ellos, que, en función de su composición química, adquirirán un comportamiento totalmente diferente. A nivel industrial, los empleados con mayor frecuencia son el Borosilicato y el Alkasilicato [1]. Estos materiales se caracterizan por poseer tanto un coeficiente de dilatación como una densidad muy inferior a otros aglomerantes convencionales. La implementación de estos como aglutinante dotará a la muela de una mejor resistencia al choque térmico y un menor peso, entre otras ventajas, puntos realmente importantes en el rectificado.

No obstante, para la obtención de una muela vitrificada abrasiva, es necesario desarrollar su procedimiento de fabricación [7], el cual implica la consecución de las siguientes etapas, de acuerdo a la Figura 7:

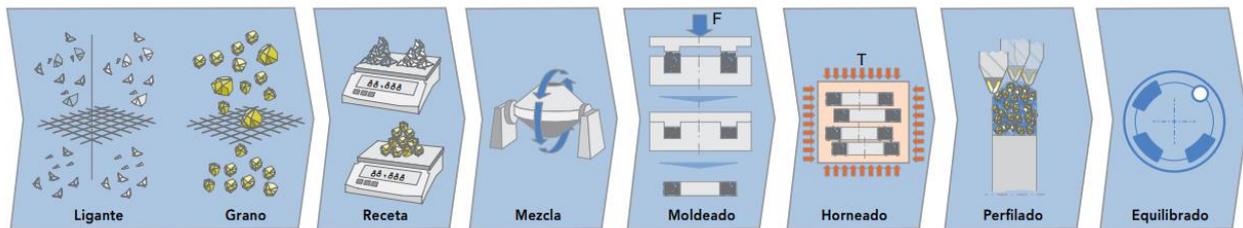


Figura 7. Etapas de fabricación de una muela vitrificada [7].

1. Inicialmente, tanto el grano bruto como el aglomerante en polvo son filtrados mediante tamices estandarizados, con los que se asegura que no posean tamaños excesivos, los que resultarían en una muela que no poseería las características precisadas para su operación.
2. A continuación, dichos materiales filtrados mediante tamices son pesados para garantizar la composición propia de la muela, realizando un posterior proceso de mezclado. En este aspecto, cuanto más fino sea el grano, mayores serán los recursos requeridos. Es importante controlar el proceso de mezclado, para evitar la formación de inclusiones, rechupes e impurezas internas indeseadas.
3. Dicha mezcla es prensada en moldes especiales, generalmente en forma de disco. La prensa a emplear variará en función del abrasivo y el aglutinante seleccionado para la muela.
4. Posteriormente, el producto es secado en hornos durante varias horas. En esta etapa, se emplean gases protectores para evitar la formación de óxidos en la mezcla.
5. La siguiente etapa consiste en dotar a la muela de su geometría final, para lo que se le aplica un procedimiento de perfilado, que le otorga un gran valor añadido a la muela abrasiva.
6. Por último, se realiza el equilibrado de la muela, en el que se compensa su composición interna y la disposición de los granos mediante pesos externos, para así garantizar su uso óptimo en las operaciones precisadas.

5.2.2 MUELAS DE CAUCHO

A la hora de hablar de aglomerantes para abrasivos, gran parte de la bibliografía se centra en vítreos, metálicos y resinoides. Estos son los más extendidos en la industria, son los que han sido empleados en mayor medida históricamente, destacando el vítreo entre ellos. Sin embargo, durante los últimos años, aparece un competidor a estos aglutinantes, el caucho. Precisamente, en el presente proyecto, es el aglutinante que será estudiado en mayor profundidad.

Dicho material presenta un tratado de mayor complejidad que los otros aglomerantes. Al ser un elastómero, posee una gran elasticidad y viscosidad, precisando así de tratamientos y operaciones especiales si se busca su implementación en una muela abrasiva. Entre estos destaca la vulcanización, un proceso químico basado en la unión de algún componente curativo y calor, de la cual se hablará posteriormente en mayor profundidad.

A pesar de la aplicación de dichas condiciones, no es un aglomerante empleable en todas las situaciones. Principalmente, se destina a la fabricación de muelas de corte delgadas. Generalmente, se emplea en aplicaciones de tronzado y rectificado de precisión, casos en los que se precise de poca temperatura de corte y se requiera de tratados fríos y suaves. Cabe destacar también la particularidad del rectificado sin centros, donde se considera este aglomerante de un interés especial en la fabricación de las muelas de arrastre.

En base a esto, y conociendo sus limitaciones, el caucho puede considerarse como una alternativa a los aglomerantes mencionados. Como se ha visto en el apartado previo, los principales parámetros de corte igualan o incluso mejoran los que se permiten en el resto de los aglutinantes, a lo cual se le añade propiedades propias del caucho como su elasticidad, que bien es cierto que durante la fabricación son un inconveniente, de cara al empleo en la industria, posibilitan una mejora en el tiempo de rectificado o incluso en el comportamiento de la muela.



Figura 8. Muela de aglomerante de caucho.

La obtención de una muela con aglomerante de caucho es análoga a una vítrea, con una diferencia, se añade la etapa de vulcanización, la cual modifica sus propiedades, gracias a la cual puede incluirse en el grupo de los elastómeros termoestables [8].

El elastómero que lleva más tiempo en uso es el poliisopreno, el polímero que constituye el caucho natural, fabricado a partir de latex [10]. Este presenta un gran interés a nivel industrial, a pesar de competir con ciertos materiales sintéticos, como el caucho de butadieno o ciertos derivados del petróleo y gas natural.

Las principales propiedades de estos materiales son la elasticidad y la viscosidad [10]. Por un lado, presentan una gran elasticidad, la cual le otorga la capacidad de volver a su forma original después de ser traccionados o comprimidos debido a un esfuerzo, con lo que se consigue gran resistencia a la rotura y la aparición de grietas de fractura. Por otro lado, son muy viscosos, con capacidades de absorción de energía similares a ciertos líquidos de gran viscosidad.

Estos dos factores hacen que los elastómeros puedan preservar su forma original a pesar de los esfuerzos a los que se someten, lo cual sumado al hecho de poder absorber una gran cantidad de energía mecánica, lo convierte en un material a considerar para realizar la función de aglutinante en una muela de rectificado. Estas son consideradas sus propiedades más características, que variarán con la temperatura y la tensión, siguiendo siempre la Ley de Hooke [9].

El caucho pertenece al grupo de los elastómeros termoestables, que son el tipo más común. Se caracterizan por poseer resistencia al calor, de forma que no se funden al calentarse. Además, también soportan condiciones ambientales como la humedad y el vapor. Sin embargo, para formar parte de este grupo, precisa de un proceso de vulcanización, el cual modifica sus propiedades.

➤ **Ensayos normalizados para elastómeros vulcanizados**

Los elastómeros vulcanizados, como es el caso del caucho, industrialmente son verificados de acuerdo a una serie de ensayos, para conocer así su durabilidad. Existe una gran cantidad de posibilidades de ensayo a realizar, agrupados en varias categorías. La selección de uno u de otro dependerá de la aplicación a la que se destinará el material en cuestión, y las propiedades requeridas [9]. Los ensayos más destacados son los agrupados en la Tabla 4. Cada uno de los ensayos se plantean siguiendo la normalización asociada, consiguiendo así unos resultados concretos para cada caso. De esta forma, será posible la combinación de ensayos, o al menos, la sucesión de ellos, con el fin de obtener el producto precisado para cada aplicación.

Tabla 4. Ensayos normalizados en elastómeros vulcanizados [9].

CATEGORÍA	ENSAYO	NORMALIZACIÓN	RESULTADO
Preparación del elastómero	Curado	ISO 4661	Probetas vulcanizadas
	Acondicionamiento	ISO 23529	Estabilización de las probetas
Ensayos mecánicos	Ensayo ambiental	ISO 23529	Material a $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ con humedad relativa de $50 \pm 5\%$
	Dureza	ISO 48 / ISO 7619	Valor de dureza según diferentes escalas
	Tracción y compresión	ISO 37 / ISO 7743	Alargamiento, rigidez, resistencia...
	Cortadura	ISO 1827	Límite de rotura a cortante
Ensayos térmicos	Análisis mecánico dinámico	ISO 4664	Módulo y amortiguación en función de la temperatura
	Test de Gehman	ISO 1432	Rigidez torsional relativa a $\leq 23^{\circ}\text{C}$
	Temperatura de retracción	ISO 2921	Temperatura a la que el material se recupera del alargamiento
	Temperatura de fragilización	ISO 812	Temperatura a la que el material no rompe al ser golpeado
Ensayos de durabilidad	Fatiga dinámica	ISO 132 / ISO 4666 / ISO 6942	Resistencia a fatiga por flexión y alargamiento
	Abrasión	ISO 4649	Resistencia a abrasión
	Resistencia a agentes	ISO 1817 / ISO 1431	Resistencia a líquidos (aceites, combustibles, agua ...) y a ozono
	Relajación	ISO 3384-1	Disminución en la contrapresión a tracción o compresión
	Envejecimiento por calor	ISO 188	Cambio en la dureza después de semanas en hornos
Otros ensayos	Dispersión	ISO 11345	Grado de granulación del refuerzo del elastómero
	Determinación de azufre	ISO 7269	Cantidad de azufre depositado en la vulcanización
	Permeabilidad	ISO 6179 / ISO 2782	Velocidad y medio de difusión de líquidos y gases en el elastómero

No obstante, esta normativa de ensayo es destinada principalmente al trabajo y desarrollo del caucho como objeto de estudio. En el caso de las muelas abrasivas, no existe estandarización para ser ensayadas.

5.2.3 USO DE MUELAS DE CAUCHO

En este punto, se tratarán los aspectos que aportan atractivo a una muela de caucho a nivel industrial, los procedimientos en los que se emplean, los productos que pueden llegar a producir, sus condiciones de trabajo, o incluso sus diferenciaciones frente a otras muelas.

➤ Tipo de procesos, acabados y piezas

Los aglomerantes de caucho se obtienen o bien del caucho natural, que es endurecido siguiendo el proceso de vulcanización, o bien del caucho sintético, que procede de la polimerización de las diolefinas derivadas del petróleo [11]. Cabe mencionar que son indicados con una “R” en la denominación de la muela, generalmente.

Existen varios tipos, pero los más empleados son tres. Por un lado, el aglomerante R51, de empleo común en las muelas destinadas al rectificado sin centros. Por otro lado, el aglomerante R20 y el R30, seleccionados en los casos que se destina el producto al ranurado, empleando granos más finos, casos en los que el acabado y la calidad del corte son de mayor importancia [11].

Estos aglomerantes se utilizan en muelas muy delgadas, en procesos en los que se precisa poca temperatura de corte, como puede ser también el tronzado. Además, son una gran elección en rectificadores fríos y suaves [6], [12].

En base a esto, las principales piezas obtenidas empleando estos aglomerantes son las abarcadas por estos procesos productivos. El abanico de piezas a fabricar es ciertamente amplio, ya que son procesos industrialmente muy destacados. Entre ellos, se destacan ejes para amortiguadores, horquillas de suspensión, cremalleras de dirección, varillas de unión, culatas o cigüeñales [12], [13]. Como puede observarse, el principal destinatario de estas muelas es el sector automovilístico. Dicha industria emplea materiales que ofrezcan altos rendimientos, soportando cargas variables bajo costes competitivos. Por ello, los acabados superficiales son muy exigentes, haciendo que una mejora de algunas micras pueda aumentar la vida útil del producto más de una década. Se precisa de una gran precisión en estos, y generalmente se acompañan de tratamientos superficiales, después de su rectificado.

➤ Parámetros de corte

Para estudiar los parámetros de corte empleados en las muelas de caucho, se realizará una comparación entre los valores recomendados para las muelas de *Abrasivos Manhattan*, y otras que dispongan de aglomerante vítreo, de otros fabricantes [13], [14], [15]. Se tratarán los valores para un caso de rectificado cilíndrico, estudiando los parámetros en los que puede llegar a interferir la variación del tipo de aglutinante, se muestran en la Tabla 5. Se han seleccionado únicamente los parámetros a los que se les atribuyó un mayor interés previamente, y estos son la velocidad de corte, la velocidad de la pieza, la profundidad de pasada y el avance.

Tabla 5. Comparativa entre parámetros de una muela de caucho frente a una vítrea.

PARÁMETRO	CAUCHO		VÍTREO	
	Desbaste	Acabado	Desbaste	Acabado
Velocidad de corte recomendada (m/s)	35-45	35-45	20-35	20-35
Velocidad de corte máxima (m/s)	50	50	40	40
Velocidad de la pieza (m/min)	20-30	20-30	10-20	6-10
Profundidad de pasada (mm)	0,06	0,005	0,05	0,005
Avance (mm/rev)	0,5A-2A	0,1A-0,4A	0,5A-1,5A	0,1A-0,3A

Según se observa en dicha tabla, el avance está ligado a un parámetro “A”, haciendo este referencia a la anchura de la muela. De acuerdo a los valores mostrados, los permitidos por el caucho mejoran en la mayoría de los casos los del vítrea. De forma común tanto para la velocidad, ya sea la de corte o la de la pieza, como para el avance o la profundidad de pasada, el caucho posibilita un rectificado más rápido que el vítrea, adquiriendo una mayor tasa de arranque de material, y capacitando a la muela para la realización del procedimiento en un menor número de pasadas.

Todo esto es debido principalmente a sus propiedades elastoméricas, con las cuales dota a la muela abrasiva de una mayor resistencia y capacidad para soportar impactos. Con todo ello, se logrará reducir el tiempo de rectificado precisado en la operación, aspecto de vital importancia en la industria.

Cabe recordar que estos parámetros son orientativos, de un fabricante a otro, e incluso de una muela a otra, los valores presentan gran variabilidad, por lo que sólo pueden considerarse una estimación de uso general.

➤ **Fabricantes de muelas de caucho**

A diferencia de otra clase de aglomerantes, el uso del caucho como aglutinación de la muela no está tan extendido a nivel industrial. Ya sea por sus complejas propiedades, o por sus difíciles tratamientos, no es realmente considerado como una opción productiva en el sector del abrasivo.

Principalmente, se destacan dos fabricantes en el empleo del caucho. Por un lado, *Abrasivos Manhattan* (Figura 10), empresa española especializada en el rectificado sin centros. Sus procedimientos de fabricación están, en gran medida, destinados a la obtención de muelas abrasivas de precisión, ya sean para desbaste, acabado e incluso súper-acabado. Sin embargo, no se limitan a esto, ya que, de acuerdo a sus catálogos, también disponen de amortiguadores, cremalleras direccionales u horquillas de suspensión, entre otros productos [13].



Figura 10. Logo de Abrasivos Manhattan [13].

Por otro lado, el fabricante alemán *Artiflex* (Figura 11). Centrado su interés en la obtención de muelas abrasivas, estas presentan una amplia variedad de materiales y propiedades. Disponen de granos de óxido de aluminio, garnet o carburo de silicio, en las cuales emplea a modo de aglutinante caucho, resinas o poliuretano. De esta forma, se posibilita la obtención de muelas totalmente diferenciadas entre sí, gracias al empleo de diversos materiales, resultando en un amplio rango de propiedades mecánicas en función de las exigencias de la aplicación [16].



Figura 11. Logo de Artiflex [16].

En el presente trabajo, se realizarán ensayos de flexión a 3 puntos sobre probetas obtenidas de una muela de caucho de Abrasivos Manhattan, que serán detallados próximamente en mayor profundidad.

5.3 CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO

A continuación, se prestará atención al comportamiento mecánico de diferentes grupos de materiales, estudiando los frágiles y los cuasi-frágiles, para llegar así a la particularización de las muelas abrasivas. Además, se tratarán los principales tipos de ensayos para conseguir su caracterización.

5.3.1 MATERIALES FRÁGILES

Inicialmente se realizará un estudio del comportamiento mecánico de los materiales frágiles, ya que puede considerarse un buen punto de partida para los cuasi-frágiles, debido a sus semejanzas. Este tipo de materiales se caracteriza por poseer una primera deformación elástica, seguida de un fallo frágil instantáneo, que se da al alcanzar su tensión elástica máxima [17]. Además, presentan una mayor resistencia a la compresión que a la tracción, siendo de 5 a 8 veces dicho valor, aproximadamente. En la Figura 12 puede verse el fallo instantáneo, dado en una deformación muy inferior a la soportada por cualquier material dúctil, que alcanzan un estado de plastificación al sobrepasar el valor de tensión elástica máxima, consiguiendo un gran aumento en la deformación sin necesidad de incrementar la carga.

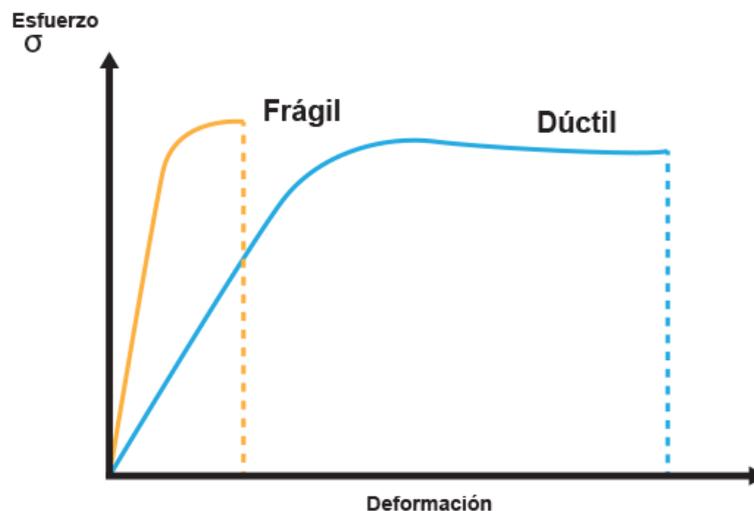


Figura 12. Curva Tensión-Deformación de un material frágil frente a uno dúctil [17].

Los materiales frágiles, generalmente, llegan a la rotura a través de una fractura frágil, que es súbita y catastrófica, caracterizada por una propagación rápida y espontánea de la grieta [18]. Esta clase de fractura presenta una deformación plástica nula o muy baja en los alrededores de la grieta, como se ve en la Figura 13, y se caracteriza por la aparición de marcas en forma de V y crestas en forma de abanico desde el punto de rotura. Una vez se inicia la grieta, esta crece rápidamente, sin precisar de un aumento de la tensión de rotura. Por ello, es preferible la consecución de una fractura dúctil en un material, ya que con la aparición de la deformación plástica pueden tomarse medidas para la rotura.

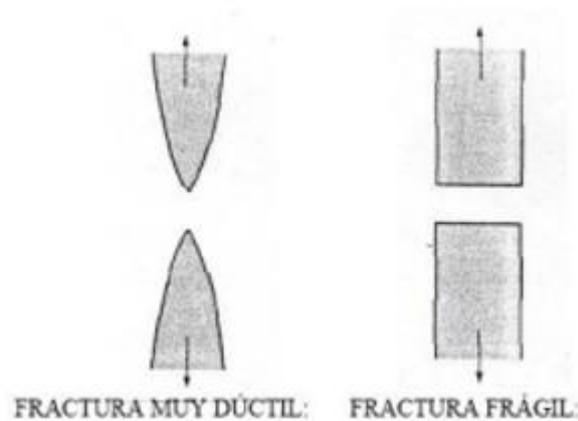


Figura 13. Fractura frágil frente a dúctil [18].

Las principales propiedades de estos materiales vienen definidas por el módulo de Young, el módulo de rigidez, el módulo de cizalladura y el coeficiente de Poisson, parámetros que se relacionan entre sí mediante las siguientes expresiones:

$$\nu = \frac{E}{2G} - 1 \quad (3)$$

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)} \quad (4)$$

Siendo:

- ν El coeficiente de Poisson
- E el módulo de elasticidad o de Young
- G el módulo de cizalladura
- K el módulo de rigidez

A temperatura ambiente, estos materiales se rigen según la Ley de Hooke, que verifica la relación lineal entre la tensión aplicada y la deformación hasta la fractura. De acuerdo a esta ley, se cumplen las siguientes expresiones:

$$P = K \Delta L \quad (5)$$

Siendo:

- P la fuerza aplicada
- ΔL la deformación previa a la rotura

De acuerdo a la teoría de Griffith, la resistencia de este tipo de materiales depende en mayor medida de los posibles defectos estructurales que pueden haberse desarrollado, ya sean poros o fracturas, que de las fuerzas de unión interatómicas [19]. Esto se debe a que inducen concentraciones de tensiones de gran influencia. Debido a esto, la resistencia real de los materiales frágiles es inferior a la teórica.

$$\sigma_f \sqrt{a} = \sqrt{\frac{EG}{\pi}} \quad (6)$$

Siendo:

- σ_f la tensión en la grieta
- a la semilongitud de la grieta

5.3.2 MATERIALES CUASI-FRÁGILES

Los materiales cuasi-frágiles se caracterizan por presentar un comportamiento intermedio entre los materiales frágiles y los dúctiles. Entonces, para conocer dicho comportamiento mecánico en profundidad, puede estudiarse su curva tensión-deformación. Inicialmente presentan un endurecimiento por deformación con un tramo no lineal (O-B), que se divide en un primer comportamiento elástico (O-A), con una posterior etapa de formación de micro-grietas (A-B). Seguidamente, se da un ablandamiento post-pico hasta que se alcanza la rotura (B-C-D) [20]. Este proceso puede verse representado en la Figura 14.

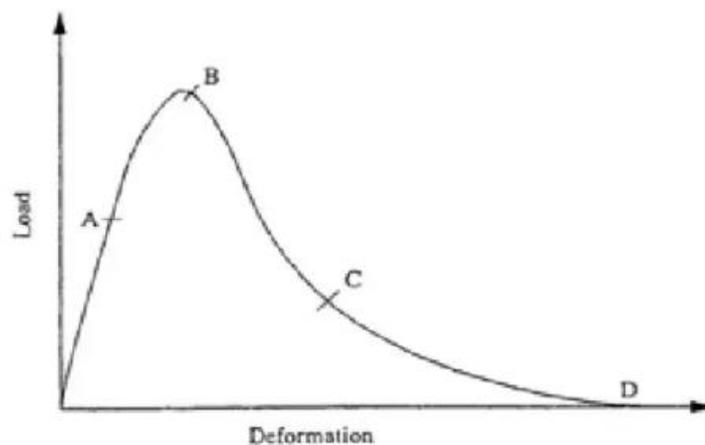


Figura 14. Curva Tensión-Deformación de un material cuasi-frágil [21].

Generalmente, los materiales cuasi-frágiles muestran una deformación medible antes de llegar al fallo. Sin embargo, esta no está asociada al movimiento de dislocación. Al presentar zonas de no linealidad en su curva clásica de tensión-deformación, las grietas dadas en el material comienzan a crecer, resultando en agrietamientos nuevos. Estos materiales se caracterizan por un reblandecimiento después del pico de carga, asociado con el crecimiento de grieta previo a la fractura final. Aun así, estos materiales no tienen por qué presentar un aspecto diferente a otros que fallan siguiendo una fractura frágil.

La caracterización del comportamiento de materiales cuasi-frágiles está principalmente destinado a cerámicas, hormigón y rocas porosas, por lo que presenta un gran interés en el sector de la construcción. La composición de estos materiales podría presentar un carácter similar al de las muelas abrasivas convencionales, pero esto será estudiado en mayor profundidad posteriormente. Estos materiales mencionados fallan por la propagación de un conjunto de fisuras (Figura 15), resultantes en una macro-grieta, que es el principal causante de su fractura [18].



Figura 15. Fractura de material cuasi-frágil [18].

Consecuentemente, el estudio de los materiales cuasi-frágiles es más complejo, ya que varía de frágil a dúctil. Para modelar dicho comportamiento, suelen emplearse modelos matemáticos y teóricos que precisan de un mayor coste operacional, capaces de predecir los cambios de comportamiento sufridos por los modos de fallo de dicho material. En este sentido, la mecánica computacional adquiere gran interés, pudiendo tratar metodologías basadas en elementos finitos, energía de fractura o plasticidad.

Bien es cierto que las expresiones matemáticas presentadas para los materiales frágiles siguen siendo válidas, a las que se les suman las propias de los materiales dúctiles. Sin embargo, para los materiales cuasi-frágiles, no van a presentar tal precisión, ya que su comportamiento adquiere una gran complejidad de estudio, resultando en estimaciones.

5.3.3 PRINCIPALES TIPOS DE ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN

A continuación, se presentan los diferentes tipos de ensayos a realizar para desarrollar una caracterización de la pieza, ya sea mecánica o dinámica.

➤ Ensayos estáticos: Ensayos de 3 o 4 puntos

En primer lugar, se tratarán los ensayos estáticos. Cabe mencionar que no son tan aplicados para realizar la caracterización de los materiales propios de una muela abrasiva, a excepción de dos, que serán tratados con especial interés. Este tipo de ensayos son globalmente más conocidos, ya que se emplean a nivel industrial en gran cantidad de sectores y aplicaciones. Generalmente, son ensayos sencillos de desarrollar y emplean instrumentación simple que no supone una gran inversión económica. Sin embargo, son ensayos destructivos, lo cual hará que precisen de gran cantidad de probetas o materiales de ensayo, lo cual incrementará el coste.

Se centrará el interés en los ensayos de flexión, que son los empleados en la metodología desarrollada, pero es importante conocer la existencia de otros, como los de tracción/compresión simple o los de torsión. Los ensayos de flexión son aquellos en los que se aplica una fuerza en la zona central de la probeta de estudio, generalmente de forma perpendicular a la superficie de incidencia. La probeta es sustentada en varios puntos de apoyo, con el fin de obtener la deformación lateral. Existen varios tipos, dependiendo de la forma de aplicación de la carga y los apoyos, siendo los más empleados los de uno, tres y cuatro puntos. En este caso, son estos dos últimos tipos de ensayos, los de 3 y 4 puntos (Figura 16), los que adquieren especial relevancia en estos materiales, como se ha introducido previamente [21]. La sencillez de este tipo de ensayos, sumado al bajo coste de las probetas, hace que sean muy empleados de cara a tratar el sector cerámico, mediante los cuales se permite calcular la tensión de rotura y el módulo elástico. Generalmente, es preferible la realización del de 4 puntos sobre el de 3, debido a que la tensión máxima se da en una superficie mayor en la región central, lo cual se observa en el diagrama tensional que adquiere este ensayo.

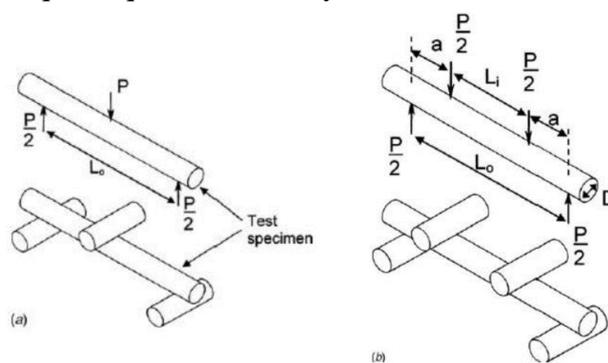


Figura 16. Ensayos de 3 y 4 puntos [21].

Estos ensayos se basan en la teoría de la viga simple, con la que se asume que el material es isótropo y homogéneo, los módulos elásticos a tracción y compresión son iguales y el material es linealmente elástico. Sin embargo, las muelas abrasivas no presentan estas características. La disposición de los granos y los poros es ciertamente aleatoria dentro de ellas, por lo que no se puede garantizar dicha isotropía y homogeneidad. Además, en función del abrasivo y el aglomerante trabajado, el comportamiento a tracción y compresión no debe por qué ser igual.

Cabe mencionar que mediante la norma ASTM C1684 “Standard Trest Method for Flexural Strength of Advanced Ceramics at Ambient Temperature-Cylindrical Rod Strength” se establecen las condiciones para la realización de estos ensayos en materiales cerámicos, donde se incluye el aglomerante vítreo, empleando probetas cilíndricas. La norma incluye una serie de recomendaciones, pero permite variaciones en las configuraciones. De acuerdo a esta, la tensión máxima se puede obtener de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\sigma = \frac{8PL}{\pi D^3} \quad (7)$$

Siendo:

- P la carga máxima aplicada
- L la longitud de la probeta
- D el diámetro de la probeta

Sin embargo, son ensayos con gran dispersión en los resultados, por lo que se recomienda la realización de varias pruebas experimentales. Por ello, se emplea la distribución acumulada de Weibull para la caracterización de estas pruebas, ya que refleja la dispersión en los valores resistentes entre probetas diferentes [22]. Esta se analiza de la siguiente manera:

$$F = 1 - \exp - m_w \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right) \quad (8)$$

Siendo:

- m_w el módulo de Weibull
- σ_0 la resistencia característica de Weibull
- σ el valor tensional previamente calculado

El parámetro m indica variabilidad en el valor de la resistencia, a mayor valor, mayor será la homogeneidad en los resultados. Este valor, junto a σ_0 , se estima de acuerdo a la norma ASTM C1239-07: “Standard Practice for Reporting Uniaxial Strength Data and Estimating Weibull Distribution Parameters for Advanced Ceramics”.

➤ Ensayos dinámicos

Por otro lado, también es posible emplear ensayos dinámicos para la caracterización de los compuestos cerámicos con aglomerante vítreo, en los que se relacionan sus propiedades elásticas y el comportamiento dinámico. Son ensayos no destructivos y fáciles de realizar, en los que los tiempos de medición son realmente bajos comparados con los estáticos mencionados previamente. Principalmente, son empleados para la obtención del módulo elástico o de Young del material.

Existen tres tipos principales, en función de las frecuencias alcanzadas, los ensayos de frecuencia baja (0.2 - 1000 Hz), los de frecuencia media (100 Hz - 5 MHz), y los de frecuencia alta (1 MHz - 1 GHz). Entre estos tres, destacan los de frecuencia media, también conocidos como métodos de resonancia dinámica, que se basan en el fenómeno de la onda estacionaria. Se caracterizan por mantener una vibración forzada a tensión constante, de frecuencia variable, e implican la excitación de modos de vibración longitudinales de flexión en una barra uniforme [23].

Estos ensayos pueden realizarse con dos tipos de instrumentaciones principalmente, induciendo variaciones en la tipología del procedimiento. Por un lado, el “Sonic comparator” y el “Grindo-Sonic” (Figura 17), son ensayos basados en la detección de una frecuencia natural del material ensayado, los compuestos cerámico-vítreos. Realizan un análisis modal experimental, para obtener así el módulo de elasticidad.



Figura 17. Grindo-Sonic [24].

Por otro lado, el “Ultrasonic Grader” (Figura 18), es un ensayo basado en la detección de la velocidad de transmisión de pulsos ultrasónicos. Debido a esto, el módulo elástico calculado no es atribuible a la totalidad del espécimen estudiado, simplemente a la zona atravesado por el pulso, por lo que no resultan tan empleados.



Figura 18. Ultrasonic Grader [25].

Existe una norma que establece una estandarización en un ensayo para la obtención del módulo de Young en materiales vítreos, se trata de la ASTM E1876: “Standard Test Method for Young’s Modulus, Shear Modulus and Poisson’s Ratio for Glass and Glass-Ceramics by Resonance”, y es aplicable a materiales vítreo-cerámicos que sean elásticos, homogéneos e isotrópicos. En este ensayo se emplea un transductor que transforma la señal eléctrica en vibración mecánica, para excitar así la probeta de estudio. Mediante un segundo transductor, que realiza el procedimiento inverso, se conoce la resonancia. Además de esto, el hecho de conocer las propiedades másicas de la probeta, es posible obtener el módulo elástico y el de cizalladura del material trabajado.

➤ Brazilian Test

A nivel industrial, uno de los ensayos más empleados para la caracterización de materiales frágiles y cuasi-frágiles es el Brazilian Test (Figura 19), principalmente usado en hormigón, rocas y cerámica [26]. Debido a las similitudes de las muelas vitrificadas con el hormigón y las cerámicas compuestas, también resulta una tipología de ensayo aplicable a estas.

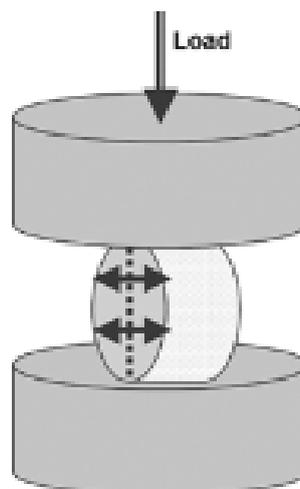


Figura 19. Brazilian Test [27].

La prueba se basa en la aplicación de una carga radial que comprime una probeta cilíndrica en forma de disco, generando una combinación de esfuerzos de tracción y compresión. Siempre sucede que las probetas quedan traccionadas en la zona central, y comprimidas en las zonas laterales del disco. Al estar trabajando con probetas de alto volumen, el acabado superficial y las calidades de estas tienen una influencia reducida en el ensayo, lo cual consecuentemente, otorga una menor dispersión entre pruebas diferentes.

Se trata de un ensayo sencillo de realizar, en el que se obtiene la resistencia a tracción del material en función de una serie de parámetros. Siendo:

- σ_t la resistencia a tracción
- P la carga aplicada
- t el espesor de la probeta
- R el radio de la probeta

$$\sigma_t = \frac{P}{\pi R} \quad (9)$$

El Brazilian Test es un ensayo globalmente muy extendido, bien es cierto que no presenta tanto reconocimiento como los ensayos de 3 y 4 puntos, que se tratan de particularizaciones de ensayos de flexión, empleados en muchos sectores industriales. Es ampliamente utilizado para el estudio de las tensiones de rotura y de propagación de grieta en materiales frágiles y cuasi-frágiles, particularizándose para enfoques analíticos, numéricos e incluso experimentales [26].

➤ **Ensayo Knoop**

Dejando a un lado los ensayos para la caracterización del material, existen también técnicas para conocer su dureza, la cual se entiende como la resistencia que opone a la deformación permanente, ya sea por penetración, ralladura o abrasión, entre otras. Cabe mencionar que mediante estos ensayos se obtiene la dureza superficial del material de estudio, no se trata de pruebas de caracterización de propiedades resistentes.

Los ensayos más empleados en la industria son los ensayos Brinell, Rockwell, Vickers y Knoop (Figura 20), pero para el caso de cerámicas compuestas se destaca el uso de este último sobre los demás, principalmente debido a que las grietas dejadas en el ensayo son más sencillas de medir, tanto en longitud y tamaño, como en dispersión entre pruebas. Se trata de una variante del ensayo Vickers para materiales vítreo-cerámicos, en el que se emplea un indentador de diamante romboédrico, que aplica una carga normalizada en la superficie del material durante cierto tiempo. Posteriormente, se miden las diagonales de la huella mediante un microscopio, que, a diferencia de los ensayos previos, no poseen el mismo valor, y se obtiene la dureza Knoop (HK) [28]. Debido a que este valor estará condicionado por el valor de la carga empleado, se indicará también en el resultado.

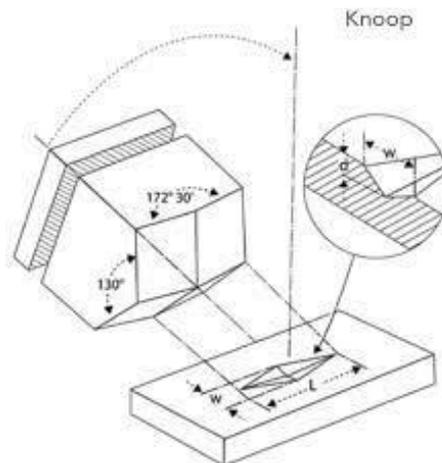


Figura 20. Ensayo de dureza Knoop [29].

Comparado con ensayos similares, se trata de un proceso caro, ya que precisa de un microscopio de alta potencia, y lento, puesto que requiere de un mayor tiempo de preparación, que incluye limpieza y lubricación. Al emplear cargas altas puede darse una gran cantidad de grietas que dificulte la lectura de la huella, mientras que con cargas bajas surgen problemas relacionados con la incertidumbre al tratarse de un tamaño tan pequeño y a la relación entre carga y dureza. Considerando esto, se busca trabajar con indentaciones grandes, pero sin llegar a darse un agrietamiento excesivo que condicione la medición. Todo esto, y los ensayos Knoop en general, se detallan en la norma ASTM C730 “Standard Test Method for Knoop Indentation Hardness of Glass”

5.3.4 CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE MUELAS ABRASIVAS

Habiendo presentado los materiales frágiles y cuasi-frágiles, se analizará el comportamiento propio de las muelas abrasivas. Bien es sabido que estas disponen de cierto porcentaje de porosidad, que variará en función de las propiedades de la propia muela. Estos poros influirán en las resistencias del material, reduciendo dichos valores, ya que reducen la sección útil de la muela, puesto que actúan de forma análoga a como lo harían los rechupes o inclusiones internas, pero son imprescindible en el desarrollo del proceso de rectificado. Los granos abrasivos permiten dislocaciones entre enlaces atómicos, sin embargo, la implementación del aglomerante las imposibilita, por lo que presentan comportamiento no dúctil. Por todo ello, las muelas vitrificadas se ajustan ciertamente a materiales frágiles, pero no es del todo así.

Sin embargo, este tipo de muelas abrasivas son un tema complejo de estudio. Por un lado, cada muela es diferente, por lo que precisará de una caracterización particularizada, ya que son fabricadas de forma personalizada para cada operación y sus condiciones. Por otro lado, se trata de cerámicas porosas, pertenecientes a los materiales cuasi-frágiles, de propiedades intermedias entre los frágiles y los dúctiles, resultando en que no se disponga de una normalización de ensayo para las muelas abrasivas [30]. Debido a ello, se suelen asemejar con el hormigón (Figura 21), que presenta una composición de carácter similar a estas muelas. Estos materiales se caracterizan por romper con la idea de propagación convencional de las micro fisuras propias de materiales frágiles, ya que se unen en una única grieta por la que termina fallando la probeta. En su curva tensión-deformación se dan tres etapas, que serán detalladas posteriormente. Para la caracterización de estos materiales, especialmente las muelas vitrificadas, es preciso obtener los valores del módulo de Young, tensión última de rotura y tenacidad a la fractura, para lo que se emplearán diferentes ensayos y procedimientos, entre los que destacan los ensayos de 3 y 4 puntos y el Brazilian test.

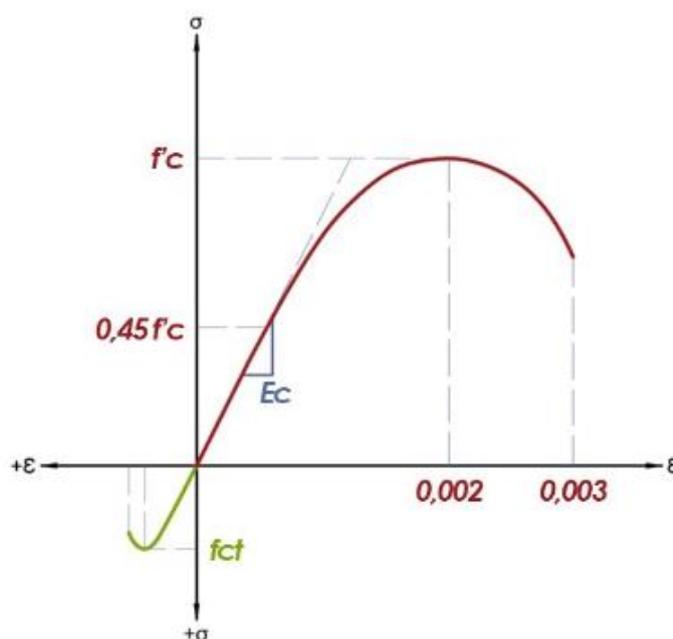


Figura 21. Curva Tensión-Deformación del hormigón [31].

El hormigón es un material compuesto empleado en el sector de la construcción, principalmente formado por un aglomerante al que se le añaden áridos, agua y ciertos aditivos. El aglomerante suele ser cemento mezclado en cantidades adecuadas con agua, para así desarrollar la reacción química conocida como hidratación, donde se puede dar porosidad. Entonces, pueden establecerse ciertas similitudes entre el hormigón y las muelas abrasivas. Por un lado, los áridos son el componente de mayor dureza del compuesta, presenta elevadas propiedades mecánicas y está estrechamente ligado a la definición de la clase de hormigón, principalmente por su tamaño. Por ello, se puede considerar el equivalente a los granos abrasivos. Por otro lado, el cemento ejerce de aglomerante del hormigón, cohesionando el material y transmitiendo correctamente los esfuerzos sufridos a los áridos, labor destinada al aglomerante en la muela abrasiva. Además, durante la fabricación del hormigón, se siguen etapas análogas a las ya presentadas previamente para las muelas abrasivas.

Entonces, para la caracterización del comportamiento del hormigón suele recurrirse a ensayos de flexión, en los que se realizan diferentes ensayos variando la porosidad, características de la hidratación, tamaño y tipología de árido, inclusión de refuerzos internos o métodos de secado. Los métodos más empleados son los ensayos de 3 y 4 puntos, estandarizados por las normas ASTM C78 y ASTM C293, respectivamente. Considerando las similitudes de estudio entre dicho material y las muelas abrasivas, sumado a las analogías en sus composiciones, es el por qué suelen asemejarse dichos materiales.

Por ello, en el presente proyecto se trabajarán los ensayos de flexión de 3 puntos como medio para la caracterización de las muelas abrasivas, en este caso de aglomerante de caucho.

6 PROBLEMÁTICA A ESTUDIAR

Históricamente, las muelas de aglomerante vítreo han sido ampliamente estudiadas, se conocen sus propiedades en gran medida, y es posible predecir su comportamiento de una manera precisa, dotando a las muelas que lo emplean de un interés especial en la industria. Sin embargo, la situación es totalmente diferente con el aglutinante de caucho. Se trata de un elastómero complejo de tratar, su elevada elasticidad hace que la fabricación de las muelas sea especialmente compleja, requiriendo de equipos especializados para ello.

En base a esto, *Abrasivos Manhattan* se decidió por estudiar en profundidad dicha tipología de muela, y durante años han trabajado en ello, llegando a ser líderes del sector. Sin embargo, debido a aspectos ambientales, las composiciones y componentes del caucho cambian constantemente, lo cual resulta en un problema para la empresa, ya que se producen cambios notables en el comportamiento del material. Además, en ciertas muelas incluyen un núcleo de resina epoxi, con el fin de mejorar las propiedades mecánicas de la muela, que sumado al exterior de caucho, induce una mayor variación y variabilidad en las propiedades mecánicas de la muela. A simple vista, no será posible conocer la zona del fallo, ya que influirán una gran cantidad de variables. Se estima el fallo en la unión epoxi-muela, debido al cambio drástico de material, haciéndolo una de las zonas críticas de la muela, donde será realmente sensible a esfuerzos.

Por ello, el fabricante busca conocer las propiedades individuales del núcleo resinoso y la parte de caucho, además del comportamiento conjunto de ambas, es decir, la muela en sí. Con esto, se podrá estudiar la influencia de la inclusión del núcleo en la herramienta de corte. Además de esto, también buscan el estudio sin la introducción del núcleo, de las muelas que emplean caucho en su totalidad.

Por otro lado, bien es sabido que el mercado está continuamente en desarrollo, obteniendo nuevas tecnologías de fabricación, normativas, e incluso variaciones en composiciones de material o producto. Por ello, *Abrasivos Manhattan* busca adaptarse a dichas evoluciones, para así tratar mano a mano con los competidores del sector y consecuentemente, superarles. Tratarán así de hacer frente a una modificación del número de componentes de la muela, buscando una reducción de estos, con el fin de hacer que su producción, fabricación, y materiales presenten un menor coste, facilitando el procedimiento.

Entonces, a lo largo del proyecto se buscará solventar la problemática planteada por el fabricante, estudiando el principal objetivo, desarrollar una metodología de ensayo eficaz que permita una caracterización rápida y fiable de muelas abrasivas con aglomerante de caucho. De esta forma, se pretende que, con la presente investigación, se puedan aportar conocimientos teóricos y prácticos que ayuden en ambas problemáticas. Se realizarán ensayos de flexión de 3 puntos sobre probetas prismáticas obtenidas de diferentes muelas abrasivas, para poder así también conocer las diferencias entre procedimientos de fabricación de las probetas. A ello se le añaden unos primeros ensayos sobre probetas vítreas, con los que se estudian diferentes medios de medición.

7 CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE MUELAS DE ALÚMINA CON AGLOMERANTE VÍTREO

Inicialmente, se trabajará con muelas vitrificadas, para lo cual se han diferenciado dos series de pruebas. Por un lado, se ensayaron probetas obtenidas de una muela que emplea dicho aglutinante, mientras que, por otro, probetas del propio aglutinante, compactado y fabricado tanto en sección circular como rectangular. De esta forma, se estudiará el límite de fallo en cada uno de los casos, y consecuentemente el límite elástico.

En estos ensayos inicialmente se empleó un láser para la medición de la flecha en cada etapa, ya que los valores suministrados por la propia máquina no resultaban suficientemente precisos, como se mostrará posteriormente. Además, se emplea el software informático GOM, de uso libre, basado en la teoría del *Digital Image Correlation*, con el que se tratará de obtener dichos desplazamientos con precisión elevada.

De esta forma, la finalidad principal de estos ensayos es comparar los resultados obtenidos por el empleo de ambas fuentes de medición, y analizar cuál es la mejor metodología de estudio. Cabe mencionar que estos ensayos no han sido realizados en el presente proyecto, simplemente se ha realizado un análisis y estudio de sus resultados. Finalmente, los ensayos sobre las probetas de aglomerante compactado no han sido incluidas en el estudio, y se presentan en forma de anexos, ya que se cumplía el objetivo mencionado con las probetas de muela abrasiva vitrificada.

7.1 CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE PROBETAS DE MUELAS ABRASIVAS

En primer lugar, se dispone de una batería de 9 ensayos realizados sobre probetas de muelas de esta clase, ensayadas en la facultad de Ingeniería de la *Universidad de Burdeos*. Se trata de ensayos de flexión de 3 puntos, realizados en la máquina mostrada en la Figura 22. Las probetas se ensayan individualmente situándolas de forma simétrica respecto al punto de contacto central, el cual va aumentando la fuerza ejercida con el transcurso del ensayo, desplazándose hacia abajo, hasta llegar a la fractura de la probeta. La distancia entre los vanos laterales es de 140mm. La máquina suministra los valores de fuerza y desplazamiento en cada instante del ensayo.



Figura 22. Setup del ensayo de 3 puntos para probetas de muela vítrea.

A la configuración mostrada en la figura se añade un láser de medición, con el que se obtendrán los desplazamientos mejorando en precisión a la máquina. Según puede observarse, se dispone también de una cámara *Canon* con la que se captan imágenes que posteriormente serán analizadas mediante el software *GOM Correlate*, para estudiar también los desplazamientos mediante otra herramienta, y poder compararlos con los valores suministrados por el láser. Este software emplea la técnica de *Digital Image Correlation and Tracking*, se trata de un método óptico que emplea técnicas de seguimiento y registro de imágenes para realizar mediciones precisas en 2D y 3D de los cambios en dichas imágenes. Para ello, en el software GOM se define un sistema de ejes y un área de estudio inicial, en la cual, según transcurre el ensayo, se va grafica mediante una escala de color el valor atribuido en todas las imágenes cada uno de los puntos que se incluyen en dicha área. Para el caso de estudio, se trabajó con los desplazamientos, pero también es válido para tensiones, deformaciones o más parámetros.

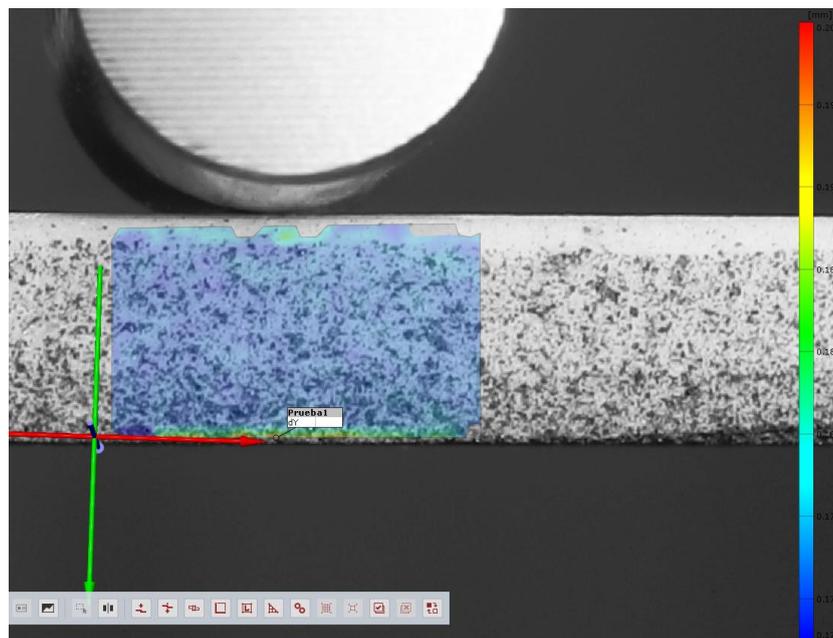


Figura 23. Ejemplo de lectura en el GOM.

Las probetas poseen unas dimensiones teóricas de 25x25x100, pero realmente son algo inferiores debido al proceso de pulido al que se sometieron. Estas presentan estructuras internas diferentes, para poder así establecer relaciones entre ellas, divididas en grupos de 3, disponiendo de probetas 100% monocristal (MA), 100% convencional (CBL) y 50% monocristal (5MBA).

Los ensayos se realizan con la configuración mostrada en la Figura 24, donde los apoyos inferiores son elevados con el tiempo, aumentando la fuerza ejercida por el superior, llegando a la rotura (Figura 25).

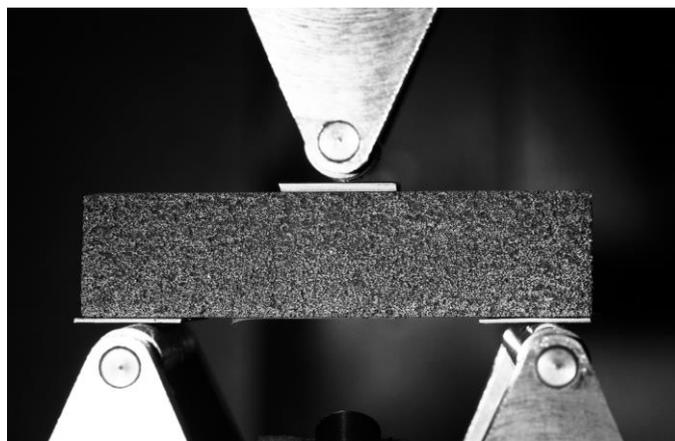


Figura 24. Ensayo sobre probeta obtenida de muela vítrea.



Figura 25. Rotura de probeta obtenida de muela vítrea

Los resultados obtenidos para los desplazamientos máximos, justo en el instante previo a la rotura, son los indicados en la próxima Tabla 7.

Tabla 6. Valores máximos de desplazamiento y fuerza para ensayos sobre probetas obtenidas de muela vítrea.

ENSAYO	FUERZA MÁXIMA (N)	DESPLAZAMIENTO MÁXIMO (mm)		
		GOM	Láser	Máquina
CBL1	1231,05	0,185	0,2614	1,049
CBL2	1915,92	0,533	0,2815	0,7694
CBL3	2146,64	0,472	0,3442	0,9382
5MBA4	1924,06	0,352	0,285	0,6587
5MBA5	2354,65	0,362	0,3624	0,7816
5MBA6	2047,40	0,4707	0,4177	1,1979
MA7	2401,54	0,3921	0,4042	1,1836
MA8	2296,66	0,3119	0,2978	0,7633
MA9	1988,75	0,286	0,363	0,8815

Los desplazamientos obtenidos según el GOM han sido graficados aislados a los otros medios de medición. Los valores asociados a mayores desplazamientos se encuentran ligados menores valores en la fuerza, y viceversa. Cabe mencionar que las probetas han sido extraídas de 3 muelas, agrupadas en grupos de 3, las primeras, las intermedias y las finales.

Según puede observarse, la máquina no presenta fiabilidad alguna de medición, en todas las pruebas los valores son realmente elevados, para la mayoría de casos duplicando o triplicando los medidos tanto por el GOM como por el láser, o incluso más. Esto se debe a las deformaciones internas que sufre la máquina durante el transcurso del ensayo, como se corroborará en mayor profundidad en el Anexo I, donde se estudian las probetas constituidas por aglomerante bruto. Por ello, puede descartarse como fuente de medición de los desplazamientos. Los valores obtenidos mediante el GOM y el láser serán comparados en profundidad posteriormente.

Partiendo de estos datos, se puede obtener fácilmente el módulo de Young de las probetas de cada ensayo.

$$E = \frac{P * L^3}{48 * I * y} \quad (10)$$

Siendo:

- P la carga en Newtons
- L la distancia entre centros de apoyo en mm
- I la inercia en mm⁴
- y la flecha máxima en mm

Dicha expresión se empleará con los valores máximos de fuerza y desplazamiento, particularizándolo para los valores obtenidos por el GOM y el láser, los cuales se comparan con la expresión matemática del límite elástico propia del análisis modal, para observar la veracidad del ensayo y de la propia fórmula. Para emplear la siguiente expresión, es necesaria la realización de dicho análisis, de donde se obtienen los valores para la frecuencia modal de excitación f_1 de cada muela. Bien es cierto que para el caucho si se realizó un análisis modal, plasmado en el anexo II, pero en este primer caso ya se disponía de dicha frecuencia previamente, debió realizarse en su momento para desarrollar los ensayos. Para esta expresión del análisis modal, se cumple que:

- φ es la densidad en kg/m³
- f_1 es la frecuencia modal en Hz
- t es la anchura en mm
- D es el diámetro exterior en mm
- d es el diámetro interior en mm
- ν es el coeficiente de Poisson

$$E = 1,074 * \frac{f_1^2 * D^4 * \varphi * (1 - \nu^2)}{t^2 * \left\{ 1 - \left(\frac{d}{D} \right)^2 \right\}^2} * 10^{-9} \quad (11)$$

Los resultados obtenidos han sido los presentados en la siguiente Tabla 7, donde se encuentran tanto los ensayos mecánicos como el análisis modal. Además, se indican los valores de la tensión máxima previa a la fractura, suministrados por la propia máquina.

Tabla 7. Resultados para las probetas obtenidas de muela vítrea.

ENSAYO	TENSIÓN MÁXIMA (MPa)	MÓDULO ELÁSTICO (MPa)		
		GOM	Láser	Análisis modal
CBL1	3,99	19631,02	2628,1	15404,05
CBL2	11,05	3290,62	2443,31	
CBL3	2,6	18751,74	2070,25	
5MBA4	7,53	6919,73	2646,08	
5MBA5	10,43	4276,98	2053,4	
5MBA6	6,53	6598,52	1664,84	
MA7	11,1	5378,35	2377,48	
MA8	11,51	3516,56	2565,24	
MA9	12,04	3306,09	1888,85	

Como puede observarse, mediante la expresión propia del análisis modal, se obtiene el mismo valor para todos los ensayos, lo cual es completamente lógico, ya que no se variaron ninguno de los parámetros de la expresión. El valor obtenido ha sido de 15 GPa, el cual es completamente lógico y plausible. Se comprobará con las otras herramientas de medición.

Es innegable que los valores de límite elástico calculados mediante los ensayos mecánico, empleando los desplazamientos de las herramientas de medida indicadas, son notablemente inferiores al resultado de la fórmula del análisis modal, donde se obtiene un valor tres veces superior a los del GOM, y siete veces superior a los del láser, aproximadamente.

Para el caso del GOM, se presenta una precisión no muy alejada de la del láser, con resultados de entre el 30 y el 60% inferiores. El principal inconveniente de este software, es que los resultados son indicados en una escala de color, con lo que nos puede llevar a errores en la lectura. En muchas ocasiones es difícil la determinación del valor concreto. A modo de generalización, y para facilitar en cierta medida el procedimiento, se ha escogido el color predominante en la línea vertical del apoyo central, escogiendo el valor pertinente de la escala.

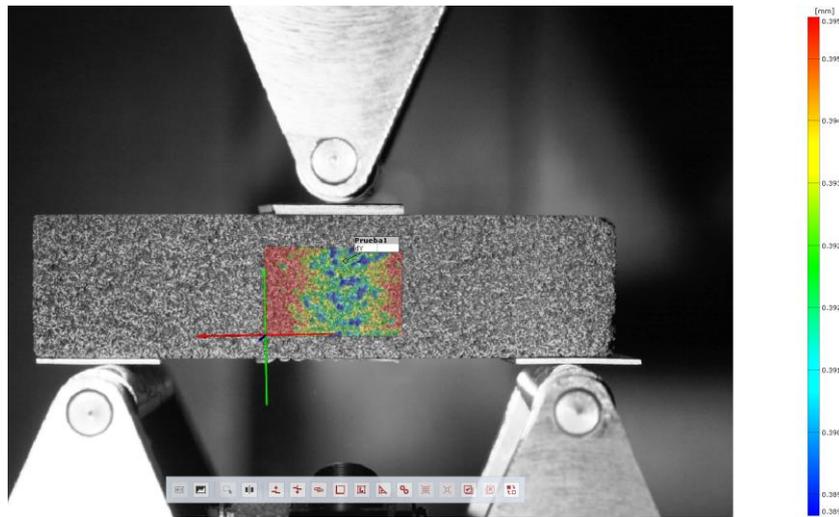


Figura 26. Resultados de desplazamientos medidos en el GOM.

Además de esto, se calculará el módulo elástico de una segunda forma. Esta parte de la curva Fuerza-Desplazamiento, la cual será limitada a su zona lineal, para obtener la ecuación de su pendiente, que al implementarla a la expresión matemática previa, permite calcular el módulo. En los próximos gráficos se presentan las curvas obtenidas a lo largo de los ensayos, seguidas de sus zonas lineales de estudio. Como puede observarse, la zona lineal no se presenta igual de clara en todos los ensayos, siendo bastante compleja de limitar en algunos de ellos.

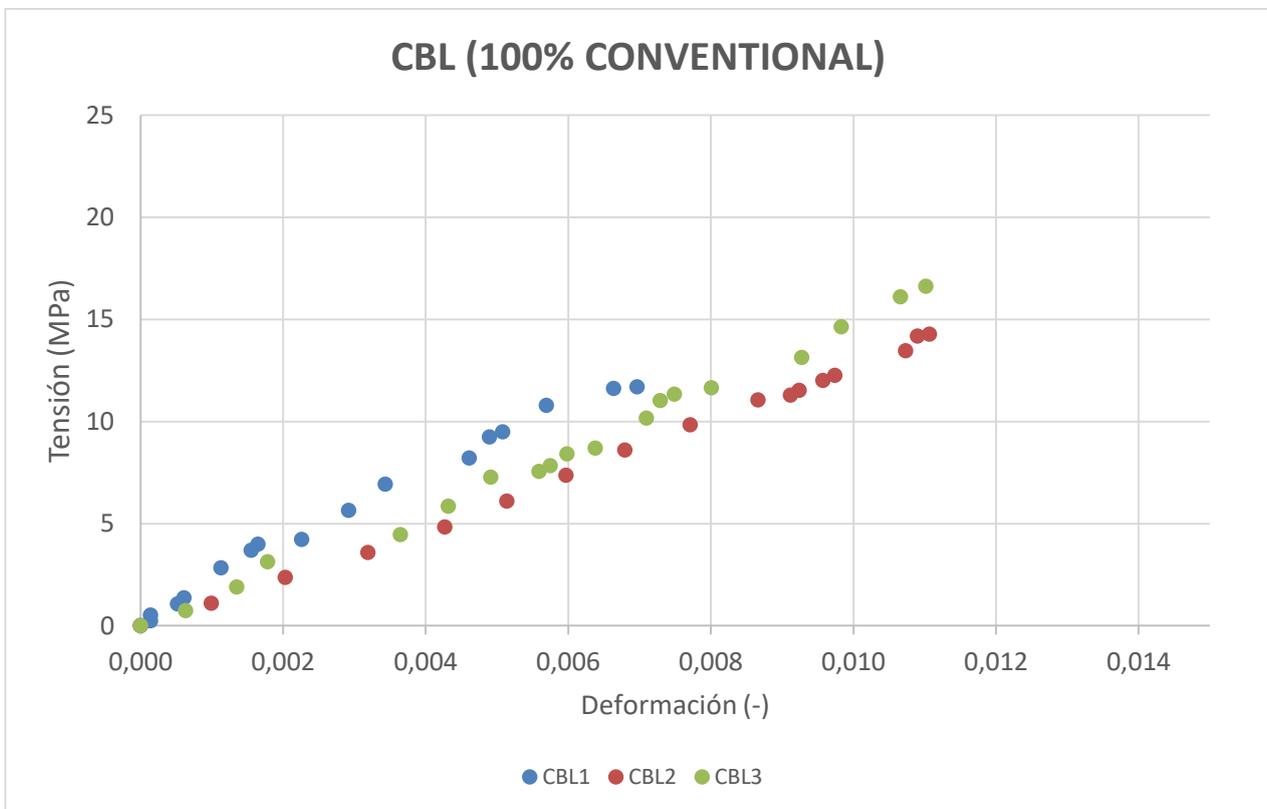


Figura 27. Curvas Tensión-Deformación de las probetas convencionales.

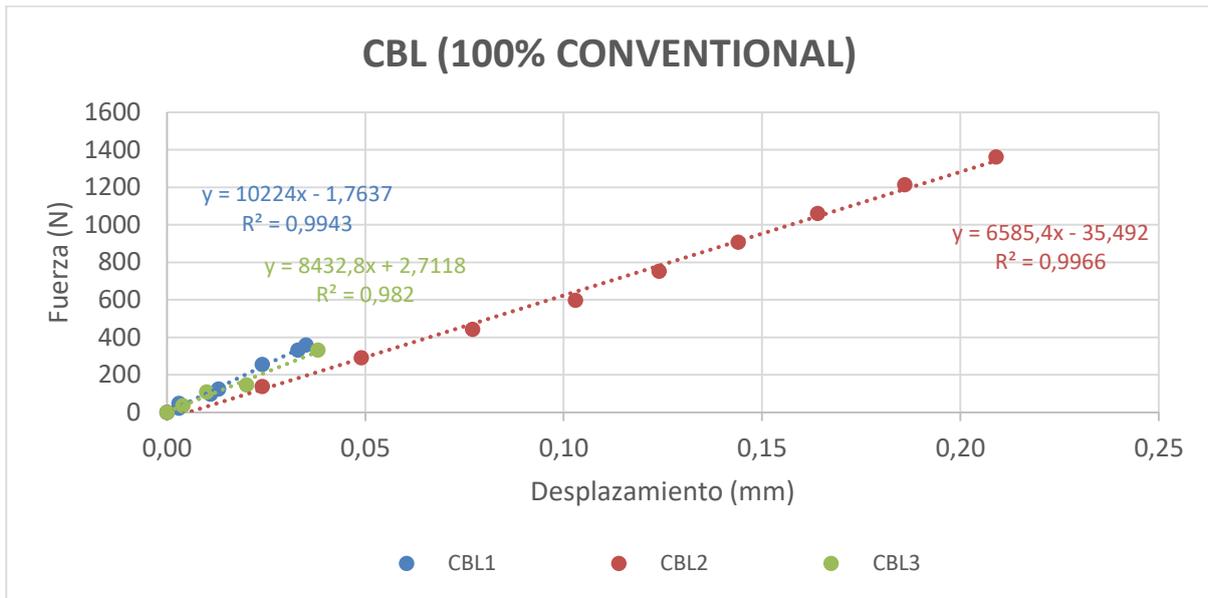


Figura 28. Zona lineal de las curvas Fuerza-Desplazamiento de las probetas convencionales.

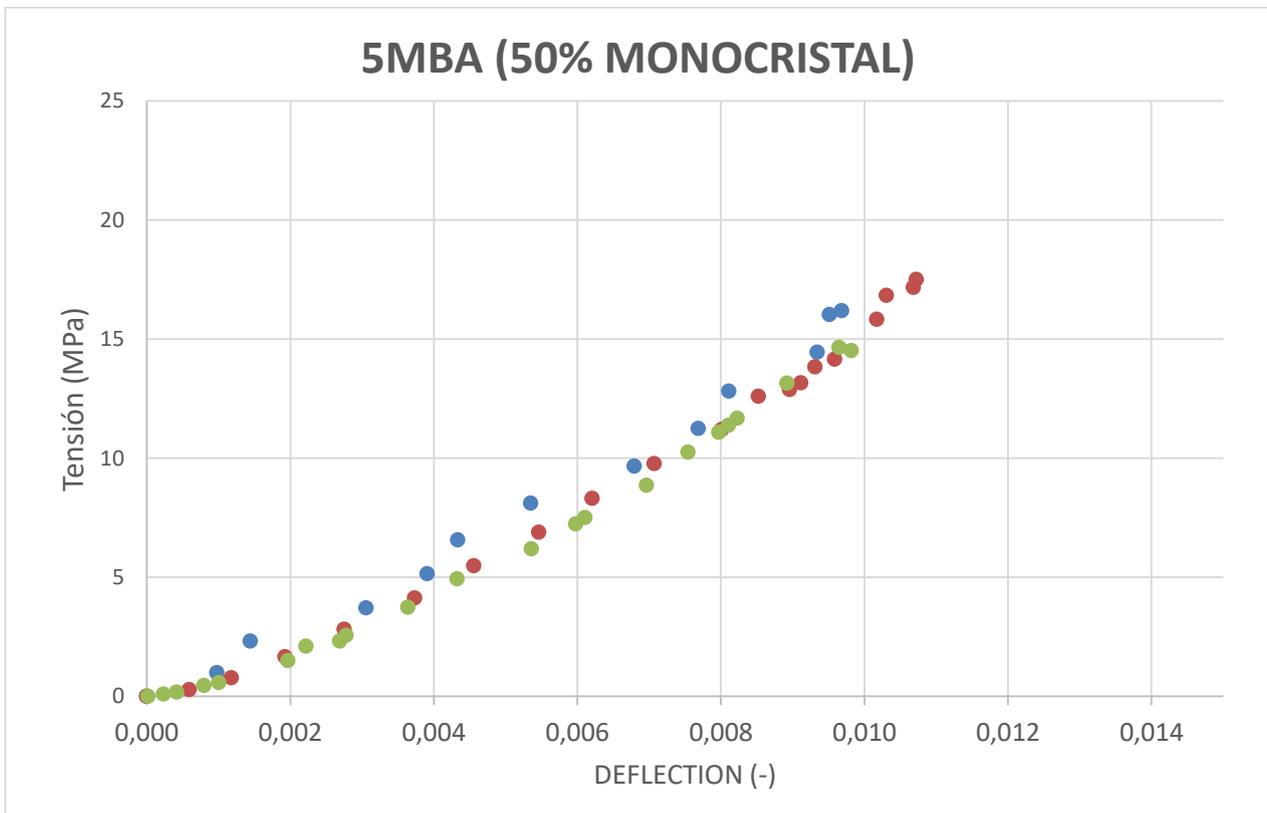


Figura 29. Curvas Tensión-Deformación de las probetas 50% monocristal.

Figura 27.

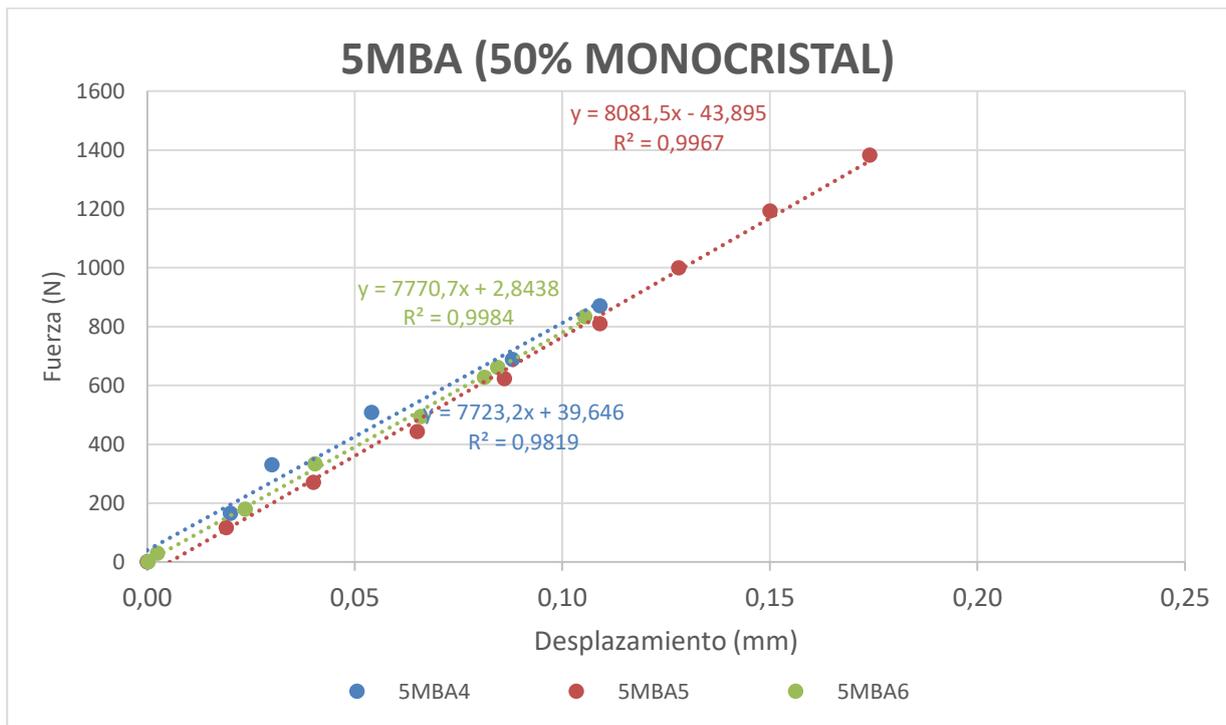


Figura 30. Zona lineal de las curvas Fuerza-Desplazamiento de las probetas 50% monocristal.

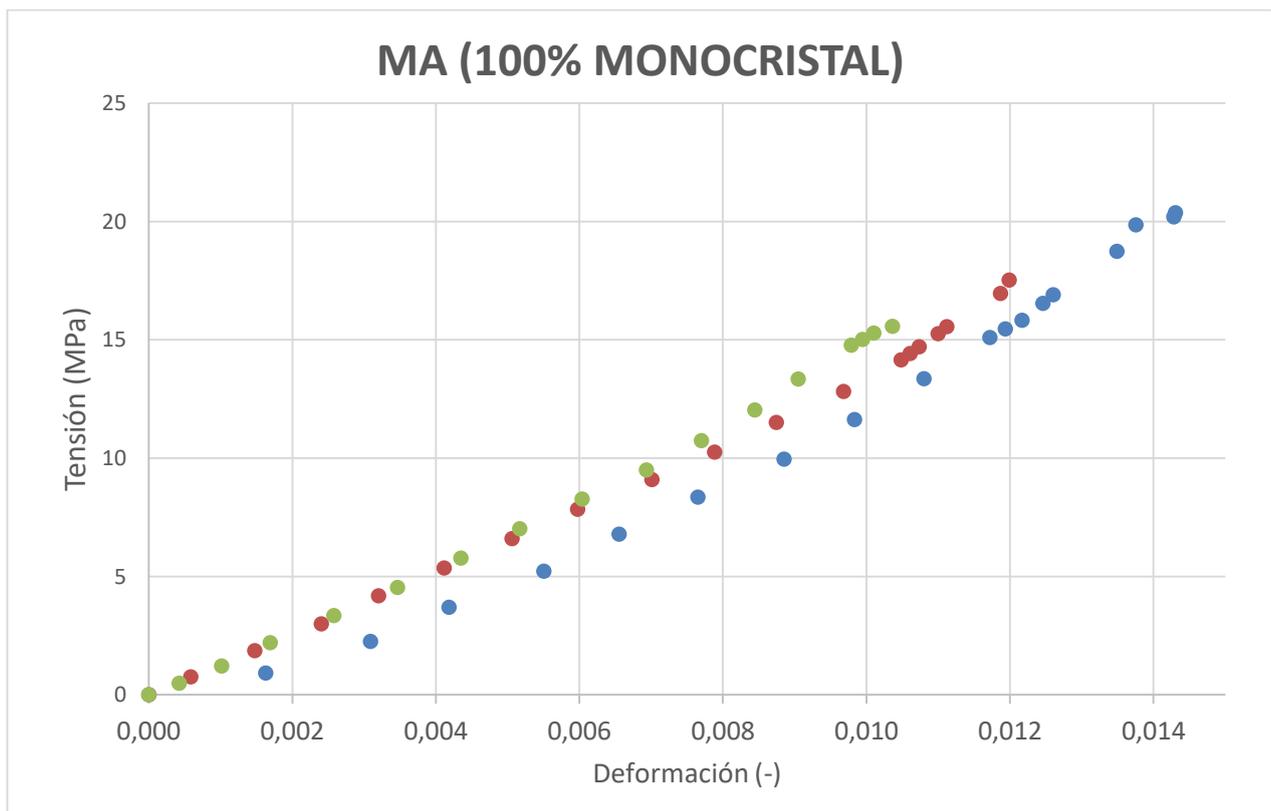


Figura 31. Curvas Tensión-Deformación de las probetas 100% monocristal.

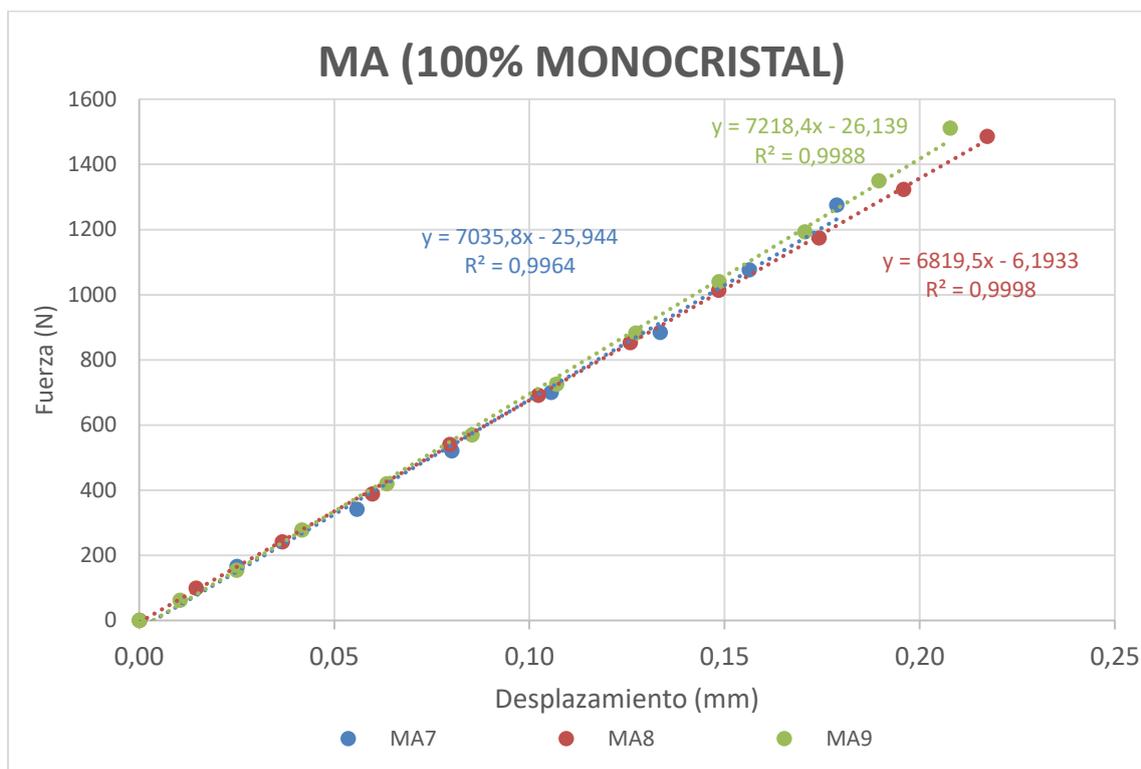


Figura 32. Zona lineal de las curvas Fuerza-Desplazamiento de las probetas 100% monocristal.

La ecuación de una recta es la siguiente, que se puede aplicar al gráfico gracias a trabajar con su zona lineal.

$$Ax + By + C = 0 \quad (12)$$

Posteriormente, se calcula su pendiente, que, al aplicarlo en la expresión, se obtiene nuevamente el módulo elástico.

$$m = -\frac{A}{B} = \frac{P}{f} \quad (13)$$

$$E = \frac{m * L^3}{48 * I} \quad (14)$$

Entonces, se han dividido los resultados en dos tablas, en primer lugar, se encuentran los valores de módulo elástico calculados tras la finalización del ensayo de flexión, que incluye el calculado mediante la expresión del análisis modal, y los obtenidos a la aplicación de la expresión matemática sobre los valores medidos por el GOM y el láser (Tabla 8). En segundo lugar, se comparan los valores del láser con los calculados empleando la limitación de la curva Tensión-Deformación a la zona lineal, y obtención de su pendiente, como se ha detallado previamente (Tabla 9). Se ha realizado dicha división ya que este último procedimiento, al trabajar con las curvas obtenidas por el láser, no se debe comparar a herramientas de medida ajenas a este.

Tabla 8. Resultados del módulo elástico obtenido en ensayos mecánicos sobre muela vítrea.

ENSAYO	MÓDULO ELÁSTICO (MPa)		
	GOM	Láser	Análisis modal
CBL1	19631,02	2628,1	15404,05
CBL2	3290,62	2443,31	
CBL3	18751,74	2070,25	
5MBA4	6919,73	2646,08	
5MBA5	4276,98	2053,4	
5MBA6	6598,52	1664,84	
MA7	5378,35	2377,48	
MA8	3516,56	2565,24	
MA9	3306,09	1888,85	

Tabla 9. Resultados del láser en ensayos mecánicos sobre muela vítrea.

ENSAYO	MÓDULO ELÁSTICO (MPa)	
	Láser	Pendiente
CBL1	2628,1	10224
CBL2	2443,31	6585,4
CBL3	2070,25	8432,8
5MBA4	2646,08	7723,2
5MBA5	2053,4	8081,5
5MBA6	1664,84	7770,7
MA7	2377,48	7035,8
MA8	2565,24	6819,5
MA9	1888,85	7218,4

Las conclusiones sobre estos ensayos son detalladas en el próximo apartado. Cabe destacar que, mediante el cálculo de la pendiente de la zona lineal, se obtiene valores superiores a los calculados mediante las mediciones del láser, siendo estas en torno al 70% inferiores, con alguna excepción, como puede ser la muela CBL1.

7.2 CONCLUSIONES DE LOS ENSAYOS VÍTREOS

Habiendo realizado estos primeros análisis sobre aglomerante vítreo, pueden concluirse varios puntos. En primer lugar, puede descartarse totalmente la máquina como fuente de medición. Sus valores medidos de desplazamiento máximo no se asemejan a los del láser ni a los del GOM. Mientras que la máquina presenta un valor medio de 0,914mm, el GOM y el láser lo hacen de 0,334mm y 0,335mm, respectivamente. Entonces, puede observarse que, mientras que estos dos últimos presentan gran similitud, con un error prácticamente nulo en sus valores medios, el valor de la máquina prácticamente triplica dichos valores, lo cual puede observarse también en los ensayos sobre probetas vítreas plasmados en el Anexo I. Esto se debe a que, durante los ensayos, la máquina presenta unas deformaciones internas, las cuales tornan sus medidas en erróneas.

Con el fin de cumplir el objetivo principal de los ensayos, se puede realizar una comparación entre el láser y el GOM, se han obtenido valores similares en ambos. Los dos últimos grupos de probeta presentan valores de elevada semejanza, tanto entre ellos, como entre las dos herramientas. Sin embargo, esto no sucede con las tres primeras probetas. Mientras que en el láser se han obtenido valores próximos a los 0,3mm, en GOM se han calculado con una gran dispersión, lo cual hace indicar que presenta alguna clase de limitación, ya sea en precisión, exactitud o algún aspecto que presente incertidumbre. Esto puede verse graficado en la posterior Figura 33.

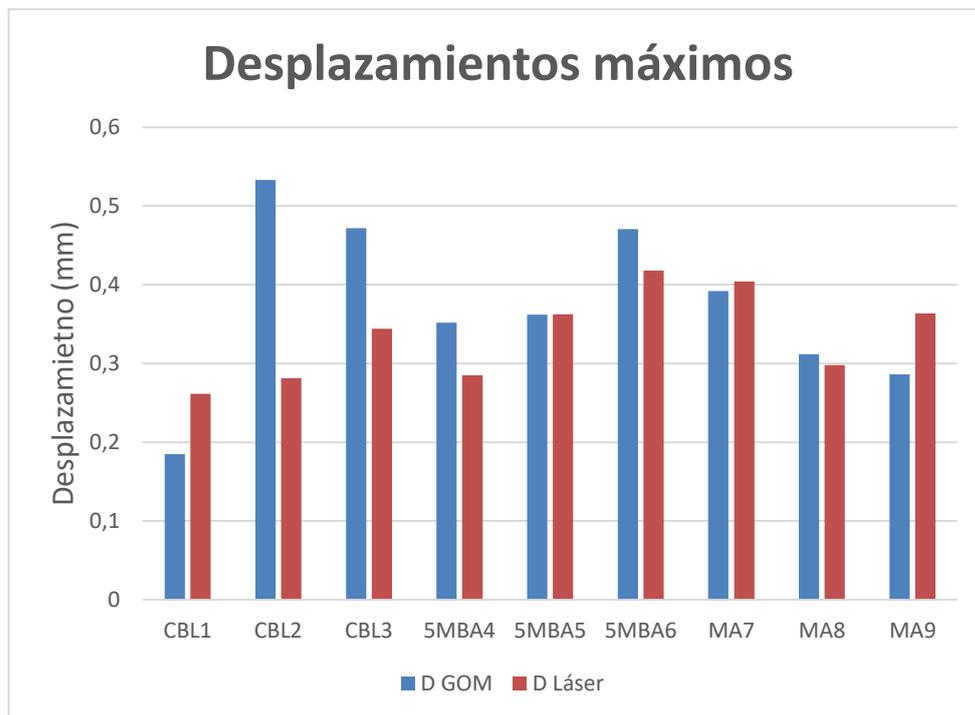


Figura 33. Valores máximos de desplazamiento para ensayos sobre probetas obtenidas de muela vítrea.

Por ello, puede concluirse en que el láser es una herramienta de medición de mayor precisión y repetitividad que dicho software. Además, el GOM presenta un post-procesado de datos que el láser no, con lo cual, además de presentar una mayor precisión, dispondrá también de una mayor sencillez de uso, ya que sólo es necesario conectarlo a un ordenador y colocarlo en la máquina a trabajar. Eso sí, la inversión económica es notablemente superior.

Entonces, también pueden estudiarse los cálculos del módulo elástico siguiendo ambas fuentes de medición. En los casos de las probetas obtenidas de la muela vítrea, tanto el láser como el GOM han resultado en valores inferiores, con unos valores medios de 2260 y 7963,29 MPa, a la expresión modal, con errores del 85% y el 48%, aproximadamente. Esto puede deberse a varias fuentes de error. Por un lado, simplemente el comportamiento de esta tipología de muela es muy diferente de lo esperado, lo que ha llevado a obtener valores menores en dicha resistencia. Por otro lado, las fuentes de error de medición o procesamiento de los datos podrían haber tenido una influencia mayor de la deseada, resultando en un análisis erróneo. Sin embargo, esto puede descartarse, ya que ha sido realizado varias veces, obteniendo siempre valores similares en dichos resultados. El parámetro que se obtiene es el desplazamiento, no el propio módulo elástico, con lo que al introducirlo en la expresión matemática puede llevar a errores de redondeo, sumado al hecho de que se trabaja con valores realmente pequeños, acompañados de parámetros exponenciales, puede inducir cierta variación en el resultado, ya que no se compara directamente con la “solución” de la expresión de muelas de caucho. Bien es cierto que el GOM resultaba en valores que duplican a los del láser, pero con una variabilidad notoriamente superior.

Considerando la información asociada a los ensayos sobre aglomerante compactado, plasmados en el primer anexo, y analizando ambos ensayos en conjunto, se observa que las probetas de aglomerante se han ajustado de una manera verdaderamente precisa a los resultados teóricos, mientras que las obtenidas de la muela han resultado en valores que indican un límite elástico menor, un fallo más repentino. Sin embargo, al no haber precisado de un láser en los ensayos asociados al aglomerante vítreo, esto no puede afirmarse, ya que únicamente se disponía del GOM, y no en todos los ensayos, además de la máquina. Sería recomendable el disponer de una fuente de medición más precisa, con la que verificar valores reales y verídicos en este grupo de ensayos. El disponer únicamente de dos resultados no proporciona la capacidad para realizar tal hipótesis.

Entonces, considerando lo mencionado, se concluye que la mejor metodología de medición es la colocación del láser en la máquina, y obtención de los desplazamientos mediante este, para posteriormente, estudiar la zona lineal del diagrama Tensión-Deformación, y llegar al módulo elástico. De esta forma, se obtienen valores más cercanos a los empleados en la expresión matemática del análisis modal. Por ello, con el aglomerante de caucho, se llevará a cabo dicho procedimiento.

8 CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE MUELAS DE ALÚMINA CON AGLOMERANTE DE CAUCHO

Una vez terminada la metodología de ensayos y de medición en las muelas vítreas, se va a proceder a aplicarla a muelas de caucho, principal objeto de estudio de este proyecto. Al igual que sucedía previamente, las probetas serán sometidas a ensayos de flexión de tres puntos, para obtener así el límite elástico. Se han realizado dos baterías de ensayos, pudiendo considerar los primeros como unos preliminares de los segundos, para así desarrollar una metodología de ensayo rápida y fiable para la caracterización mecánica de este tipo de muelas abrasivas.

8.1 MATERIALES E INSTRUMENTACIÓN A EMPLEAR

Inicialmente, se realiza una descripción del equipo empleado en dichos ensayos, y un listado de las probetas a trabajar, además de su preparación, ya que algunas fueron suministradas por el fabricante *Manhattan*, pero otras fueron fabricadas en la propia universidad.

8.1.1 EQUIPOS EMPLEADOS

Los ensayos fueron realizados en la *Escuela de ingeniería de Gipuzkoa*, perteneciente a la *Universidad del País Vasco*, en el modelo 67 de la serie 5900 de *Instron* (Figura 34), destinada a la realización de ensayos de flexión por 3 puntos. Presenta una capacidad de carga máxima de 30kN y se caracteriza por la inclusión de una precarga de 1kN seguida de un incremento en dicho valor a velocidad constante, hasta darse la rotura. La distancia seleccionada entre los apoyos de la máquina en la pieza es de 70mm, mientras que el valor seleccionado para los rodillos pisadores son 18mm.

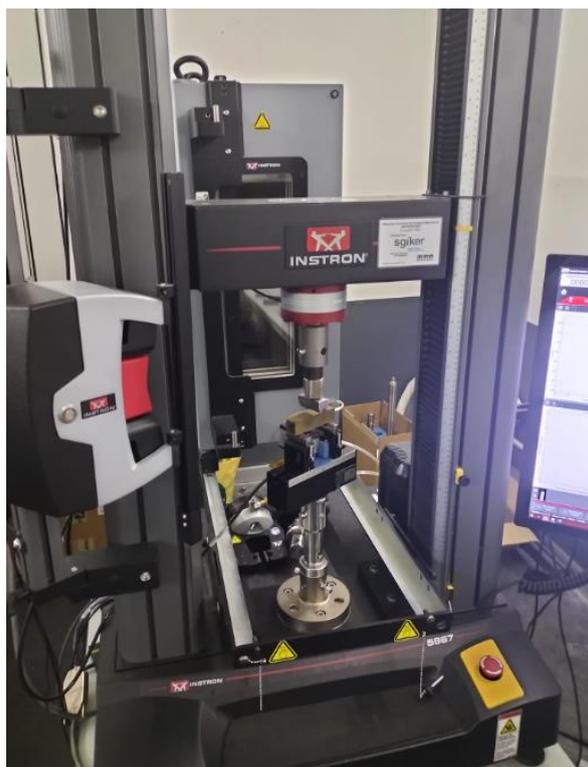


Figura 34. Máquina Instron para la realización de los ensayos de flexión de 3 puntos.

Sin embargo, y como se mostrará después, los valores medidos en cada uno de los instantes por la propia máquina no eran lo suficientemente precisos, por lo que se recurrió a la implantación de un láser de medición al equipo. Se trata del sensor de triangulación láser optoNCDT 1902LL (Figura 35), del fabricante *Micro-Epsilon*. Presenta un rango de medida de 2mm, por lo que requiere de una colocación exigente, teniendo que situarlo cerca de la probeta a ensayar. Para facilitar su colocación, se recurrió al empleo de corchos para fijarlo, ya que, debido a su cableado, no podía ubicarse mediante otra herramienta. La colocación óptima del láser es a la mitad del rango de medición, para trabajar así con una mayor precisión, y evitar que se alga de este rango. El propio láser indica mediante una luz LED de color amarillo el momento en el que se encuentra en la mitad de dicho rango.



Figura 35. Láser optoNCDT 1902LL.

Además, se emplea el software informático *sensorTOOL*, para la captación de los valores de desplazamiento medidos por el láser en cada instante. Cabe mencionar que fuerza y tensión se cuantifican en la propia máquina, y el desplazamiento en este programa, pero a frecuencias de adquisición diferentes, por lo que deben filtrarse ambos grupos de valores para trabajar en los mismos registros de tiempo, lo cual se ha realizado mediante la herramienta de Microsoft Office, *Excel*.

8.1.2 PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS A ENSAYAR

La obtención de las probetas a ensayar ha sido diferentes en los dos grupos de ensayos. Mientras que para los ensayos finales todas las probetas fueron suministradas por el fabricante, para los preliminares hubo que fabricar algunas en los talleres mecánicos de la universidad.

➤ Ensayos preliminares

En los primeros ensayos preliminares se dispone de dos tipos de probetas, todas ellas obtenidas de muelas de *Abrasivos Manhattan*. Por un lado, se han obtenido una serie de probetas de una muela que emplea como aglomerante el caucho, algunas en dirección radial y otras en perpendicular, para así comprobar posibles diferencias entre ambas configuraciones. El procedimiento de obtención será explicado a gran detalle. Por otro lado, desde la empresa se suministró un conjunto de probetas obtenidas de muelas de caucho con núcleo de resina, algunas fabricadas únicamente del núcleo y otras combinando ambos materiales en diferentes distribuciones.

El objetivo era la generación de probetas en dos sentidos diferentes, unas en sentido radial, y otras en perpendicular a estas, para lo cual se ha dividido la muela en dos partes, asignando un destino a cada una de ellas. Se buscaba ensayar en torno a 5 probetas de cada grupo, pero se han fabricado más, para así poder cubrir posibles defectos dimensionales, golpes o roturas de estas. La muela de la que fabricarán estas probetas presenta la denominación “WACL400MB1” (Figura 36), con unas dimensiones de 450x40x203.2 mm y destinada a procesos de desbaste.



Figura 36. Muela WACL400MB1.

Antes de encontrar la herramienta idónea para realizar los cortes, múltiples opciones fueron consideradas, ninguna de ellas siendo viable. Inicialmente, se probó con varias caladoras, sierra manual o incluso un taladrado. El empleo de las caladoras resultaba en un dañado excesivo de los filos, requiriendo una gran cantidad de posibles recambios, mientras que, con la regla, el proceso de corte era excesivamente largo, precisando de una gran cantidad de tiempo. Para el caso del taladro, las perforaciones se realizaban de forma limpia, pero al necesitar de un posterior corte para conectarlas, también se descartó.



Figura 37. Corte de la muela WACL400MB1.



Figura 38. Muela WACL400MB1 cortada a la mitad.

Finalmente, se encontró la herramienta a emplear, una sierra metalográfica Servocut 302 de *Metkon* (Figura 39) que, empleando un disco de corte de carburo de silicio, era capaz de realizar los cortes de una forma precisa, limpia y sencilla en la muela de caucho, que presentaba un mecanizado realmente complejo. En esta máquina se dejaba una pequeña demasía en cada uno de los lados de la probeta, para así mejorar la calidad del corte, que posteriormente serían pulidas. El haber realizado esta primera división de la muela en dos partes realmente ayudó al proceso, ya que la muela al completo no hubiera cabido en la cavidad de la sierra. Entonces, se cortó la muela en trozos más pequeños, para tener una mayor manejabilidad de esta, se marcaron los cortes a realizar y se cortaron las probetas. Cabe mencionar que la sujeción en la sierra se hizo mediante tornillos y tacos, para garantizar así la precisión requerida en el corte.



Figura 39. Sierra metalográfica Servocut 302.

Posteriormente, las probetas fueron llevadas a la pulidora automática Forcipol 102 de *Metkon* (Figura 40), en las que además de eliminar la demasía mencionada se garantizaba el paralelismo de las caras de la probeta, para poder realizar el ensayo de flexión. Se trata de una amaladora pulidora, destinada a labores metalográficas, en el que se retiraron los pistones, ya que las probetas no cabían en sus orificios, realizando el proceso de forma manual, en el que se estableció una velocidad de 150 rpm para no dañar las piezas. Se disponían de lijas de varias asperezas, 180, 400 y 800 concretamente, pero se trabajó con la de 180 únicamente, ya que era la que mayor tasa de material eliminada, sin resultar excesivo. El proceso se realizó en presencia de agua como lubricante.



Figura 40. Pulidora Forcipol 102.

Al final el proceso de pulido en todas las probetas estas se encontraban listas para la realización de los ensayos. Se disponía de un total de 13 probetas (Figura 41), siendo algunas cortadas en sentido radial y otras en perpendicular a este. Cabe mencionar que se decidió no reducir la altura de varias de las probetas, para así comprobar la influencia de la variación de la sección en el resultado final, es decir, se omitió el proceso de corte en dicha dimensión de estas probetas, presentado la altura de 40mm de la propia muela.



Figura 41. Conjunto de probetas obtenidas de la muela WACL400MB1.

Estas han sido las probetas fabricadas en la universidad, pero, a parte de estas, se ensayará un conjunto de probetas suministradas por *Manhattan* (Figura 42). Entre ellas, encontramos algunas obtenidas del núcleo resinoide de las muelas, otras en las que se aprecia claramente el cambio de material, y unas últimas formadas únicamente por la parte de caucho. Cabe mencionar que el caucho se observa en color negro debido a un fino recubrimiento, que mientras que se eliminó en los ensayos finales, para estos no fue así.



Figura 42. Probetas suministradas por Manhattan para los ensayos preliminares.

➤ Ensayos finales

Viendo los resultados obtenidos en los ensayos preliminares, que serán mostrados posteriormente, se concluyó que era un procedimiento válido para un cálculo estimado del módulo elástico. Por ello, se decidió realizar estos ensayos finales, los cuales abarcarían cuatro clases de probetas, tres de las cuales serían del propio fabricante *Manhattan*, y unas últimas probetas de fabricantes externos.

En primer lugar, cabe destacar que las probetas de la empresa son obtenidas de muelas de aglomerante de caucho con núcleo de resina, pudiéndose diferenciar la resina estándar, ST, y el epoxi, EPO. En cada una de las probetas aparece un número, el cual hace referencia a su día de fabricación, de esta manera, probetas con una misma numerología fueron obtenidas bajo las mismas condiciones. El primero de los grupos de probetas abarca las obtenidas únicamente del núcleo resinoide, por ello presentan este color blanco de la resina. Los otros dos grupos incluyen probetas con parte resina y parte caucho, diferenciándose entre sí mediante la distribución con la que se obtuvieron. De esta forma, el segundo grupo incluye probetas que presentan ambos materiales longitudinalmente, mientras que el tercero hace lo propio con las que los incluyen transversalmente. En la Figura 43 puede verse una probeta de cada uno de los grupos.



Figura 43. Grupos de probetas suministradas por Manhattan para los ensayos finales.

En último lugar, se han ensayo también probetas de otros fabricantes (Figura 44), referenciados como IK y NOR, respectivamente. Con esto, se quiere comprobar la variabilidad entre las técnicas de fabricación, composiciones internas y metodología entre proveedores, enfocándose a los resultados de módulo elástico.



Figura 44. Ensayo sobre la probeta IK2.

Cabe destacar que se ha incluido una tabla resumen en el Anexo III donde se agrupan todas las probetas ensayadas, tanto en los ensayos previos como en los finales, acompañadas de sus dimensiones.

8.2 PROCEDIMIENTO DE ENSAYO

El procedimiento a seguir para realizar el ensayo es realmente sencillo. Una vez se disponen de todas las probetas a estudiar, se prepara la máquina, colocando los rodillos pisadores del tamaño seleccionado, y el láser de medición, el cual ha sido colocado empleando unos corchos auxiliares, para evitar que su cableado lo desplazara.

Se enciende la máquina, y se establece una precarga, que, en el momento de aplicarla, empieza la adquisición de datos en el ordenador portátil, mediante el software informático *sensorTOOL*. Entonces, la propia máquina va incrementando la presión ejercida por el rodillo central, obteniendo en cada instante los valores de fuerza, tensión y desplazamiento hasta la rotura. Cabe destacar que los valores obtenidos por el láser se presentan a una frecuencia de adquisición diferente a los de la máquina, por lo que han sido procesados con *Excel*, para así ajustar los desplazamientos de láser con las fuerzas y tensiones de la máquina.

El objetivo de estos ensayos es el desarrollo de la metodología para la caracterización mecánica de estas muelas, por lo que se calculará el límite elástico. Esto va a realizarse siguiendo dos métodos diferentes, para así poder compararlos luego.

Por un lado, se calculará el módulo elástico con los valores máximos de fuerza y desplazamiento obtenidos de cada ensayo, siendo:

$$E_1 = \frac{P * L^3}{48 * I * y} \quad (15)$$

- L la distancia entre apoyos en mm
- I el momento de inercia en mm⁴
- y el desplazamiento o flecha en mm
- E el módulo elástico en MPa
- P la fuerza en N

Por otro lado, se estudiará la gráfica Fuerza-Desplazamiento de cada una de las probetas, y serán reducidas a su zona lineal, para así poder calcular el módulo elástico empleando el concepto de la pendiente, una medida de su inclinación, como ya se hizo con los ensayos de muelas vítreas.

Cabe recordar que la ecuación de la recta es la siguiente:

$$Ax + By + C = 0 \quad (16)$$

Por lo tanto, su pendiente se calcula de la siguiente forma:

$$m = -\frac{A}{B} = \frac{P}{y} \quad (17)$$

A su vez, esta expresión se puede implantar fácilmente en el cálculo del módulo elástico, pudiendo comparar así ambos valores:

$$E_2 = \frac{m * L^3}{48 * I} \quad (18)$$

Este procedimiento es común tanto para los ensayos preliminares como para los finales. Además, también se calcula la tensión máxima a la que se da la rotura, obtenida mediante la siguiente expresión matemática:

$$\sigma_{\max} = \frac{P}{b * h} \quad (19)$$

Siendo:

- σ_{\max} la tensión máxima en MPa
- b la base de la sección de la probeta en mm
- h la altura de la sección de la probeta en mm

A diferencia de como ocurría con el estudio vítreo, en este caso no se emplea la fórmula propia de análisis modal, ya que, al recibir las probetas del propio fabricante, no es posible realizar dicho análisis a la muela para conocer la frecuencia de excitación f_1 . Bien es cierto que se realizó un análisis modal, plasmado en el Anexo II, sobre la muela de caucho con núcleo resinoide empleada en los ensayos previos. Pero, al no poder emplear dicha expresión en los ensayos finales, se decidió incluirla en los anexos.

8.3 RESULTADOS DE ENSAYOS

Se ha realizado la división entre ensayos preliminares y ensayos finales, diferenciando en cada uno de ellos los diferentes grupos constituidos por probetas de las mismas características.

8.3.1 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS PRELIMINARES

En primer lugar, se tratan los ensayos preliminares, dividiendo las probetas entre las obtenidas en la universidad y las suministradas por el fabricante.

8.3.1.1 PROBETAS OBTENIDAS DE LA MUELA

En este primer grupo se encuentra todas aquellas probetas que han sido obtenidas de la muela siguiendo el procedimiento y con el equipamiento ya mencionado. Se dispone de probetas extraídas en sentido radial y axial, incluyendo unas que disponían de una sección de mayor tamaño.

8.3.1.1.1 RADIALES

En este primer grupo se incluyen las probetas que han sido obtenidas en el sentido radial de la muela, como se muestra en la Figura 48. Se incluyen un total de 5 unidades, aunque inicialmente se disponía de una más, pero el ensayo no se realizó correctamente al ser el primero de la serie. Estas probetas fueron cortadas en la sierra y tratadas en la pulidora.



Figura 45. Sentido de fabricación de las probetas radiales.

Para este caso, todas fueron cortadas hasta una altura teórica de 25 mm, que es lo estipulado por la norma ya mencionada. Cabe destacar que tanto estas dimensiones como todas las obtenidas a lo largo de los ensayos han sido obtenidas con Calibres pie de rey, empleando en unas ocasiones el digital y en otras el manual. De esta forma, las medidas resultantes de las probetas son las siguientes (Tabla 10):

Tabla 10. Dimensiones de las probetas radiales.

ENSAYO	DIMENSIONES		
	Base (mm)	Alto (mm)	Largo (mm)
R1	27,08	24,15	99,82
R2	26,95	24,85	99,3
R3	27,65	22,7	98,7
R4	26,95	26,8	102,3
R5	24,65	25,35	100,45

Entonces, se ensayaron las probetas individualmente una tras otras, hasta obtener los siguientes resultados (Tabla 13):

Tabla 11. Resultados de las probetas radiales.

RESULTADOS					
ENSAYO	Fuerza máxima (N)	Desplazamiento máximo (mm)	Tensión máxima (MPa)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
R1	2132,71	0,234	3,261	2049,028	2362,853
R2	2393,53	0,195	3,574	2321,321	3492,125
R3	2183,11	0,252	3,478	2296,859	2198,63
R4	2708,12	0,232	3,749	1929,442	2175,999
R5	2180,63	0,233	3,489	1998,497	2380,353

En este grupo de probetas la rotura se da de una manera similar en todas ellas. Según puede observarse en las imágenes adjuntas (Figura 46), con la rotura aparece una pequeña grieta en la zona inferior del centro de la probeta, a la altura del rodillo pisador que ejerce la fuerza, aproximadamente. El fallo de la pieza no resultaba notorio acústicamente ni visualmente, desprendía ninguna clase de polvo, como si sucede con algunas que se detallará posteriormente. Al partir la probeta manualmente (Figura 47), se observa que la propagación de la grieta no es uniforme, debido a las composiciones internas de la muela, y sus relaciones grano-aglomerante. Además, en la sección partida de la probeta pueden observarse los granos y el aglomerante, destacando estos primeros en un color anaranjado, aunque en la imagen no se aprecie en gran medida.

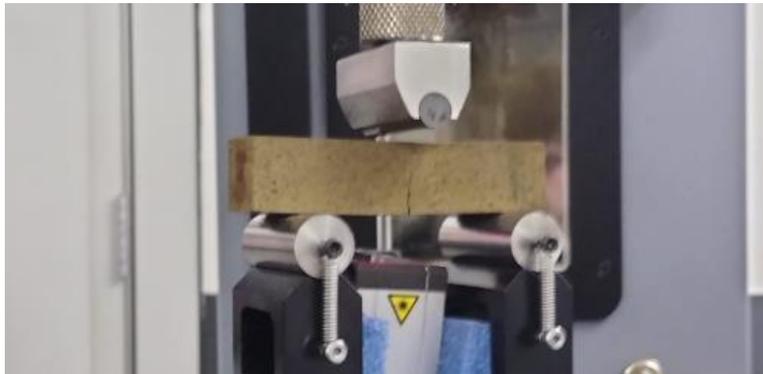


Figura 46. Aparición de grieta de fractura en una probeta radial.



Figura 47. Fractura de probeta radial.

De estos ensayos se obtienen las siguientes curvas, donde se observa gran similitud entre ellas. Por un lado, la Tensión-Deformación (Figura 51) y por otro la Fuerza-Desplazamiento, que al limitarla a su zona lineal (Figura 52) se representa la ecuación de cada recta para poder hacer el cálculo y el parámetro R^2 , que indica la variabilidad respecto a la recta ideal, es decir, a mayor valor en dicho parámetro, más se asemejará a una recta perfecta. En todos los casos el valor es realmente próximo a la unidad, que es el valor máximo, con errores ínfimos, con lo que se verifica la correcta limitación al tramo lineal. De la ecuación de la recta es de donde se obtiene el valor de la pendiente, que es implementado en el cálculo del módulo elástico, como ya se ha mencionado.

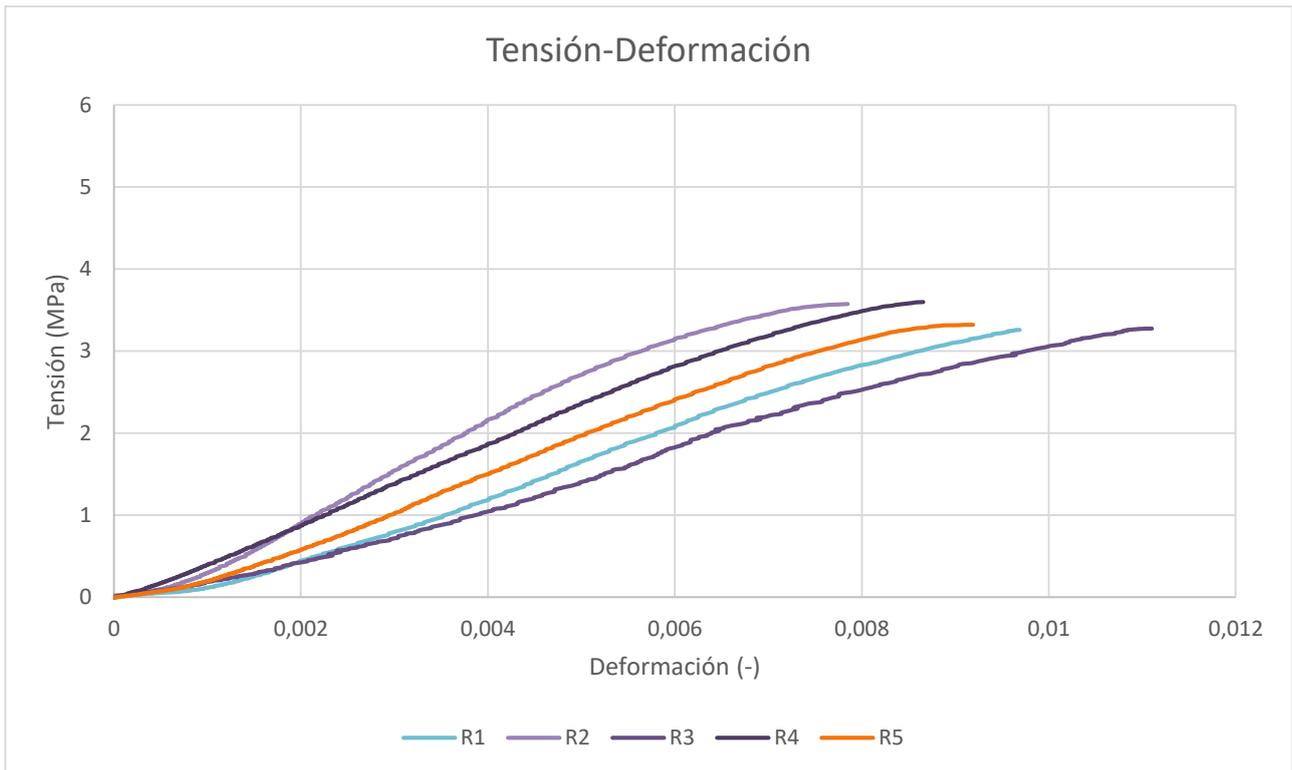


Figura 48. Curva Tensión-Deformación de las probetas radiales

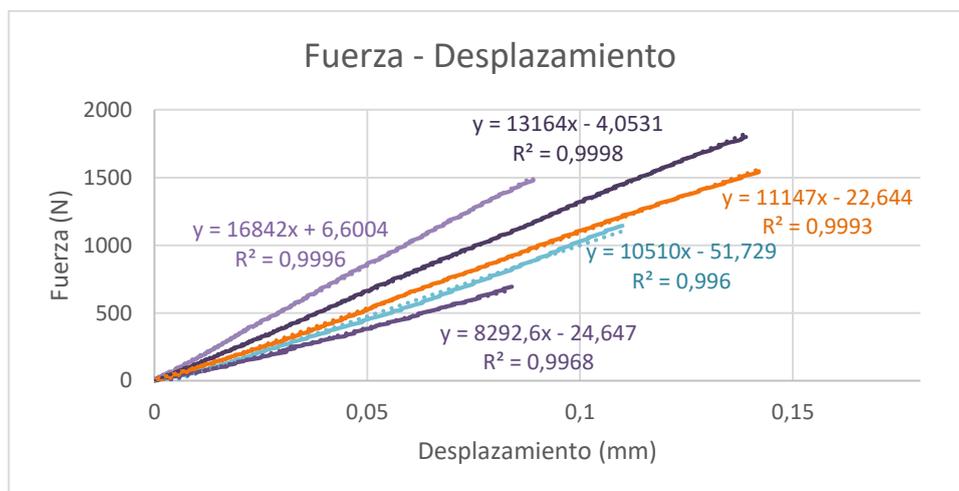


Figura 49. Zona lineal de la curva Fuerza-Desplazamiento de las probetas radiales.

Al ser el primer ensayo, se realizará la comparación entre los valores medidos por el láser y los detectados en la máquina (Tabla 12). Como puede observarse, los valores de la máquina son notablemente superiores a los otros, y no presentan ninguna relación entre sí. Mientras que el láser posee un valor medio de 0,229mm, la máquina lo dispone de 0,806mm, con lo cual se concluye que ocurre lo mismo que en el ensayo vítreo, las deformaciones internas sufridas por esta. Por ello, se precisaba de algún elemento externo para conocer con mayor exactitud los desplazamientos de las probetas, función que ha desarrollado el láser.

Tabla 12. Resultados de las probetas radiales.

ENSAYO	LÁSER (mm)	MÁQUINA (mm)
R1	0,234	0,6939
R2	0,195	0,7145
R3	0,252	0,9111
R4	0,232	0,8555
R5	0,233	0,8579

8.3.1.1.2 AXIALES

El segundo grupo de probetas a ensayar fueron obtenidas en dirección perpendicular a la radial en la muela (Figura 50), podría conocerse como sentido axial o sentido tangencial, aunque expresamente no se atañe a ninguna de esa, se denominará así para evitar confusiones. En este caso, cada probeta precisa de un mayor espacio en la muela, por lo que no han podido fabricarse tantas. Inicialmente, se obtuvieron 5 probetas, pero una fue descartada al no presentan paralelismo entre sus caras, ya que fue cortada con la sierra manual, antes de trabajar con la metalográfica.



Figura 50. Sentido de fabricación de las probetas axiales.

En esta ocasión, las dimensiones de las probetas son las siguientes (Tabla 13):

Tabla 13. Dimensiones de las probetas axiales.

ENSAYO	DIMENSIONES		
	Base (mm)	Alto (mm)	Largo (mm)
A1	25,1	25,3	99,05
A2	24,5	25,6	100,2
A3	22,05	23,3	100,05
A4	23,15	23,05	100,1

Tras realizar los ensayos, los resultados han sido estos (Figura 14):

Tabla 14. Resultados de las probetas axiales.

RESULTADOS					
ENSAYO	Fuerza máxima (N)	Desplazamiento máximo (mm)	Tensión máxima (MPa)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
A1	2259,28	0,212	3,558	224,21	2806,815
A2	2221,56	0,199	3,542	2328,954	2973,199
A3	1668,68	0,208	3,248	1872,343	3217,955
A4	1971,59	0,177	3,695	3369,115	4154,916

Realizando una comparación entre probetas axiales y radiales, se aprecia una gran semejanza en los ensayos, considerando que los axiales presentan un valor en torno al 13% superior. Es cierto que los mayores módulos elásticos han sido hallados en probetas con menor sección, pero esto será estudiado en mayor profundidad en el siguiente grupo. Según parece, el orientar la probeta de una u otra forma dentro de la propia muela no tiene influencia, ya que la distribución de los granos y el aglomerante no es homogénea, resultando en una composición con aleatoriedad en este sentido, dicho error no es tan elevado como para aportar alguna conclusión relevante en torno a la orientación. Podría decirse que se encuentra la misma similitud entre una probeta axial y una radial, que dos axiales o incluso dos radiales. Esto puede verificarse con las gráficas (Figura 51 y Figura 52), donde sí parece que los desplazamientos han resultado ciertamente menores este caso, pero no es para nada significativo.

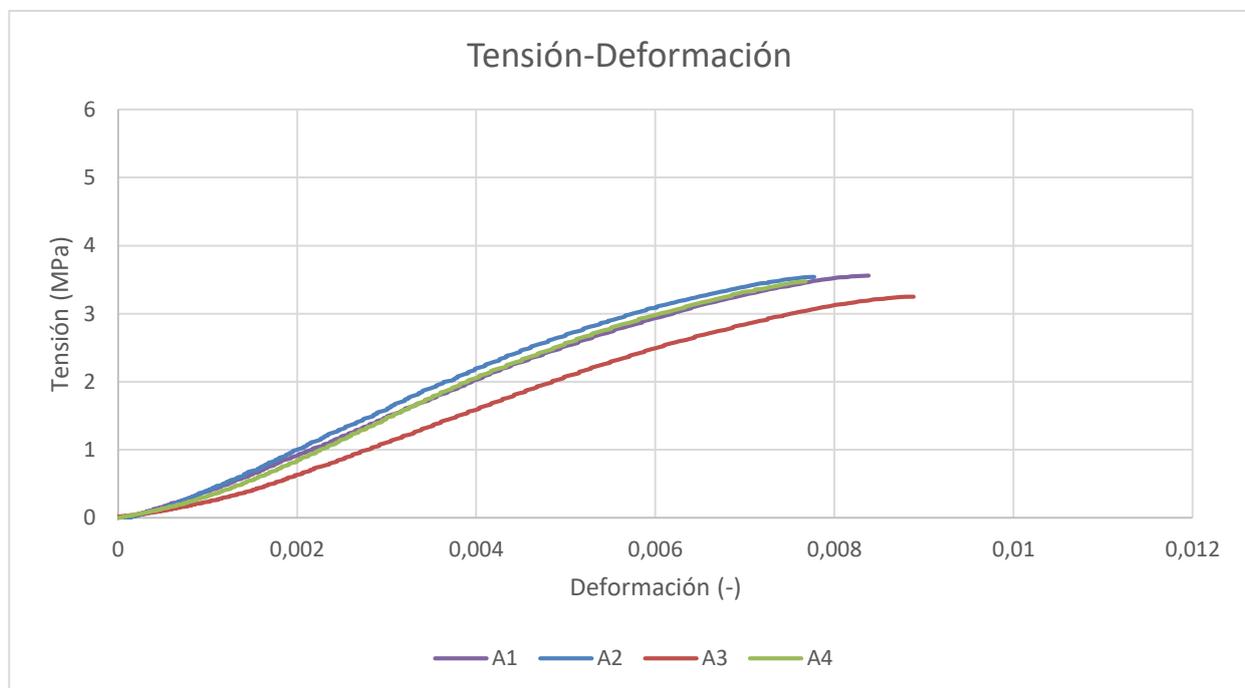


Figura 51. Curva Tensión-Deformación de las probetas axiales.

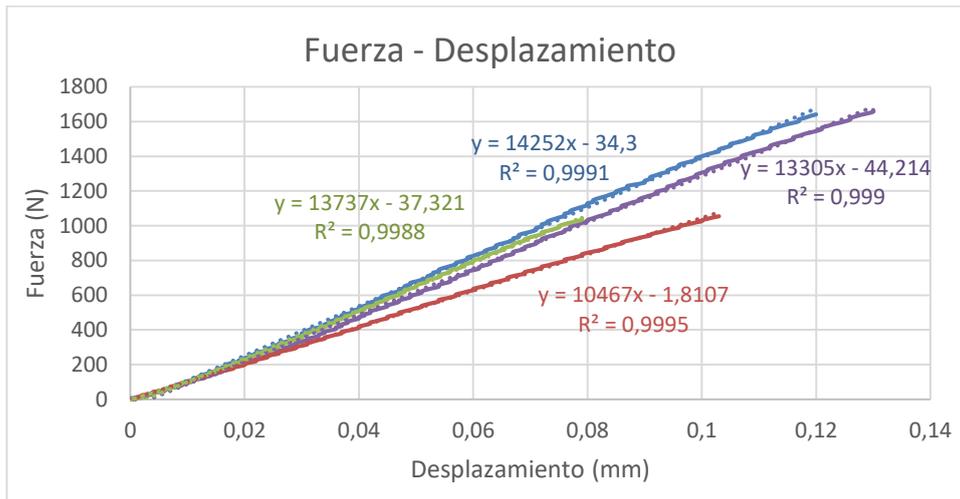


Figura 52. Zona lineal de la curva Fuerza-Desplazamiento de las probetas axiales.

Respecto a las roturas, surgían de la misma manera que en el caso previo, por lo que no es nada destacable. El procedimiento daba lugar a una pequeña grieta, que aproximadamente, alcanzaba la mitad de la altura de la probeta. Cabe mencionar que la grieta no se daba de igual manera ni en la misma posición en cada ensayo, lo cual puede deberse a varios factores, como que la probeta no se encuentre en la misma posición en la máquina, u otro que no pueden controlarse, como composiciones internas en cada sección de la muela.

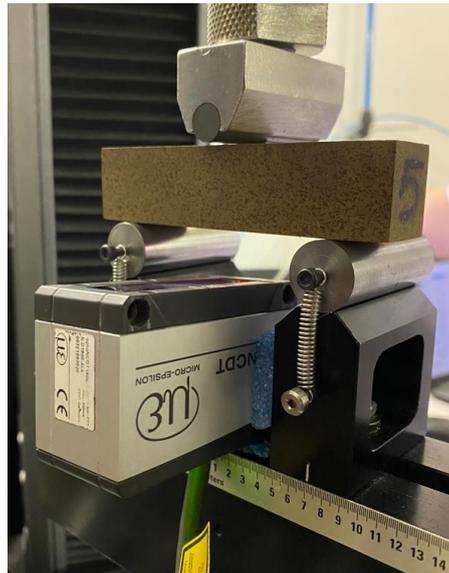


Figura 53. Ensayo sobre probeta axial.



Figura 54. Fractura en una probeta axial.

8.3.1.1.3 OTRAS DIMENSIONES

Con el fin de ver la influencia del tamaño de la sección en el módulo elástico, se decidió no reducir la altura de dos probetas, las cuales fueron siguiendo la orientación axial. Estas probetas presentan la altura de la muela, que según el fabricante son 40mm, pero puede observarse que han resultado algo mayores (Tabla 15).

Tabla 15. Dimensiones de las probetas de sección aumentada.

ENSAYO	DIMENSIONES		
	Base (mm)	Alto (mm)	Largo (mm)
D1	23,7	40,6	100,8
D2	24,75	40,65	100,1

Los resultados de los ensayos indican mayores valores en cada uno de los parámetros (Tabla 16).

Tabla 16. Resultados de las probetas de sección aumentada.

ENSAYO	RESULTADOS				
	Fuerza máxima (N)	Desplazamiento máximo (mm)	Tensión máxima (MPa)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
D1	5447,77	0,308	5,662	953,17	1322,458
D2	5878,74	0,309	5,843	981,296	1266,329

Al presentar una sección de mayor tamaño, la fuerza requerida para llegar a la fractura en ella era notablemente superior a los casos previos, duplicando el valor, e incluso cerca de triplicarlo. Con el desplazamiento máximo sucede lo mismo, a pesar de no diferir tanto, con un error cerca del 30%. Estudiando la expresión matemática del módulo elástico, no debería verse influencia por el aumento de una de las dimensiones de la probeta, sin embargo, como puede observarse, esto sí ha sucedido, obteniendo unos valores inferiores a los resultados previos.

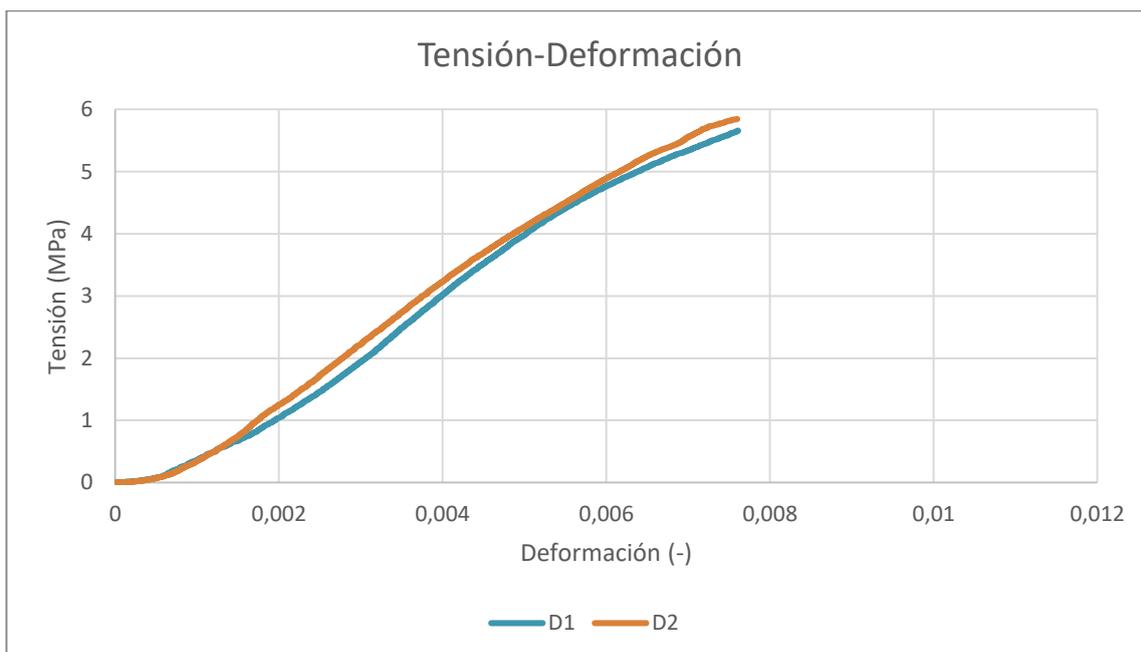


Figura 55. Curva Tensión-Deformación de las probetas de sección aumentada.

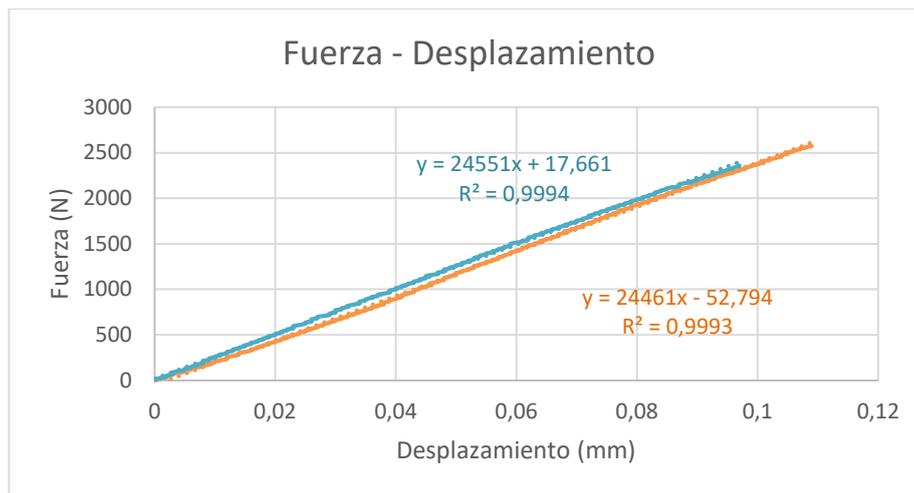


Figura 56. Zona lineal de la curva Fuerza-Desplazamiento de las probetas de sección aumentada.

Por último, respecto a la rotura, en estos dos ensayos las probetas se partían totalmente. La grieta que en casos previos aparecía únicamente en la zona inferior en esta ocasión atravesaba toda la altura de la probeta, resultando en una rotura más notoria, además de sonora.

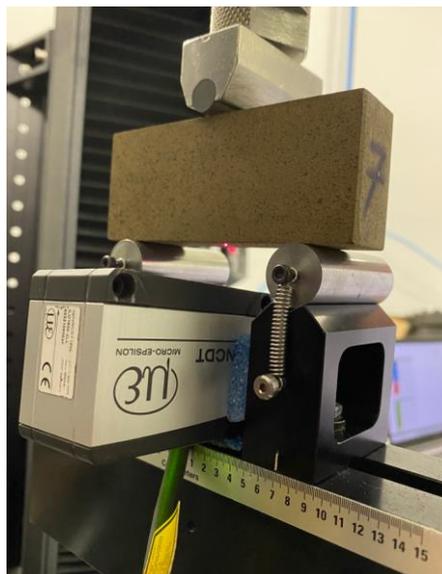


Figura 60. Ensayo sobre probeta de sección aumentada.

8.3.1.2 PROBETAS SUMINISTRADAS POR MANHATTAN

A continuación, se estudian las probetas suministradas por el fabricante. Se dispone de probetas extraídas del núcleo resinoide de la muela, otras sólo de caucho y unas últimas que presentan ambos materiales.

8.3.1.2.1 NÚCLEO

Este primer grupo incluye las extraídas de la zona del núcleo de la muela, presentando un primer caso de resina epoxi y otro de resina estándar. En este caso las probetas no presentan sección cuadrada (Tabla 17):

Tabla 17. Dimensiones de las probetas resinoides de Manhattan.

ENSAYO	DIMENSIONES			RESINA DEL NÚCLEO
	Base (mm)	Alto (mm)	Largo (mm)	
N1	24,89	30,31	103,18	EPOXI
N2	24,84	27,11	101,5	ESTÁNDAR

Tras realizar los ensayos, se han obtenido los siguientes resultados (Tabla 18):

Tabla 18. Resultados de las probetas resinoides de Manhattan.

ENSAYO	RESULTADOS				
	Fuerza máxima (N)	Desplazamiento máximo (mm)	Tensión máxima (MPa)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
N1	7665,27	0,317	10,161	3112,877	2991,773
N2	3570,28	0,17	5,283	3740,473	3625,786

Como puede verse en los gráficos (Figura 57 y Figura 58), no presentan la forma característica de estos, siendo prácticamente lineal, indicando así su mayor fragilidad. Así mismo, existen grandes diferencias entre el comportamiento de los dos núcleos resinoides. El ensayo en el epoxi ha presentado unos valores máximos superiores a la resina estándar, con una superioridad del 53% en la fuerza máxima y del 47% en el desplazamiento, y consecuentemente la tensión. Con esto puede deducirse que la primera resina se caracteriza por unas resistencias mayores. Sin embargo, el módulo elástico obtenido por ambos métodos ha resultado en valores mucho más similares, siendo ciertamente superiores en el segundo ensayo, con un error del 17%.



Figura 57. Curva Tensión-Deformación de las probetas resinoides de Manhattan.

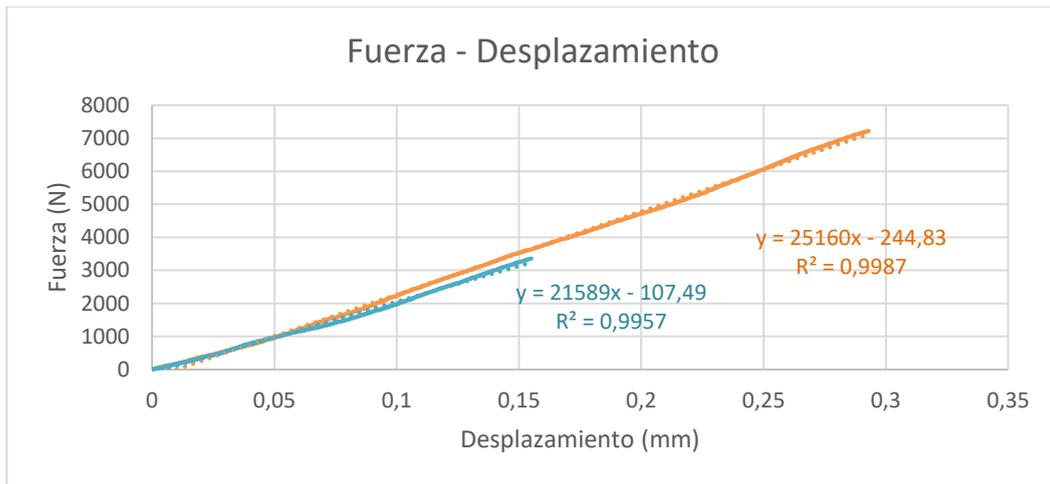


Figura 58. Zona lineal de la curva Fuerza-Desplazamiento de las probetas resinoides de Manhattan.

En cuenta a la fractura, en ambos casos la grieta abarca toda la altura de la probeta. Bien es cierto que en la resina epoxi se da de una manera mucho más ruidosa, lo cual tiene una estrecha relación con sus propiedades resistentes, como ya se ha mencionado previamente.



Figura 59. Fractura de probeta resinoides epoxi de Manhattan.



Figura 60. Fractura de probeta resinoides estándar de Manhattan.

8.3.1.2.2 CAUCHO

El siguiente grupo incluye las probetas que han sido obtenidas de la parte exterior de las muelas, zonas en las que el aglomerante es caucho en su totalidad. Estas han sido clasificadas según la densidad de grano de la muela, a mayores valores, menos caucho se ha empleado. Bien es cierto que, al disponer de una única probeta de cada densidad, no dispondrá de esa veracidad que te asegura la repetitividad de ensayos similares. Aun así, se podrá realizar una comparación entre densidades. Se han ensayado un total de 9 probetas, las cuales presentan las siguientes dimensiones (Tabla 19):

Tabla 19. Resultados de las probetas de caucho de Manhattan.

ENSAYO	DIMENSIONES			DENSIDAD
	Base (mm)	Alto (mm)	Largo (mm)	
C1	25,02	25,02	25,59	2,01
C2	25,47	25,47	25,13	1,633
C3	26,08	26,08	24,62	1,62
C4	24,63	24,63	26,09	1,642
C5	25,15	25,15	25,65	1,613
C6	24,62	24,62	25,42	1,654
C7	25,14	25,14	25,46	1,771
C8	25,07	25,57	25,57	1,581
C9	24,96	25,76	25,76	1,819

Estos son los resultados obtenidos al finalizar cada uno de los ensayos (Tabla 20):

Tabla 20. Resultados de las probetas de caucho de Manhattan.

ENSAYO	RESULTADOS				
	Fuerza máxima (N)	Desplazamiento máximo (mm)	Tensión máxima (MPa)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
C1	3240,28	0,244	5,061	2716,009	3922,2862
C2	2355,119	0,28	3,679	1784,346	1913,759
C3	2043,919	0,258	3,183	1745,43	2005,105
C4	2369,323	0,22	3,687	2111,275	2624,012
C5	2380,889	0,261	3,691	1843,039	2336,372
C6	2518,14	0,254	4,023	2102,126	2692,494
C7	2627,701	0,395	4,105	1374,904	2072,357
C8	2036,584	0,494	3,177	843,464	1213,391
C9	2714,471	0,222	4,222	2457,474	2733,523

Se ha decidido dividir el grupo en dos gráficos, con el fin de no sobrecargar estos, ya que, con un exceso de curvas, no pueden apreciarse adecuadamente. En el primer gráfico (Figura 61) se representan las cinco primeras probetas, mientras que en el segundo (Figura 62) las cuatro últimas. Cabe destacar que no han sido ordenadas de acuerdo a su densidad. Como puede interpretarse de los gráficos, los ensayos en probetas de mayor densidad de grano requieren de una mayor fuerza, alcanzando una flecha máxima menor. Por ejemplo, entre las dos de menor densidad presentan un aumento del 60% respecto a las de más densidad en el desplazamiento, y una reducción del 25% en la fuerza máxima, aproximadamente. Esto haría pensar que estas muelas estarían dotadas de una mayor versatilidad a la hora de ser empleadas en el mundo del rectificado, ya que soportarían mayores esfuerzos, pero no podrían albergar gran cantidad de la viruta eliminada, a pesar de que la diferencia de densidad no es tan elevada.

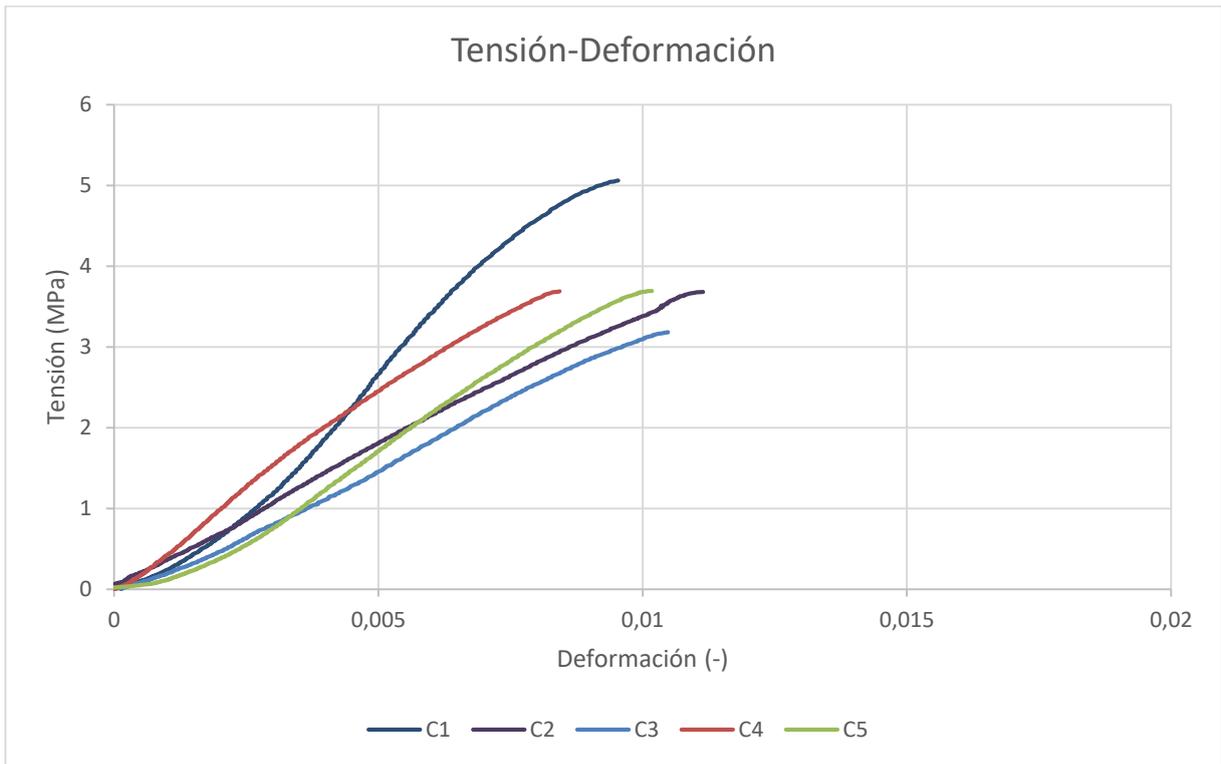


Figura 61. Curva Tensión-Deformación de las probetas de caucho de Manhattan (I).

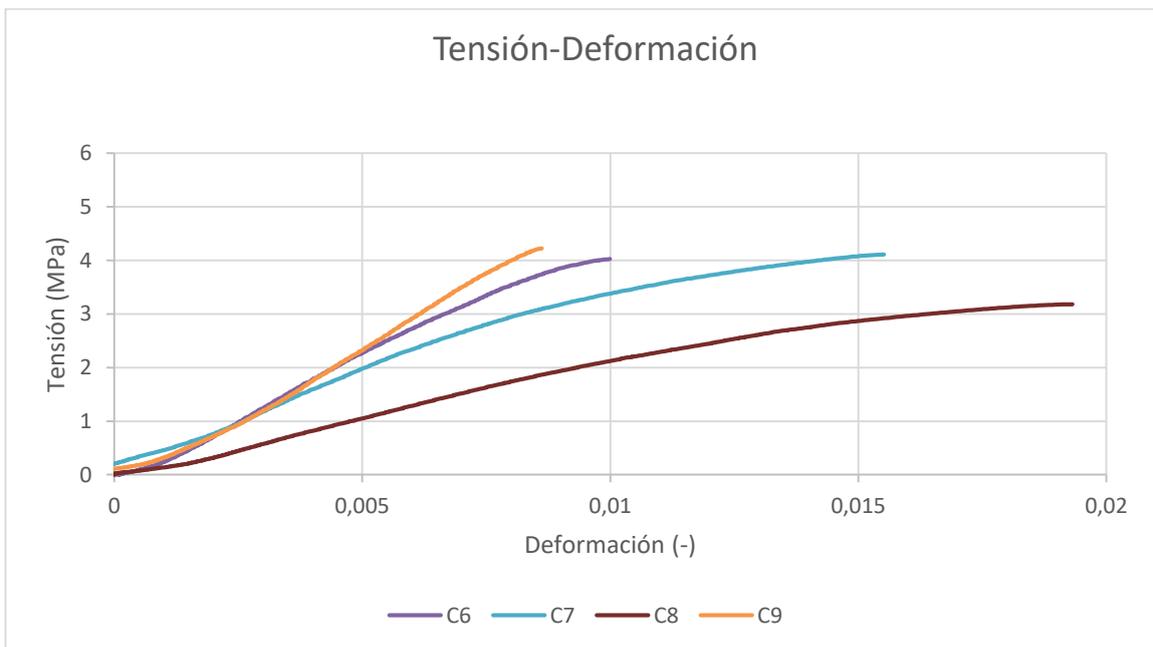


Figura 62. . Curva Tensión-Deformación de las probetas de caucho de Manhattan (II).

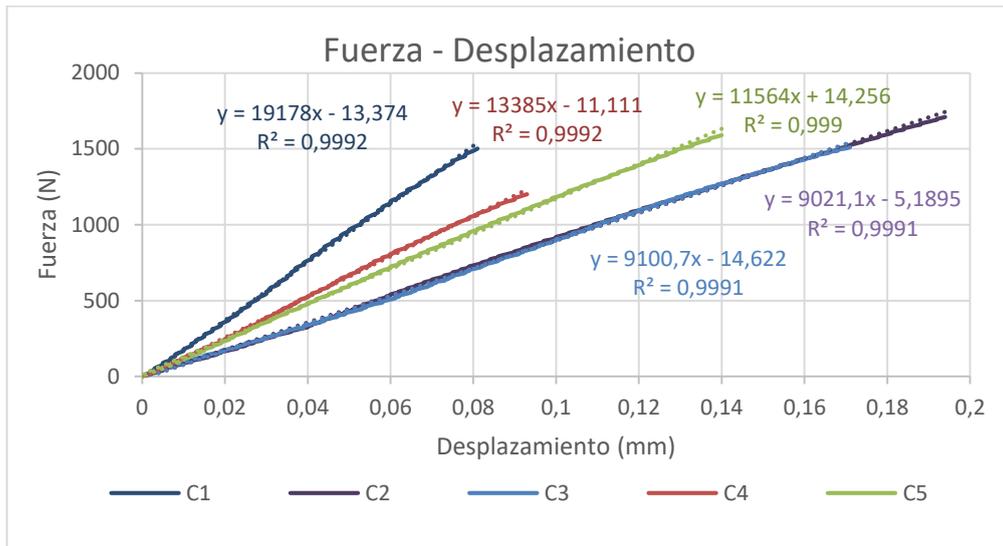


Figura 63. Zona lineal de la curva Fuerza-Desplazamiento de las probetas de caucho de Manhattan (I).

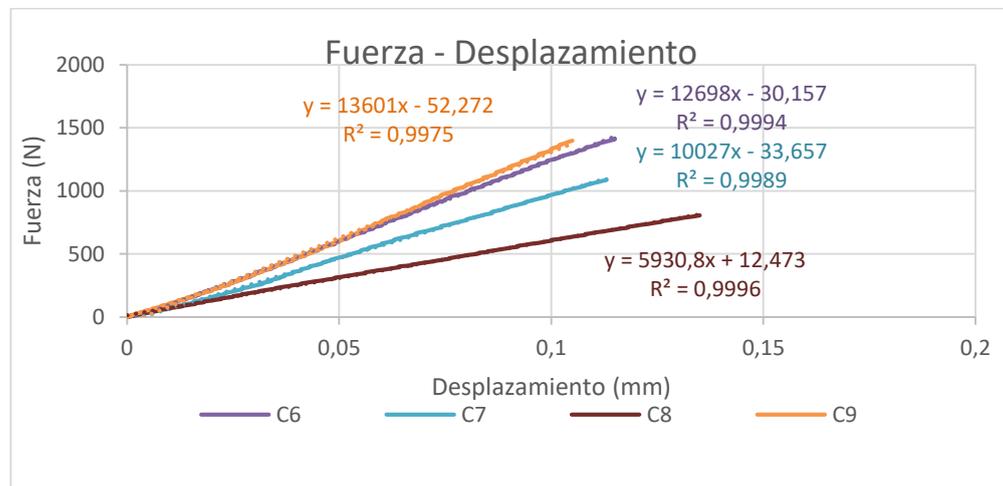


Figura 64. Zona lineal de la curva Fuerza-Desplazamiento de las probetas de caucho de Manhattan (II).

Estudiando la rotura de las probetas que abarca este grupo, no se aprecia una gran diferencia entre ellas. Todas presentan la grieta que penetra en la totalidad de la pieza. Cabe destacar que las probetas presentan un color oscuro debido a tratamientos internos en la empresa, los cuales no se conocen, además del vulcanizado clásico al trabajar este aglomerante. Se puede realizar una breve comparación entre estas probetas y las fabricadas de la muela de caucho, que previamente han sido detalladas. Estudiando los módulos elásticos resultantes en los ensayos previos, la muela trabajada podría presentar una densidad en torno a un valor de 1,65, dato que se desconoce. La curva característica de las probetas con densidad superior a esta ha resultado con una pendiente inferior, en torno al 40%, requiriendo de menores fuerzas, pero mayores desplazamientos, como se ha mostrado en las tablas. Por otro lado, verdaderamente no se conoce la influencia de este recubrimiento encontrado en estas últimas probetas ensayadas. En caso de disponer de dos probetas de la misma densidad de grano, una con recubrimiento y otra sin él, si se podría conocer, pero no ha sido el caso.



Figura 65. Ensayo sobre probeta de caucho de Manhattan.



Figura 66. Fractura de la probeta de caucho de Manhattan.

8.3.1.2.3 MIXTAS

Habiendo estudiado las probetas de caucho y las resina independientemente, en este último grupo se tratarán las probetas que incluyen ambos materiales, obtenidas de la zona de transición o unión de materiales en las muelas. Se han estudiado dos probetas que emplean resina estándar y otros dos epoxis, haciendo coincidir las condiciones de fabricación de una probeta de cada resina (C1 y C2). Estas cuatro probetas presentan el mismo caucho. Además, se incluye una quinta probeta, obtenida de una muela que combinada resina epoxi con un caucho especial, 400FK. En la siguiente Tabla 23 se presentan todas las probetas indicadas.

Tabla 21. Dimensiones de las probetas mixtas de Manhattan.

ENSAYO	DIMENSIONES			COMPOSICIÓN
	Base (mm)	Alto (mm)	Largo (mm)	
M1	25,23	24,99	99,98	Cuacho 400FK / Epoxi
M2	25,36	24,56	100,65	Caucho / S240C1-EP
M3	25,45	24,68	100,36	Caucho / S240C1-ST
M4	24,75	25,84	101,74	Caucho / S240C2-EP
M5	25,58	25,53	100,06	Caucho / S240C2-ST

Los resultados de estos cinco ensayos son los siguientes (Tabla 24):

Tabla 22. Resultados de las probetas mixtas de Manhattan.

RESULTADOS					
ENSAYO	Fuerza máxima (N)	Desplazamiento máximo (mm)	Tensión máxima (MPa)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
M1	1963,3	0,179	3,114	2388,646	2603,125
M2	2174,328	0,3	3,491	1654,238	2070,015
M3	1968,126	0,195	3,133	2262,161	2443,751
M4	2613,943	0,314	4,087	1671,632	2325,559
M5	2566,273	0,25	3,929	2067,991	3055,072

Para analizar las curvas obtenidas, se realizará énfasis en las propiedades distintivas de cada caso. Por un lado, las probetas que disponían de epoxi como resina han resultado en mayores desplazamientos y menores fuerzas que sus análogas de resina estándar. Por otro lado, las fabricadas bajo las condiciones “C1” han presentado menores valores en ambos aspectos. Con esto, se deduce que estas han resultado en una muela de menor resistencia.

Respecto al módulo elástico, que es lo verdaderamente importante, las probetas de epoxi han resultado en un menor valor, al igual que sucedía en los casos en los que se analizaban las probetas de la zona central de la muela. Respecto a las condiciones de fabricación, las trabajadas en las primeras de ellas, han presentado nuevamente un menor valor. Para el caso de esta quinta probeta, la curva presenta dos zonas lineales, las cuales son diferenciadas por un salto en la fuerza, el cual no ha inducido un aumento en el valor de la flecha. Esto puede deberse a múltiples causas, la probeta podía presentar una inclusión o alguna clase de defecto interno, o estar realizando el esfuerzo en una zona porosa. Lo que sí que se puede verificar es que el módulo elástico obtenido en este caso es notablemente inferior al resto.



Figura 67. Curva Tensión-Deformación de las probetas mixtas de Manhattan.

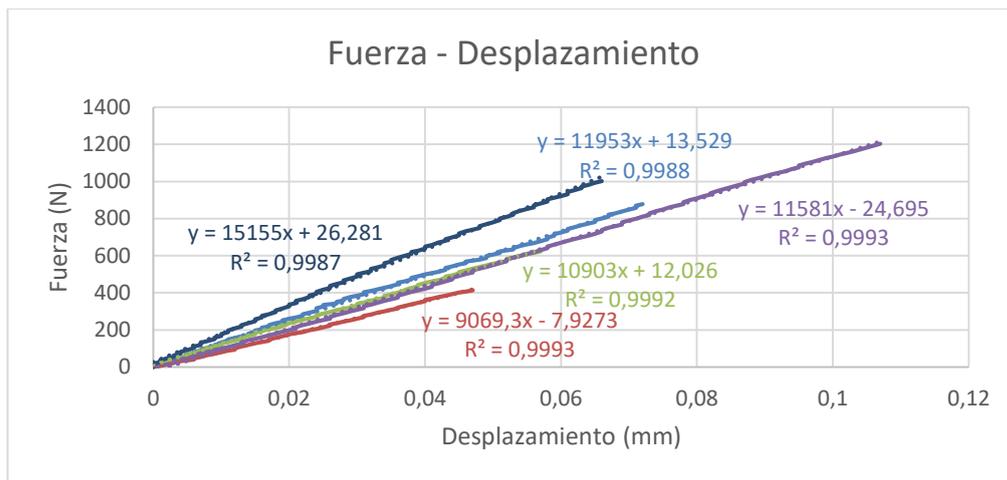


Figura 68. Zona lineal de la curva Fuerza-Desplazamiento de las probetas mixtas de Manhattan.

Cabe destacar que en los cinco ensayos se han situado las almenas de forma frontal. Es un concepto que posteriormente será tratado en profundidad, ya que, en este punto, no se conocía el hecho de que pudiera tener influencia. En todos los casos la rotura se da en la zona de transición de material, ciertamente desviado hacia el caucho, ya que posee unos valores resistentes inferiores a ambas resinas. En las resinas más duras la fractura se ha desplazado en mayor medida hacia el caucho.

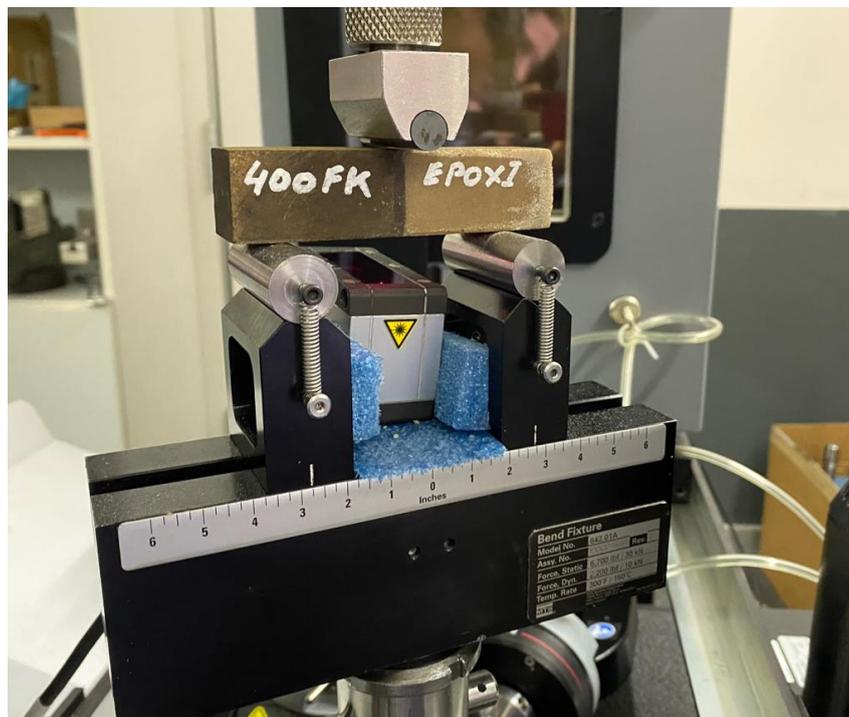


Figura 69. Ensayo sobre probeta mixta de Manhattan.



Figura 70. Fractura de probeta mixta de Manhattan (I).



Figura 71. Fractura de probeta mixta de Manhattan (II).



Figura 72. Fractura de probeta mixta de Manhattan (III).

8.3.2 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS FINALES

Viendo los resultados obtenidos en los ensayos preliminares, se concluyó que era un procedimiento válido para un cálculo estimado del módulo elástico. Por ello, se decidió realizar estos ensayos finales, los cuales abarcarían cuatro clases de probetas, tres de las cuales serían del propio fabricante Manhattan, y unas últimas probetas de fabricantes externos.

Al igual que sucedía en el apartado previo, se detallará la metodología seguida en estos ensayos, así como sus resultados de cada una de las probetas ensayadas, distribuidas en los grupos que han sido mencionados previamente. En los casos en los que se estudian probetas obtenidas del núcleo y de la transición de material, se realizan un total de 10 pruebas, 5 para cada clase de resina. A estas, se le suman 3 probetas de cada uno de los fabricantes externos, dando lugar a un total de 36 probetas.

8.3.2.1 PROBETAS RESINOIDES

En primer lugar, se ensayan las probetas obtenidas de los núcleos de las muelas. En la denominación, se emplea la letra “N” haciendo referencia a la palabra “núcleo” en inglés, *nucleus*. Al igual que sucedía anteriormente, se ha tratado de mantener una sección cuadrada de 25mm de lado, aunque no ha podido realizarse con total precisión, debido a que el pulido es manual, y la colocación en la sierra también. Inicialmente, se presentan las probetas de resina epoxi (Tabla 23):

Tabla 23. Dimensiones de las probetas resinoides de epoxi de los ensayos finales.

ENSAYO	DIMENSIONES		
	Base (mm)	Alto (mm)	Largo (mm)
EPO-N1	24,94	25,15	98,79
EPO-N3	24,86	25,08	100,02
EPO-N5	24,85	25,17	99,85
EPO-N7	24,91	24,87	100,23
EPO-N9	24,95	25,12	100,51

Al ensayar estas, se obtienen los siguientes resultados (Tabla 24):

Tabla 24. Resultados de las probetas resinoides de epoxi de los ensayos finales.

ENSAYO	RESULTADOS				
	Fuerza máxima (N)	Desplazamiento máximo (mm)	Tensión máxima (MPa)	E1 (GPa)	E2 (GPa)
EPO-N1	5024,5	0,655	8,0101	2,6212	2,8772
EPO-N3	5424,1	0,585	8,6996	3,2231	3,5408
EPO-N5	5840	0,571	9,3369	3,4936	4,1434
EPO-N7	5509	0,474	8,8925	4,2051	4,4998
EPO-N9	5401,7	0,596	8,6187	3,1142	3,5646

Las probetas de resina estándar pertenecientes a este primer grupo son las de la siguiente Tabla 25:

Tabla 25. Dimensiones de las probetas resinoides estándar de los ensayos finales.

ENSAYO	DIMENSIONES		
	Base (mm)	Alto (mm)	Largo (mm)
ST-N2	24,93	25,23	98,23
ST-N4	25,02	25,25	99,91
ST-N6	24,87	25,26	100,01
ST-N8	24,97	25,17	100,11
ST-N10	24,93	25,29	99,89

En este caso, los resultados son los siguientes (Tabla 26):

Tabla 26. Resultados de las probetas resinoides estándar de los ensayos finales.

ENSAYO	RESULTADOS				
	Fuerza máxima (N)	Desplazamiento máximo (mm)	Tensión máxima (MPa)	E1 (GPa)	E2 (GPa)
ST-N2	2336	0,245	3,7139	3,2080	3,3559
ST-N4	2171,7	0,25	3,4376	2,9007	3,3007
ST-N6	2391,3	0,269	3,8065	2,9804	3,2186
ST-N8	3461,8	0,309	5,5081	3,8084	4,3896
ST-N10	2738,9	0,335	4,3442	2,7183	3,0451

Como puede verse en estos resultados, se observa cierta disparidad entre ensayos. Respecto a los valores de fuerza suministrados por la máquina, y desplazamientos medidos por el láser, son notablemente superiores para la resina epoxi, y consecuentemente también la tensión. Se aprecia una reducción del 48% en las fuerzas y del 49% en los desplazamientos, aproximadamente. Esto es debido a la mayor capacidad para soportar cargas mecánicas que presenta este material frente al otro, como ya se ha demostrado antes.

Además, para ambas resinas se presentan curvas de tendencia cuasi-lineal (Figura 73 y Figura 75), probando así su fragilidad, como sucedía en los ensayos preliminares, en los que se obtenía un mayor módulo elástico en la estándar que en el epoxi. En este caso, se obtienen valores similares para ambas resinas, con lo que se puede concluir que la diferencia que se obtuvo en el ensayo preliminar se debía a disponer de una única probeta de cada clase, sin poder obtener cierta repetitividad. Eso sí, en ambos casos se cumple que según el método de la pendiente se obtienen valores mayores, en torno al 20% superiores.



Figura 73. Curva Tensión-Deformación de las probetas resinoideas de epoxi de los ensayos finales.

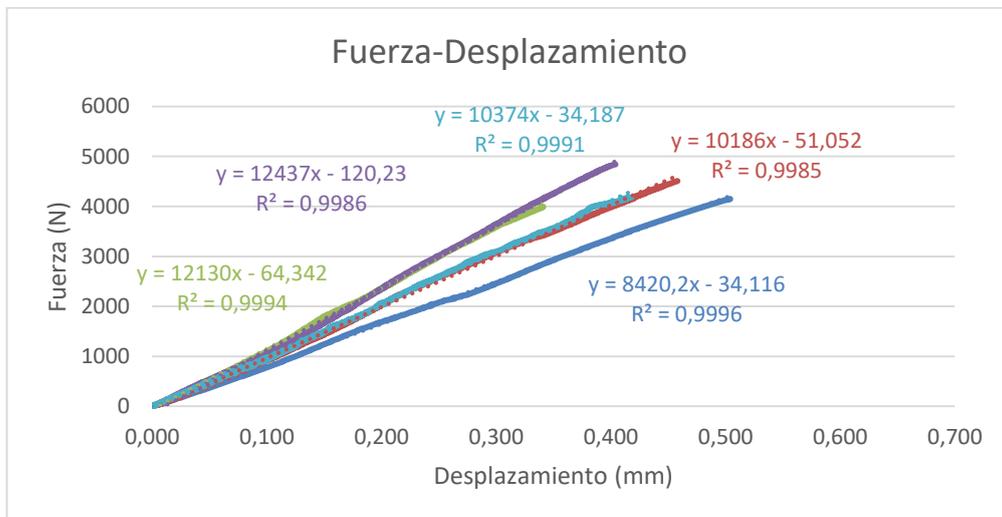


Figura 74. Zona lineal de la curva Fuerza-Desplazamiento de las probetas resinoideas de epoxi de los ensayos finales.

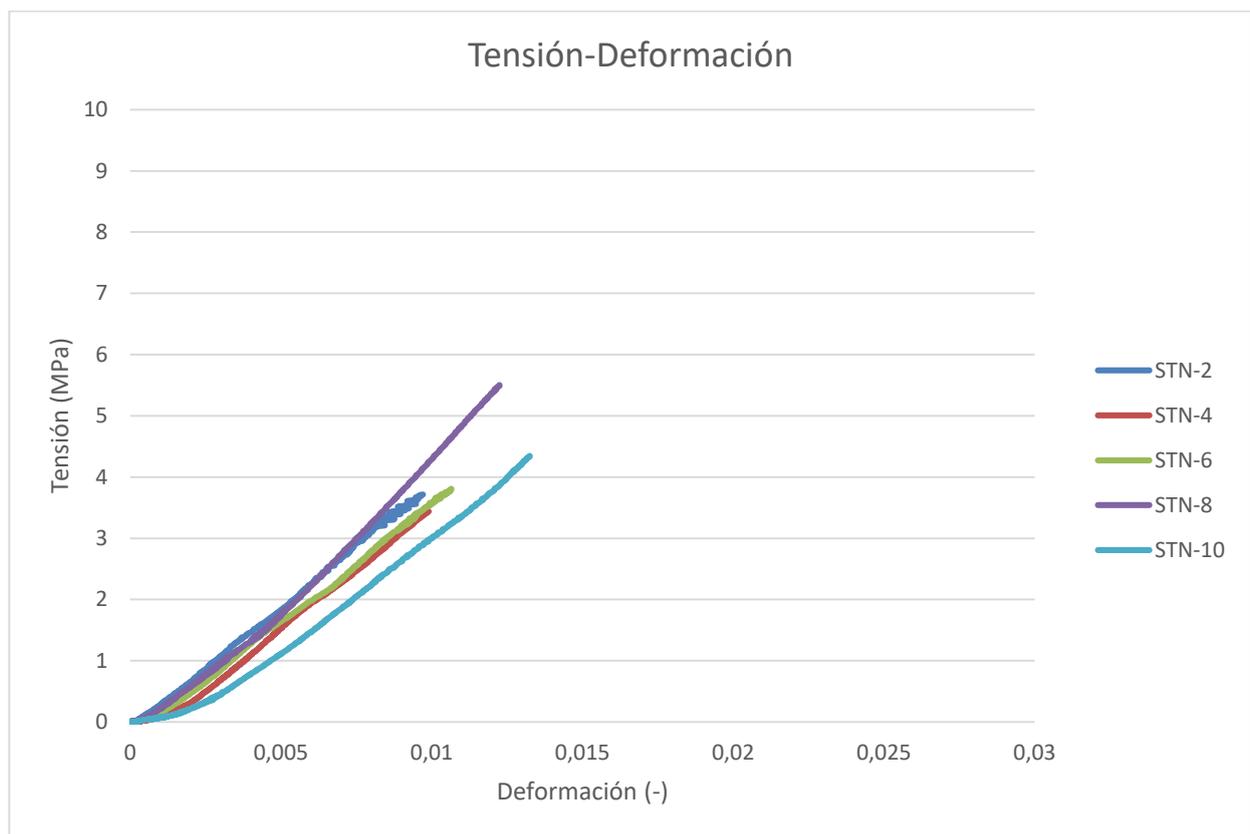


Figura 75. Curva Tensión-Deformación de las probetas resinoides estándar de los ensayos finales.

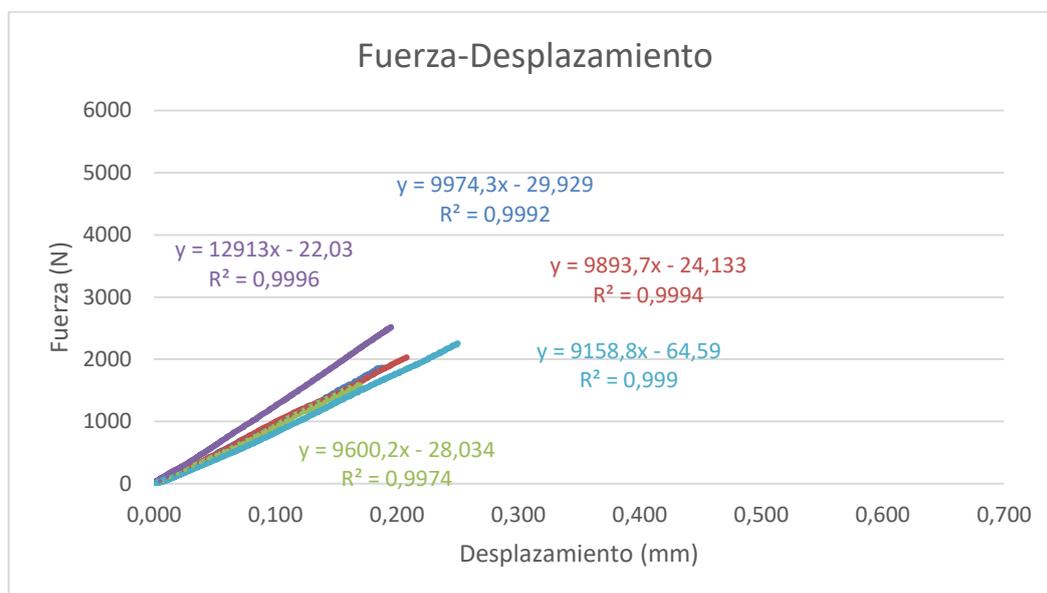


Figura 76. Zona lineal de la curva Fuerza-Desplazamiento de las probetas resinoides estándar de los ensayos finales.

Realizando una comparación en cuanto a la rotura de estas probetas, sucedía de una forma similar a ensayos resinoides previos. Se considera una fractura frágil, en la que la grieta posee una propagación rápida, que se da en el plano de fractura, muy próximo al apoyo central de la probeta, que es el encargado de ejercer la presión.

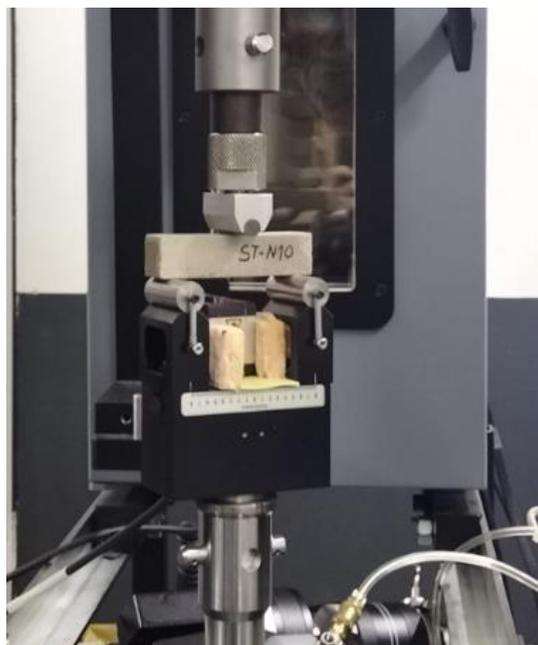


Figura 77. Ensayo sobre probeta resinoides estándar de los ensayos finales.

8.3.2.2 PROBETAS MIXTAS LONGITUDINALES

En estos ensayos no encontramos probetas únicamente formadas por caucho, por lo que se enfocará el interés ahora en las que incluyen ambos materiales. En este primer grupo la unión del material se da en sentido longitudinal en la probeta, es decir, a lo largo de toda su longitud. Para su colocación en la máquina, se optó por trabajar con las secciones de material en vertical, como puede verse en la imagen (Figura 78).



Figura 78. Probeta longitudinal de epoxi de los ensayos finales

Al igual que sucedía previamente, se estudian 5 probetas de resina estándar y 5 de epoxi. Cabe mencionar que en esta ocasión algunas probetas han sido sometidas a un tratamiento especial, asignándoles la letra “R” a su nomenclatura. De esta forma, las probetas de epoxi son las siguientes (Tabla 27):

Tabla 27. Dimensiones de las probetas longitudinales de epoxi de los ensayos finales.

ENSAYO	DIMENSIONES		
	Base (mm)	Alto (mm)	Largo (mm)
EPO-1	24,59	24,88	99,93
EPO-3	24,55	24,84	99,08
EPO-5R	25,12	25,02	99,64
EPO-7	24,48	24,86	98,76
EPO-9	24,66	24,92	99,85

En estos primeros ensayos, los resultados son los siguientes (Tabla 28):

Tabla 28. Resultados de las probetas longitudinales de epoxi de los ensayos finales.

RESULTADOS					
ENSAYO	Fuerza máxima (N)	Desplazamiento máximo (mm)	Tensión máxima (MPa)	E1 (GPa)	E2 (GPa)
EPO-1	3841,6	0,436	6,2792	3,2229	3,2919
EPO-3	4491,2	0,555	7,3648	2,9888	3,5879
EPO-5R	3424,6	0,401	5,4488	2,9733	3,3094
EPO-7	4890,7	0,5	8,0363	3,6084	4,3435
EPO-9	4162,7	0,539	6,7738	2,7944	3,1488

Para el caso de la resina estándar, las probetas trabajadas son las próximas 5 (Tabla 29), a 3 de las cuales se les aplicó ese tratamiento especial.

Tabla 29. Dimensiones de las probetas longitudinales estándar de los ensayos finales.

ENSAYO	DIMENSIONES		
	Base (mm)	Alto (mm)	Largo (mm)
ST-2	24,61	24,85	99,85
ST-4R	24,95	25,1	100,36
ST-6R	24,89	24,98	100,37
ST-8	24,64	24,9	100,31
ST-10R	25,12	24,94	100,36

Y consecuentemente, se obtienen los siguientes resultados (Tabla 30):

Tabla 30. Resultados de las probetas longitudinales estándar de los ensayos finales.

RESULTADOS					
ENSAYO	Fuerza máxima (N)	Desplazamiento máximo (mm)	Tensión máxima (MPa)	E1 (GPa)	E2 (GPa)
ST-2	584,7	0,144	0,9561	1,4930	1,9923
ST-4R	2895,4	0,313	4,6234	3,1912	3,2552
ST-6R	2828,9	0,307	4,5499	3,2638	3,3854
ST-8	808,8	0,258	1,3183	1,1398	1,1398
ST-10R	2066,8	0,224	3,2990	3,2642	3,2642

Conociendo los valores obtenidos en cada uno de los ensayos, se emplearán estos para verificar las relaciones entre materiales destacadas en el caso previo. Se destacaba que la resina epoxi presentaba mayor resistencia que la estándar, precisando de mayores esfuerzos para la obtención de la fractura. En este caso, sucede exactamente igual, resultando incluso en una mayor diferencia, siendo en torno a un 60% superior para las fuerzas y 50% superior para los desplazamientos.

Analizando los valores de módulo elástico, se presenta un caso especial, en el que se aprecia la influencia de este tratamiento aplicado a ciertas probetas. Para el caso de la resina estándar, las que lo han sufrido presentan un valor aproximadamente tres veces superior a las que no, siendo realmente próximo a los obtenidos en las epoxi, con un error del 8%. En cambio, analizando este último grupo, el tratamiento fue aplicado en una de ellas, y no ha condicionado el ensayo.

Por último, se puede analizar las curvas obtenidas. Los ensayos en epoxi han obtenido gráficos ciertamente similares a las probetas resinoides, donde no puede observarse influencia del tratamiento de la probeta 5R, verificando lo anterior. Sin embargo, para la resina estándar, dicho procedimiento de tratado aplicado a las probetas 4R, 6R y 10R, ha provocado una gran linealidad, con un valor de R^2 de prácticamente la unidad, precisando de un mayor esfuerzo. Así mismo, las probetas que no fueron tratadas no han presentado este comportamiento frágil, obteniendo curvas más propias del carácter dúctil, donde la zona lineal es mucho menor.



Figura 79. Curva Tensión-Deformación de las probetas longitudinales de epoxi de los ensayos finales.

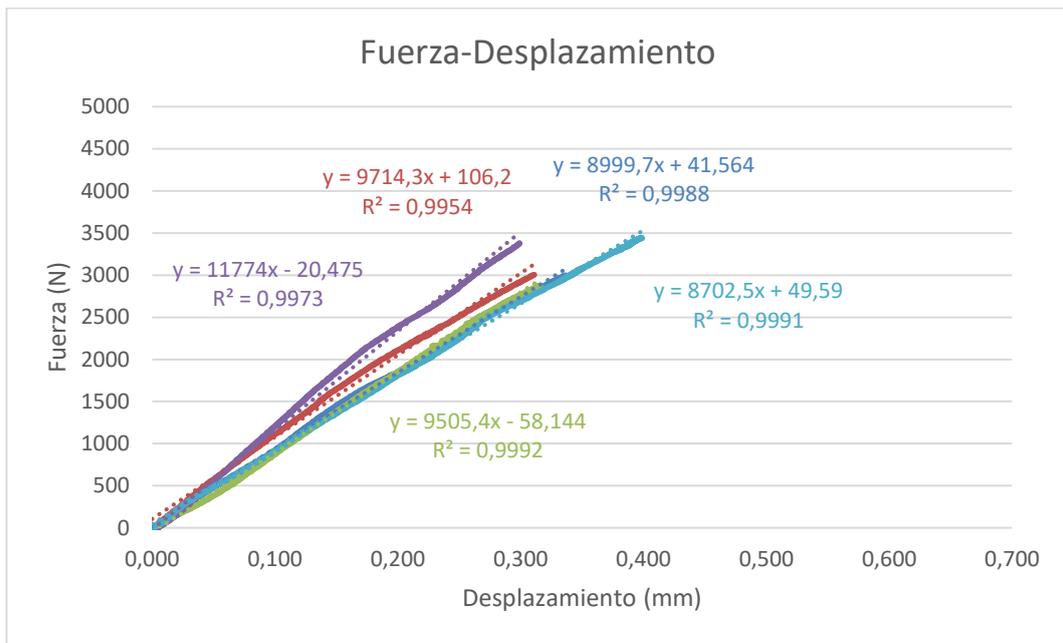


Figura 80. Zona lineal de la curva Fuerza-Desplazamiento de las probetas longitudinales de epoxy de los ensayos finales.



Figura 81. Curva Tensión-Deformación de las probetas longitudinales estándar de los ensayos finales.



Figura 82. Zona lineal de la curva Fuerza-Desplazamiento de las probetas longitudinales estándar de los ensayos finales.

Esta distribución del material no ha resultado en una influencia en la rotura, ya que se obtenía de una forma análoga a los casos previos. Esto era realmente previsible, ya que el poseer tanto la resina como el caucho en sentido longitudinal a lo largo de toda la probeta, no podía condicionar la rotura, ya que se tiene que dar en perpendicular a estos, debido a la distribución de los puntos de apoyo y el punto central que ejerce la fuerza.



Figura 83. Ensayo sobre probeta longitudinal de los ensayos finales.

8.3.2.3 PROBETAS MIXTAS TRANSVERSALES

Se dispone de otro conjunto de probetas que presentan ambos materiales, sin embargo, en esta ocasión, la unión entre ellos se da en sentido transversal (Figura 84), de forma perpendicular a como se realizaba en el apartado anterior. Nuevamente, se trabajan 5 probetas de cada resina, pero en esta ocasión no se ha aplicado el tratamiento del caso previo. La letra “B” ha sido la asociada a estos ensayos. Además, se introduce el concepto de las almenas, con las que se realizarán varias pruebas para ver así su influencia en el módulo elástico. Estas son consideradas una pequeña estructura interna de la unión de los materiales, con la que se definirá la orientación de la probeta.



Figura 84. Probeta transversal de epoxi de los ensayos finales.

En primer lugar, se presentan las probetas de epoxi que han sido ensayadas (Tabla 31):

Tabla 31. Dimensiones de las probetas transversales de epoxi de los ensayos finales.

ENSAYO	DIMENSIONES		
	Base (mm)	Alto (mm)	Largo (mm)
EPO-B1	24,25	24,84	100,13
EPO-B3	24,23	24,89	100,06
EPO-B5	24,86	24,25	99,94
EPO-B7	24,84	24,24	100,25
EPO-B9	24,9	24,33	99,87

De estas, se han obtenido estos resultados (Tabla 32):

Tabla 32. Resultados de las probetas transversales de epoxi de los ensayos finales.

ENSAYO	RESULTADOS				
	Fuerza máxima (N)	Desplazamiento máximo (mm)	Tensión máxima (MPa)	E1 (GPa)	E2 (GPa)
EPO-B1	1600,1	0,198	2,6563	3,0217	3,4475
EPO-B3	1385,2	0,188	2,2969	2,7297	3,4304
EPO-B5	1393,8	0,172	2,3120	3,3331	3,9821
EPO-B7	1263,9	0,159	2,0991	3,2790	4,1244
EPO-B9	1508,7	0,189	2,4904	3,2245	3,6722

Para el caso de la resina estándar, los ensayos han sido sobre estas probetas (Tabla 33):

Tabla 33. Dimensiones de las probetas transversales estándar de los ensayos finales.

ENSAYO	DIMENSIONES		
	Base (mm)	Alto (mm)	Largo (mm)
ST-B2	24,26	24,82	100,1
ST-B4	24,31	24,79	100,1
ST-B6	24,82	24,26	100,27
ST-B8	24,79	24,25	100,17
ST-B10	24,68	24,24	100,25

Así mismo, los valores suministrados por la máquina y el láser, además de los calculados, son los indicados en la próxima Tabla 34:

Tabla 34. Resultados de las probetas transversales estándar de los ensayos finales.

ENSAYO	RESULTADOS				
	Fuerza máxima (N)	Desplazamiento máximo (mm)	Tensión máxima (MPa)	E1 (GPa)	E2 (GPa)
ST-B2	1281,1	0,192	2,1276	2,5039	3,1702
ST-B4	1383	0,209	2,2949	2,4931	3,1267
ST-B6	1398,3	0,185	2,3222	3,1075	3,4621
ST-B8	1263,9	0,148	2,1635	3,6248	4,1113
ST-B10	1508,7	0,189	2,4773	2,6751	3,3329

Antes de nada, se tratará el concepto de las almenas y su función principal. Durante el proceso de fabricación de las muelas abrasivas con núcleo resinoide, se requiere de un procedimiento de torneado interior. Para disponer de una mayor superficie de contacto en la muela, se fabrica la resina, en la cual se deja la huella del torneado, y posteriormente se echa el caucho. Entonces, mediante la inclusión de las almenas, se desarrolla un mejor pegado entre la resina y la muela.

Entonces, para disponer de una mayor versatilidad entre los ensayos, se ha optado por variar la orientación de las almenas, o la propia colocación de la probeta, descentrándola en ocasiones, para así conocer la posible recolocación de la fractura en cada una de ellas. Las probetas de epoxi han sido ensayadas de la siguiente manera (Tabla 35):

Tabla 35. Distribución de las almenas en las probetas transversales de epoxi de los ensayos finales.

ENSAYO	ALMENAS	COLOCACIÓN	DESVIACIÓN
EPO-B1	Frente	Centrada	-
EPO-B3	Frente	Centrada	-
EPO-B5	Frente	Centrada	-
EPO-B7	Arriba	Descentrada	Hacia la resina
EPO-B9	Arriba	Descentrada	Hacia el caucho

Los ensayos de resina estándar se han realizado siguiendo la siguiente disposición (Tabla 36):

Tabla 36. Distribución de las almenas en las probetas transversales estándar de los ensayos finales.

ENSAYO	ALMENAS	COLOCACIÓN	DESVIACIÓN
ST-B2	Frente	Centrada	-
ST-B4	Frente	Centrada	-
ST-B6	Frente	Centrada	-
ST-B8	Arriba	Descentrada	Hacia el caucho
ST-B10	Arriba	Descentrada	Hacia el caucho

En este caso, sin analizar la orientación y la colocación, los resultados obtenidos presentan una gran similitud entre ambas resinas. Tanto los valores de fuerza requeridos para la rotura, como el desplazamiento máximo obtenido antes de ella, y consecuentemente la tensión, han resultado ser realmente próximos, donde no se puede apreciar la diferencia de material que se daba en casos previos. Con el módulo elástico sucede exactamente lo mismo. Se presentan aumentos del orden del 7% para los desplazamientos y disminuciones del 10% de las fuerzas máximas en los ensayos de resina estándar, llegando a una reducción del 8% en el módulo elástico, aproximadamente.

Comparando estos resultados con los casos previos, los límites elásticos estimados son similares, en torno a los 4MPa. Sin embargo, según puede verse en las curvas características (Figura 85 y Figura 87), no presentan un comportamiento tan frágil, siendo menor la longitud de la zona lineal, además de presentar valores límite menores. Bien es cierto que, analizando las dos resinas entre sí, el epoxi ha requerido de mayores esfuerzos, mientras que las estándar han resultado en mayores desplazamientos, aunque la diferencia no es tal para considerarla significativa.

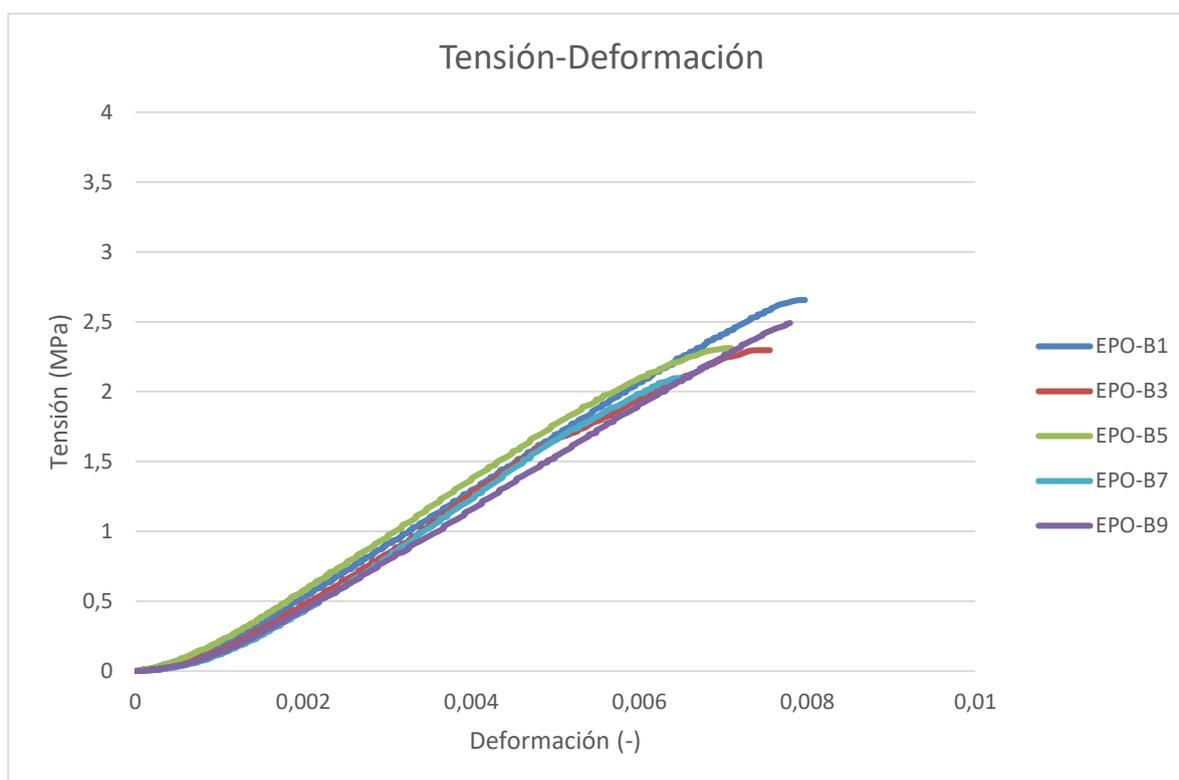


Figura 85. Curva Tensión-Deformación de las probetas transversales de epoxi de los ensayos finales.

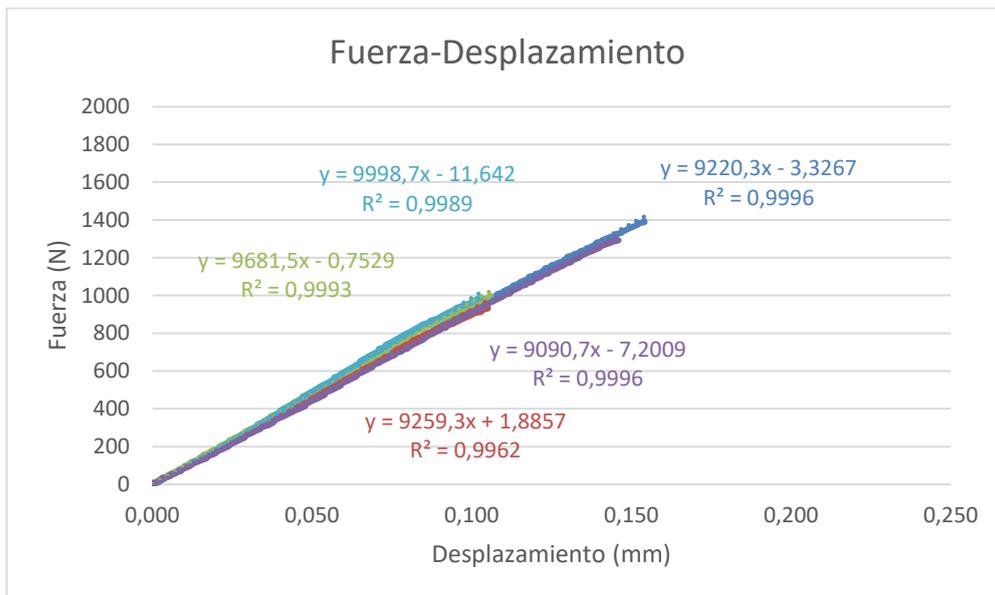


Figura 86. Zona lineal de la curva Fuerza-Desplazamiento de las probetas transversales de epoxi de los ensayos finales.

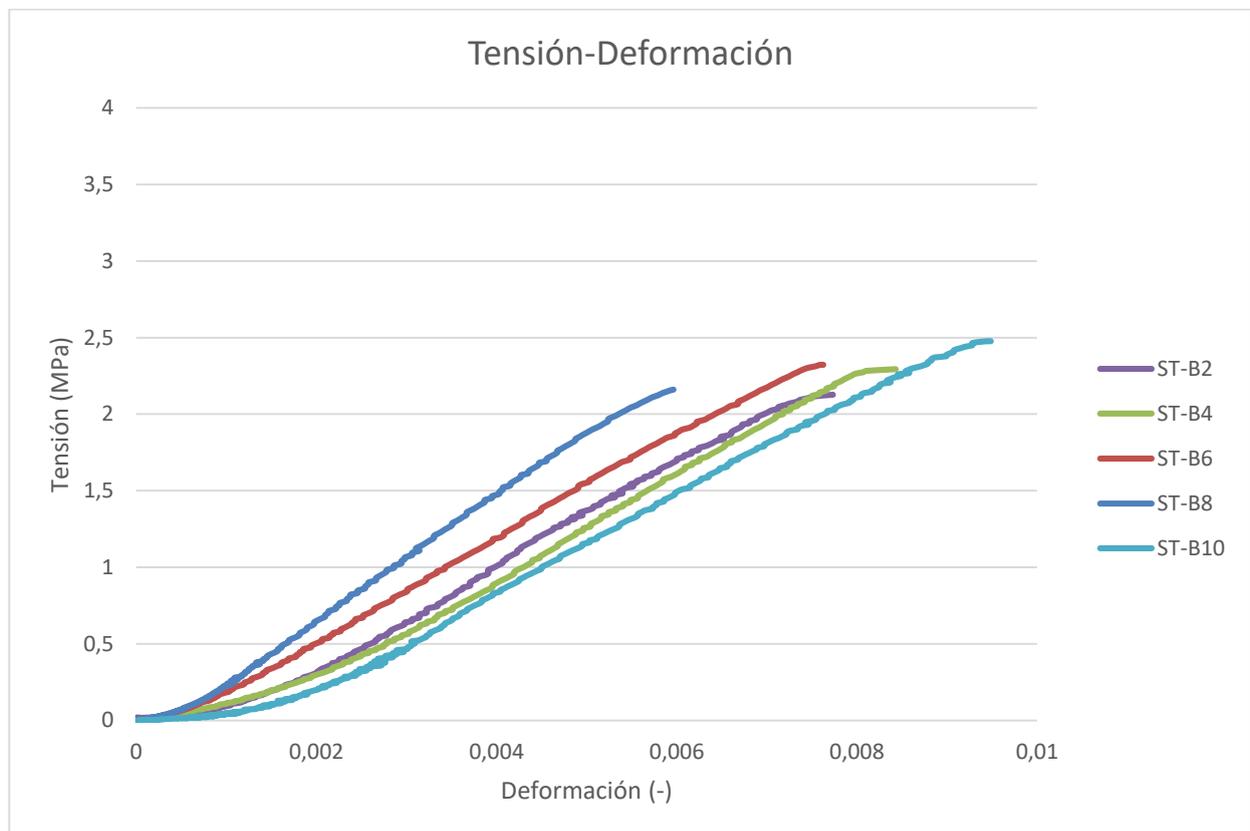


Figura 87. Curva Tensión-Deformación de las probetas transversales estándar de los ensayos finales.

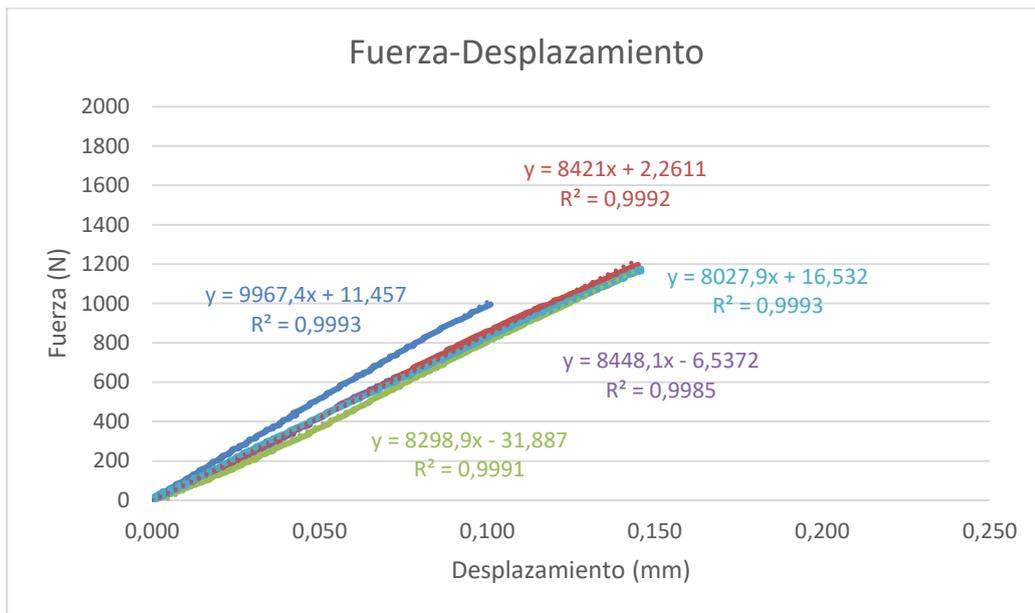


Figura 88. Zona lineal de la curva Fuerza-Desplazamiento de las probetas transversales estándar de los ensayos finales.

Respecto a las pruebas de variación de orientación en las probetas, las dispuestas con las almenas frontales y centradas presentan una mayor homogeneidad en los resultados, dándose la rotura en la zona central. El orientar las almenas en la dirección del eje de la máquina, es decir, hacia arriba, aumenta los módulos elásticos obtenidos en los ensayos en torno al 7%, debido a sus capacidades resistivas, dotando a las probetas de una mayor rigidez y resistencia, ya que actúa a modo de un pegado mejor. Por otro lado, el desviar la zona en la que se ejerce la fuerza hacia el caucho provoca que la rotura ocurra más alejada de la zona central, mientras que el desviarla hacia la resina no la desvía en gran medida hacia esta. Con ello, se deduce que la resistencia y la influencia de esta son notablemente superiores a las del caucho, como ya se ha demostrado en varias pruebas.

8.3.2.4 OTROS FABRICANTES

Para finalizar, en el último grupo se incluyen las probetas obtenidas de manos de otros fabricantes. Se disponen de probetas pertenecientes a dos fabricantes externos, referenciadas como “IK” y “NOR”. De esta forma, se trabajan 3 probetas de cada origen, siendo las “IK” las siguientes (Tabla 37):

Tabla 37. Dimensiones de las probetas IK de los ensayos finales.

ENSAYO	DIMENSIONES		
	Base (mm)	Alto (mm)	Largo (mm)
IK1	24,9	24,81	100,1
IK2	24,8	24,82	99,94
IK3	24,77	24,85	100,2

En la siguiente Tabla 38 se indican sus resultados:

Tabla 38. Resultados de las probetas IK de los ensayos finales.

ENSAYO	RESULTADOS				
	Fuerza máxima (N)	Desplazamiento máximo (mm)	Tensión máxima (MPa)	E1 (GPa)	E2 (GPa)
IK1	3250,7	0,311	5,2620	3,8293	4,1574
IK2	5210,6	0,345	8,4651	5,5442	6,1517
IK3	4601,5	0,346	7,4756	4,8585	5,0714

Para las probetas “NOR”, se trabajan las siguientes (Tabla 39):

Tabla 39. Dimensiones de las probetas NOR de los ensayos finales.

ENSAYO	DIMENSIONES		
	Base (mm)	Alto (mm)	Largo (mm)
NOR1	24,9	24,95	99,87
NOR2	25,07	24,97	100,4
NOR3	25,03	24,75	100,3

Análogamente, los resultados obtenidos son los presentados en la próxima Tabla 40:

Tabla 40. Dimensiones de las probetas NOR de los ensayos finales.

ENSAYO	RESULTADOS				
	Fuerza máxima (N)	Desplazamiento máximo (mm)	Tensión máxima (MPa)	E1 (GPa)	E2 (GPa)
NOR1	4499,5	0,117	7,2426	13,6981	16,8414
NOR2	4312,6	0,092	6,8892	16,5173	21,0763
NOR3	4832,7	0,123	7,8011	14,4938	12,4954

En esta ocasión, se observa una gran diferencia entre ambos grupos. Las últimas en analizar presentan unos valores de módulo elástico y tensión máxima notablemente superiores a las primeras, debido a lo cual se alejan en mayor medida del comportamiento ideal de una muela de caucho, siendo las primeras mucho más fieles a este. Consecuentemente, se ha presenciado que las probetas “IK” presentan un módulo elástico con una disminución del 70% respecto a las “NOR”, mientras que las tensiones disponían de gran similitud, pero con mayor versatilidad, y en los desplazamientos se detectaban menores valores en estas últimas probetas “NOR”, en torno al 30%.

Por otro lado, si bien es cierto que los valores máximos de fuerza son similares en ambos fabricantes, los desplazamientos de las probetas IK son mucho mayores, incluso triplicando las NOR. Esto puede verse en las curvas obtenidas, donde se observa la mayor linealidad de este primer grupo. Cabe mencionar que, en una de las probetas, concretamente la “NOR3” se ha obtenido un comportamiento extraño al final del ensayo, donde la curva deja de ser una línea clara. La razón de esto es desconocida, pudiendo haber sido una pequeña vibración o incluso haberse debido a la composición interna de la probeta, y que la grieta haya pasado por varias inclusiones o poros, obteniendo así cierto ruido en su curva característica.



Figura 89. Curva Tensión-Deformación de las probetas de otros fabricantes de los ensayos finales.

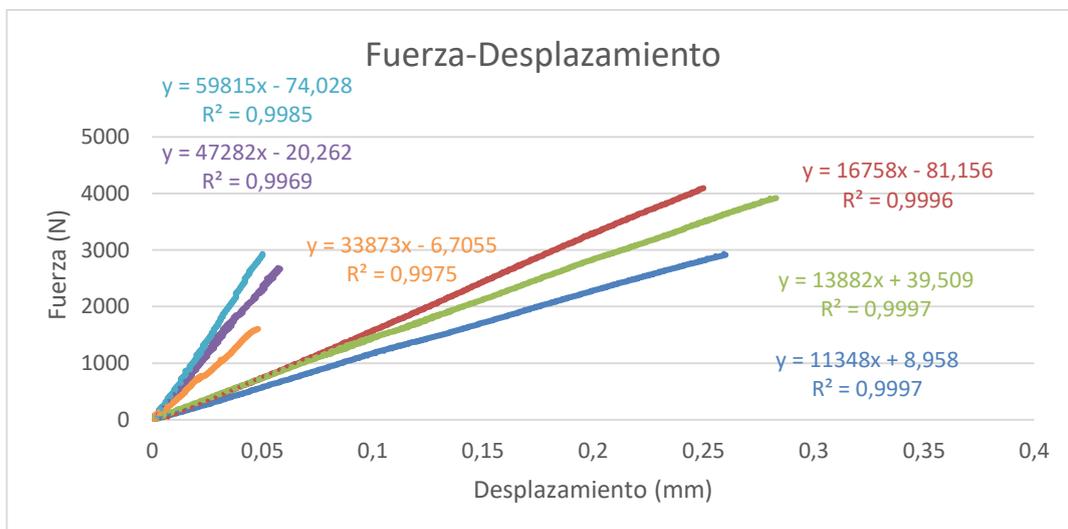


Figura 90. Zona lineal de la curva Fuerza-Desplazamiento de las probetas de otros fabricantes de los ensayos finales.

DOCUMENTO III – MEMORIA

Por último, respecto a su modo de fractura, existía una clara diferencia entre fabricantes. En ambos casos aparecía la grieta de rotura, que atravesaba la probeta en su totalidad. Sin embargo, mientras que en las probetas “NOR”, era una rotura menos visual y menos sonora, en las “IK” sucedía totalmente lo contrario.



Figura 91. Ensayo sobre probeta IK de los ensayos finales.

9 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

En este apartado, se presentarán las conclusiones a las que se ha llegado una vez se han finalizado las baterías de ensayos, considerando los objetivos destacados en los inicios del proyecto. Se ha decidido agrupar las conclusiones en varios puntos, con el fin de facilitar su desarrollo:

➤ Metodología de ensayo

En primer lugar, se analizará la viabilidad de la metodología desarrollada. De acuerdo a datos suministrados por el fabricante *Manhattan*, las muelas de caucho presentan un límite de elasticidad entre 8 y 2 GPa, en la próxima Tabla 41 se pueden encontrar los valores para algunas muelas. Observando los resultados de los ensayos preliminares, los obtenidos para este parámetro siguiendo el procedimiento de limitación de la curva Fuerza-Desplazamiento a su zona lineal y posterior obtención de la pendiente se adaptan a este intervalo, con un error del 30% respecto a su valor medio; mientras que los obtenidos de acuerdo a la inclusión de los valores máximos en las expresiones matemáticas presentan un error superior, en torno al 55%. Por ejemplo, se puede comparar el módulo elástico de la probeta de la muela FK400. Según se observa en esta misma Tabla 41, el valor de módulo elástico suministrado por el fabricante es de 2,623GPa, mientras que siguiendo el procedimiento de ensayo se ha obtenido uno de 2,603GPa, lo cual es una clara conclusión de la validez de la metodología, con un error del 8%. Cabe destacar que los errores previamente mencionados presentan tal diferencia respecto a esta probeta en concreto debido a que, al haber realizado tantos ensayos, la variabilidad es mucho mayor, además de que las probetas ensayadas no se corresponden con las indicadas en la tabla.

Tabla 41. Ejemplos de muelas de Manhattan.

MUELA	MÓDULO ELÁSTICO (GPa)	DENSIDAD (g/cm ³)
AA70-O8R3	8,451	2,7
OL120MB25	5,382	2,25
OL240MB	4,121	2,06
FK400	2,623	1,613
WAOL400MB1 (CRNor)	4,482	1,87
WAOL400MB1 (CRFino)	4,467	1,87
IKEMURA	2,686	1,68

A pesar de no conocer con exactitud el módulo elástico de todas las muelas trabajadas, se han obtenido unos valores coherentes, lo cual es un dato en favor de la viabilidad de la metodología de ensayo planteada. Bien es cierto que el procedimiento de la pendiente presenta una mayor precisión que empleando los valores máximos, lo cual hace que presente una mayor viabilidad y exactitud como procedimiento de cálculo del módulo elástico, como se ha indicado con los errores previamente.

Además, cabe recordar que en esta metodología se ha empleado el procedimiento de ensayo establecido en los ensayos vítreos. En dichos ensayos, se concluyó que, la forma óptima para la estimación del límite elástico es la medición del desplazamiento sufrido por la probeta en cada instante mediante un láser de precisión, para posteriormente obtener sus curvas Tensión-Deformación y Fuerza-Desplazamiento. Precisamente, esta última es procesada en profundidad, limitándola a su zona lineal, y calculando su pendiente, se estima el módulo de Young de dicha probeta. Dicho cálculo de pendiente es un procedimiento para la corrección del error que puede darse empleando los valores máximos.

➤ Ensayos sobre caucho

Por un lado, analizando los resultados de ambas baterías de ensayos, pueden destacarse ciertas similitudes, con las que se llega a puntos comunes. En primer lugar, las probetas obtenidas de los núcleos resinoides presentan un límite elástico en torno al 40% mayor que las análogas de caucho, como se ha comprobado previamente. Este es el principal motivo de la inclusión de dichos núcleos en las muelas abrasivas de caucho, con el fin principal de aumentar la resistencia del conjunto. Consecuentemente, el núcleo será la zona que en mayor medida soporte los esfuerzos, de las muelas que lo incluyan, haciendo así que la rotura se dé siempre hacia su zona exterior, es decir, hacia el caucho (Figura 92).



Figura 92. Ejemplo de rotura de probeta con núcleo resinoides.

Como ya se ha mencionado, se han estudiado dos resinas diferentes, la denominada estándar por el fabricante, y el epoxi. De acuerdo a los resultados, las probetas de esta última resina han concluido en módulos elásticos en torno al 10% superiores en la mayoría de los casos (a excepción de las probetas de unión transversal de los ensayos finales, donde presentan de gran similitud), lo cual es una prueba de su gran resistencia a cargas mecánicas, como son los ensayos de flexión. Entonces, para este tipo de aplicación, la resina epoxi presentaría un mejor comportamiento, mayormente debido a que incrementaría las capacidades resistivas del conjunto en mayor medida. Bien es sabido que este tipo de resina es un producto de gran versatilidad y utilidad, y este es su principal motivo.

Sin embargo, tal y como sucede en esta clase de materiales, puede deducirse que la resina epoxi se caracterizará también por un comportamiento de mayor fragilidad, en comparación a la plasticidad que presenta la resina estándar. En las próximas dos figuras (Figura 93 y Figura 94) se recogen las curvas características Tensión-Deformación obtenidas de las probetas resinoides. Se han seleccionado estas ya que, al no presentar caucho, se comprobará la influencia de la resina de una manera más sencilla. Según puede observarse, las resinas estándar han presentado un módulo elástico con una reducción en torno al 55% respecto a las epoxi, con lo que se verifica la mayor resistencia de estas últimas.



Figura 93. Comparativa de las tensiones de rotura entre resinas epoxi.



Figura 94. Comparativa de las tensiones de rotura entre resinas epoxi.

Puede establecerse también una comparación entre probetas de una misma resina, pero comparando todas las tipologías ensayadas, es decir, sólo parte resinoide, mixtas en sentido transversal y mixtas en sentido longitudinal. Se ha escogido la resina epoxi ya que previamente se ha concluido que es más apropiada para dicha aplicación, pero con la resina estándar ocurre lo mismo. Según puede observarse, en las probetas que sólo disponen de núcleo resinoide, se presenta una curva con una mayor linealidad, asociada a un comportamiento más frágil, mientras que en las longitudinales y transversales se observa un comportamiento de mayor ductilidad, en el que se aprecia cierta curvatura al finalizar la zona lineal. Además, se presentan reducciones en los valores de tensión de rotura en ambos casos, siendo de, aproximadamente un 70% en las probetas transversales y un 20% en las longitudinales. Con esto, puede concluirse también que la disposición del material en las probetas mixtas influirá, haciendo que aquellas probetas en las que ambos materiales se disponen en sentido longitudinal dispongan de mayores resistencias, debido a que se incrementa dicho valor a lo largo de toda la sección del caucho, y no sólo en la zona central como ocurre en las transversales.

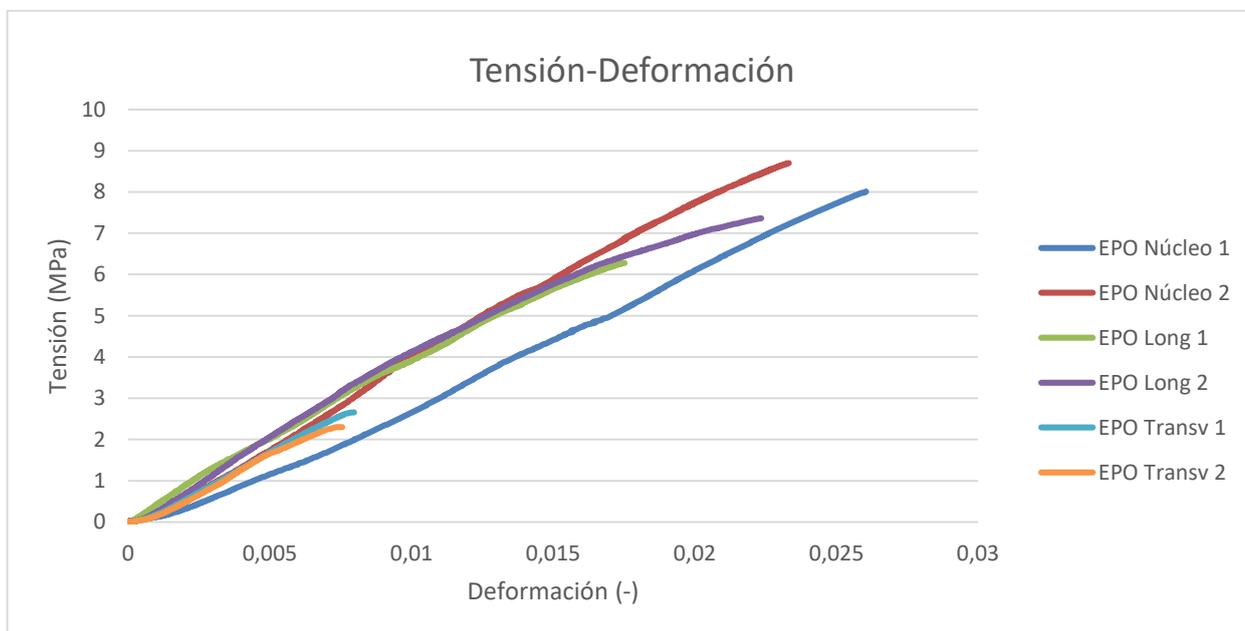


Figura 95. Comparativa entre tensiones de probetas con resina epoxi..

➤ Particularidades en cada grupo de ensayos

Por otro lado, se pueden destacar una serie de puntos de los resultados obtenidos en cada conjunto de ensayos. Estos están asociados a las probetas, parámetros y diferenciaciones que intervienen en el propio ensayo, ajenos al otro grupo.

De acuerdo a los ensayos preliminares, se observa que, a pesar de que el módulo elástico depende principalmente del material, y no de la sección, un aumento en la altura de la probeta lleva a una reducción en dicho valor. Se observa que, habiendo aumentado la sección un 60%, la altura pasa de ser 25mm a ser 4mm, se obtienen reducciones del 60% en el módulo de Young. Además, por el hecho de aumentar el tamaño de la sección, la probeta requerirá de una mayor fuerza para llegar a la rotura, lo cual no ha implicado un desplazamiento máximo mayor. Principalmente, esto se debe a la composición interna del material, ya que, al no ser homogéneo, no puede estudiarse la relación entre poros y granos existente en cada probeta, resultando en variaciones en los resultados, sumado a las imperfecciones internas presentadas en la muela.

Para el caso de los ensayos finales, se introdujo el concepto de las almenas, y la variabilidad que podían inducir en los resultados. Cabe destacar que no fueron consideradas en los ensayos preliminares. En este sentido, el orientar las almenas en dirección al eje principal de ascenso de la máquina, llevaba a un aumento en los módulos elásticos ensayados del 8%, debido a la mayor rigidez y resistencia que proporciona a la probeta. Además, el desviar la zona en la que se ejerce la fuerza hacia el caucho provoca que la rotura se dé más alejada de la zona central, mientras que el desviarla hacia la resina no la desplaza prácticamente hacia esta. Con ello, se refuerza la idea de que la resistencia y la influencia de la resina son notablemente superiores a las del caucho.

Analizando esto, se puede llegar a pensar que las almenas son un aspecto clave en las probetas que las presentan, ya que son consideradas un refuerzo y al mismo tiempo, una mejora del pegado de la zona en la que se transiciona el material. Las probetas dispuestas con las almenas frontales y centradas presentan una mayor homogeneidad en los resultados, dándose la rotura en la zona central. Se presupone que se buscará una mayor durabilidad en la muela, por lo que estas se situarán en dirección del eje, mejorando así sus propiedades resistivas.

Por último, se puede realizar una comparación entre las probetas suministradas por otros fabricantes, cabe recordar que se disponían de probetas “IK” y probetas “NOR”. Se destaca que estas últimas presentan unos valores de módulo elástico que triplican tanto a las primeras, como a las del propio fabricante *Manhattan*. Por ello, se puede pensar que estas se alejarán en mayor medida del comportamiento ideal de una muela de caucho, siendo las primeras mucho más fieles a este. Consecuentemente, presentarán también mayores capacidades de resistencia y dureza, entre otras propiedades.

➤ Líneas futuras

Mediante el presente proyecto se ha tratado de establecer una base para el estudio del aglomerante de caucho, y de esta forma dotarle de un mayor interés a nivel industrial. Bien es cierto que tampoco supone un gran impacto en los conocimientos obtenidos acerca de las aplicaciones de este material en el sector del rectificado. Por ello, y de cara a líneas futuras, se propone la continuación del estudio de este aglomerante, realizando ensayos similares en mayor cantidad de muelas y probetas, o incluso la variación y ampliación del abanico de ensayos, aumentando así los conocimientos en torno al material.

Se considera que los objetivos fijados previamente han sido cumplidos satisfactoriamente, habiendo desarrollado la metodología para la obtención del límite elástico de diferentes probetas mediante ensayos de flexión. Cabe mencionar que esto no es únicamente aplicable a aglomerantes de caucho, pudiendo realizar procedimientos análogos en toda clase de aglomerante, siendo esta otra posible línea futura de ensayo. Aun así, han sido aplicados al caucho, ya que son ensayos sencillos, los cuales han permitido tratar este aglutinante tan complejo y de difícil estudio. Entonces, se plantea la continuación del estudio del aglomerante de caucho como principal línea de futuro, implementándolo, además de en los ensayos de flexión, en el resto de ensayos de caracterización mencionados, ya sea Brazilian Test, ensayos dinámicos o ensayos de torsión, entre otros. De esta forma, se dispondrá de una amplia base de estudio en torno a este aglutinante.

10 BIBLIOGRAFIA

- [1] I. D. Marinescu, M. P. Hitchiner, E. Uhlmann, W. B. Rowe, y I. Inasaki, *Handbook of Machining with Grinding Wheels*. Boca Raton, Fla, 2006.
- [2] S. Malkin y C. Guo, *Grinding Technology: Theory and Application of Machining with Abrasives*. Industrial Press Inc., 2008.
- [3] Equipo de BirtLH (Sin fecha). *Procesos de rectificado. Parámetros de corte*. BirtLH-Formación Profesional online en el País Vasco
https://ikastaroak.birt.eus/edu/argitalpen/backupa/20200331/1920k/es/DFM/TFM/TFM05/es_DFM_TFM05_Contenidos/website_11_parmetros_de_corte.html
- [4] D. Pérez. *Metodología experimental para la caracterización del proceso de rectificado cilíndrico en penetración*, 2016
- [5] Departamento de Ingeniería Mecánica (Sin fecha). *Tema 16: Rectificado*. UPV/EHU. https://www.ehu.es/manufacturing/docencia/1017_ca.pdf
- [6] Equipo de BirtLH (Sin fecha). *Procesos de rectificado. Tipo de aglomerante*. BirtLH-Formación Profesional online en el País Vasco.
https://ikastaroak.birt.eus/edu/argitalpen/backupa/20200331/1920k/es/DFM/TFM/TFM05/es_DFM_TFM05_Contenidos/website_316_tipo_de_aglomerante.html
- [7] Dr. Kaiser Diamantwerkzeuge GmbH & Co. KG (2012). *Muelas abrasivas*. Dr. Kaiser. http://www.drkaiser.com/fileadmin/user_upload/drkaiser_de/documents/ES/DR-KAISER-Muelas-Abrasivas.pdf
- [8] V. T. M. (9 de enero de 2012). *Vulcanización*. Tecnología de los Plásticos. <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2012/01/vulcanizacion.html>
- [9] Meseguer–Valdenebro, J. L., Portoles, A., Martínez–Conesa, E., (2020). Revisión de los principales tipos de elastómeros y ensayos normalizados. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 21(2), 75-95.
- [10] Equipo de Infinitia (8 de julio de 2021). *Elastómeros: qué son, tipos y aplicaciones*. Infinitia. https://www.infinitiaresearch.com/noticias/elastomeros-que-son-tipos-y-aplicaciones/#propiedades_de_los_elastomeros
- [11] Departamento de Trabajo y Seguridad Social del Gobierno Vasco (23 de junio de 1988). *Condiciones de trabajo y seguridad en muelas abrasivas*. https://www.euskadi.eus/contenidos/informacion/publicaciones_antiguas_osalan/es_def/adjuntos/prevencion_muelas_abrasivas.pdf
- [12] Equipo de Abrasivos Manhattan (Sin fecha). *Programa de fabricación y aplicaciones*. Abrasivos Manhattan.
https://www.abrasivosmanhattan.es/images/pdf/M_GEN_MANH.pdf
- [13] Equipo de Abrasivos Manhattan (Sin fecha). *Abrasivos Manhattan-Muelas abrasivas de precisión*. <https://www.abrasivosmanhattan.es/index.php/muelas-abrasivas>
- [14] Equipo de BirtLH (Sin fecha). *Procesos de mecanizado por abrasión, electroerosión y especiales. Parámetros de rectificado*. BirtLH-Formación Profesional online en el País Vasco.
https://ikastaroak.ulhi.net/edu/es/PPFM/DPMCM/DPMCM02/es_PPFM_DPMCM02_Contenidos/website_18_parmetros_de_rectificado.html

- [15] Equipo de Abrasivos Manhattan (Sin fecha). *Muestras de arrastre cilindradas*. Abrasivos Manhattan. https://www.abrasivosmanhattan.es/images/pdf/M_REG_MANH.pdf
- [16] Artiflex Dr. Lohmann GmbH & Co. (Sin fecha). *Artiflex Elastisches Schleifen und Polieren Elastic bonded Abrasives*. <https://www.artiflex-abrasives.de/>
- [17] Equipo de Ingegeek (4 de febrero de 2022). *¿Cuál es la diferencia entre dúctil y frágil?*. Ingegeek. <https://www.ingegeek.site/2022/02/04/cual-es-la-diferencia-entre-ductil-y-fragil/>
- [18] Equipo de Cartagena 99 (Sin fecha). *Tema 5. La fractura de los materiales*. Cartagena 99. <https://www.cartagena99.com/recursos/alumnos/apuntes/Tema%205-%20Fractura.pdf>
- [19] F.E. Dotti, F. Renguera, V.H. Cortinez, M.T. Piovan, *Una revisión de los conceptos de la mecánica de fractura fractal discreta*. 2009.
- [20] S. N. Kulkov, I. Yu. Smolin, V. A. Mikushina, T. Yu. Sablina, I. N. Sevostyanova, y V. V. Gorbatenko, «Studying Strain Localization in Brittle Materials during the Brazilian Test», *Russ Phys J*, vol. 63, n.o 6, pp. 976-983, oct. 2020, doi: 10.1007/s11182-020-02126-z
- [21] ASTM C1684 - 18 Standard Test Method for Flexural Strength of Advanced Ceramics at Ambient Temperature—Cylindrical Rod Strength.
- [22] ASTM C1239-07: “Standard Practice for Reporting Uniaxial Strength Data and Estimating Weibull Distribution Parameters for Advanced Ceramics”
- [23] ASTM E1876: “Standard Test Method for Young’s Modulus, Shear Modulus and Poisson’s Ratio for Glass and Glass-Ceramics by Resonance
- [24] Equipo de GrindoSonic (Sin fecha). *GrindoSonic MK7, the instrument for non-destructive measurements of Material Characteristics bases on IET*. GrindoSonic the impulse excitation technique. https://www.grindosonic.com/products/GrindoSonic_MK7.html
- [25] L. Boss Lindholm (2 de diciembre de 2015). *What is ultrasound and how does an ultrasonic grade sensor work?*. Technologies Paving Innovation. <https://tf-technologies.com/blog/what-ultrasound-and-how-does-ultrasonic-grade-sensor-work>
- [26] Z. Cui, Y. Huang, y H. Liu, «Predicting the mechanical properties of brittle porous materials with various porosity and pore sizes», *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, vol. 71, pp. 10-22, jul. 2017, doi: 10.1016/j.jmbbm.2017.02.014.
- [27] Equipo de Strata (Sin fecha). *Services*. Strata Testing Services. <http://www.strataesting.com.au/rock-testing/>
- [28] ASTM C730 “Standard Test Method for Knoop Indentation Hardness of Glass”
- [29] Equipo de Buehler (Sin fecha). *El Ensayo De Dureza Knoop*. Buehler. <https://www.buehler.com/es/blog/el-ensayo-de-dureza-knoop/>
- [30] D. Marinescu, W. Brian Rowe, B. Dimitrov, I. Inaski, *Tribology of Abrasive Machining Processes - 1st Edition*, 2004.

[31] GAMA Estructuras (21 de junio de 2020). Mecánica de materiales. *Diagrama Tensión-Deformación del Hormigón. Obtención e interpretación.*

https://www.youtube.com/watch?v=lco3459Rd0g&ab_channel=GAMAEstructuras

[32] T. Martín Blas, A. Serrano Fernández (octubre de 2014). *Movimiento ondulatorio.* Curso básico de Física.

<https://www2.montes.upm.es/dptos/digfa/cfisica/ondas/estacionarias.html>

[33] D. Valenzuela (Sin fecha). *Ondas estacionarias.* Físic Education.

<https://www.fisic.ch/contenidos/ondas-y-sonido/ondas-estacionarias/>

[34] ASTM. C 1259 - Standard Test Method for Dynamic Young 's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio for Advanced Ceramics by Impulse Excitation of Vibration. Annu B ASTM Stand 2001:1–21

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN
INGENIERÍA MECÁNICA**

TRABAJO FIN DE MÁSTER

***CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE MUELAS
ABRASIVAS DE CAUCHO***

DOCUMENTO IV - ANEXOS

Estudiante	<i>Clemente, Fernández, Eder</i>
Director/Directora	<i>Godino, Fernández, Leire</i>
Departamento	<i>Departamento de Ingeniería Mecánica</i>
Curso académico	<i>2021-2022</i>

Bilbao, 18/09/22

ANEXO I

En este primer anexo se presenta el estudio realizado sobre probetas obtenidas por la compactación de aglomerante vítreo. En un principio iba a ser incluido en el proyecto, pero se concluyó que con los ensayos sobre probetas de muela vítrea era suficiente para cumplir el objetivo planteado. Además, considerando que en este estudio no se dispone de láser de precisión, con lo que no se empleará el cálculo de la pendiente de la zona lineal de la curva Tensión-Deformación, se ha decidido que era ciertamente prescindible.

A lo largo de estos ensayos se sigue un procedimiento similar al desarrollado con las probetas de muela vítrea. Se disponen de un total de 6 ensayos realizados en la universidad de Burdeos, pero el GOM no es capaz de detectar la probeta en todos ellos, al ser blancas (Figura 96). El software sólo puede emplearse en los dos últimos ensayos, en los que las probetas fueron pintadas (Figura 97).



Figura 96. Probeta de aglomerante sin pintar.



Figura 97. Probeta de aglomerante pintada.

Además, en estos ensayos no se empleó láser para la medición, únicamente se dispone de los valores indicados por la máquina, y los del GOM, en las dos últimas. Puede también realizarse una representación de sus curvas características (Figura 98), donde se puede observar el aumento en el desplazamiento con la fuerza. Las dos líneas inferiores son las asociadas a los últimos ensayos, los que sí pueden estudiarse en GOM, en las que se trataba con probetas rectangulares, mientras que las otras eran cilíndricas, lo cual es muy significativo.

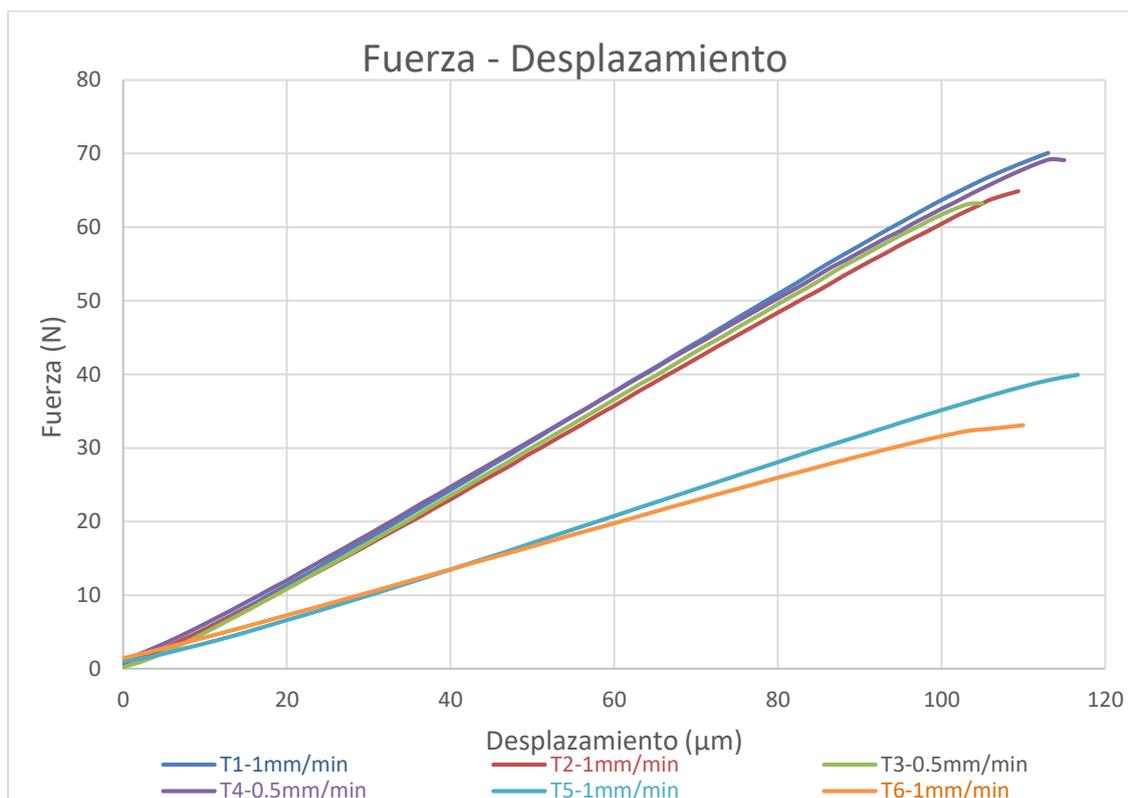


Figura 98. Curvas Fuerza-Desplazamiento para probetas de aglomerante.

Sin embargo, surge un problema, y es que la máquina no detecta contacto en todas imágenes, resultando en fuerzas completamente irrisorias comparadas con las previas. Por ello, sólo se calculará el módulo elástico en las etapas en las que se disponga de un valor adecuado de la fuerza, ya que es necesario para introducirlo a la fórmula matemática. Estos son los desplazamientos máximos que han sido obtenidos de las etapas en las que existe valor lógico para la fuerza (Tabla 43).

Tabla 42. Valores de desplazamientos máximos para las probetas de aglomerante.

ENSAYO	FUERZA MÁXIMA (N)	DESPLAZAMIENTO MÁXIMO (mm)	
		GOM	Máquina
T1	70,091	-	0,113009
T2	63,828	-	0,109357
T3	63,222	-	0,105019
T4	69,099	-	0,114988
T5	39,952	0,189	0,116626
T6	33,101	0,221	0,109966

Como puede observarse en las imágenes (Figuras 99 y 100), en estos ensayos la lectura en el GOM es mucho más clara, lo cual permite obtener valores de una manera más precisa, ya que el área de estudio se representa en un color. Cabe mencionar que esto no ocurría en el caso de la muela debido al hecho de disponer de granos abrasivos y poros, además del aglomerante, disponiendo cada uno de ellos de propiedades mecánicas diferentes.

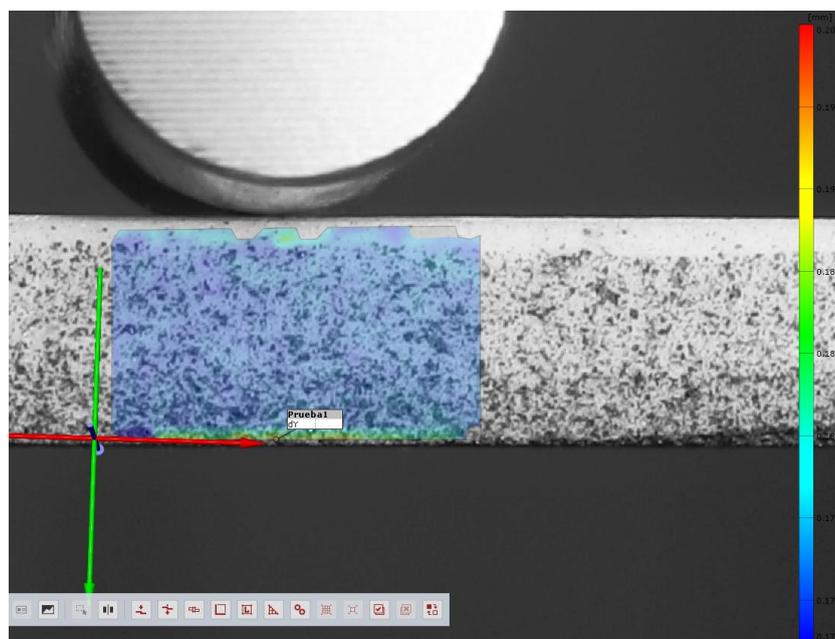


Figura 99. Lectura en GOM del ensayo 5 de las probetas de aglomerante.

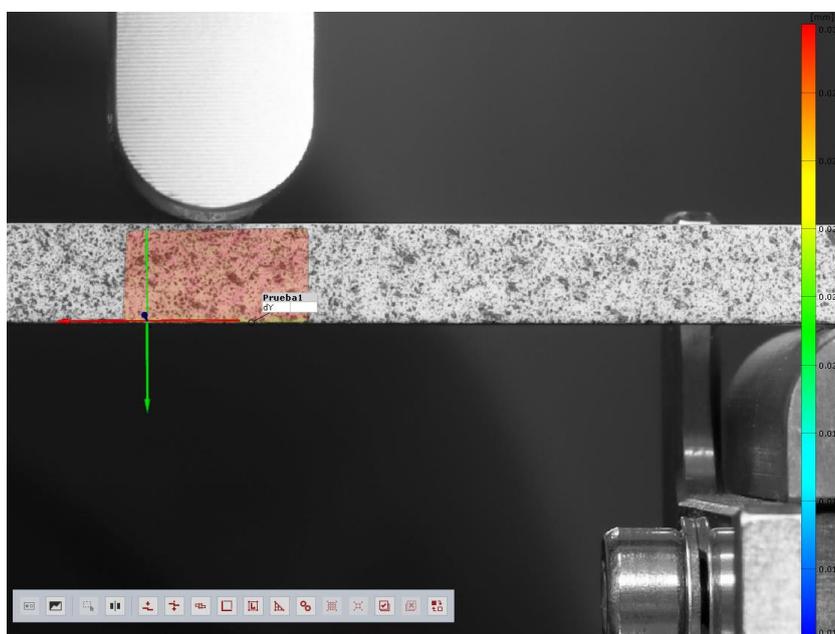


Figura 100. Lectura en GOM del ensayo 6 de las probetas de aglomerante.

Para calcular el módulo elástico, se emplean la expresión planteada en el apartado asociado a los ensayos vítreos. Se calcula el módulo para todos los ensayos de acuerdo a los valores de la máquina, y los permitidos en el GOM. Los resultados obtenidos son los en la próxima Tabla 44:

Tabla 43. Valores de módulo elástico para las probetas de aglomerante.

ENSAYO	MÓDULO ELÁSTICO (MPa)		
	GOM	Máquina	Análisis modal
T1	-	30015	15404,05
T2	-	29018	
T3	-	26454	
T4	-	26690	
T5	14712,77	31221	
T6	14674,17	34947	

Graficando los resultados, esta vez puede observarse una gran semejanza entre el módulo de Young calculado mediante la fórmula teórica y las dimensiones obtenidas del software GOM, con un error del 5%, a pesar de no haber trabajado con el valor máximo real, si no con el de la fuerza máxima, que es ciertamente inferior. Son resultados lo suficientemente semejantes para validar el procedimiento. Para las medidas suministradas por la máquina, son considerablemente elevadas, con errores del 70%, con lo cual se puede concluir en que el GOM presenta una mayor precisión que la instrumentación del ensayo. Esto es debido a las deformaciones internas que se dan en la máquina durante el desarrollo del ensayo, como ya se ha detallado previamente. Se cree que, en caso de haber trabajado también con un láser, su resultado hubiera sido similar al del software, ya que, en cierto modo, ya lo era para la muela de caucho.

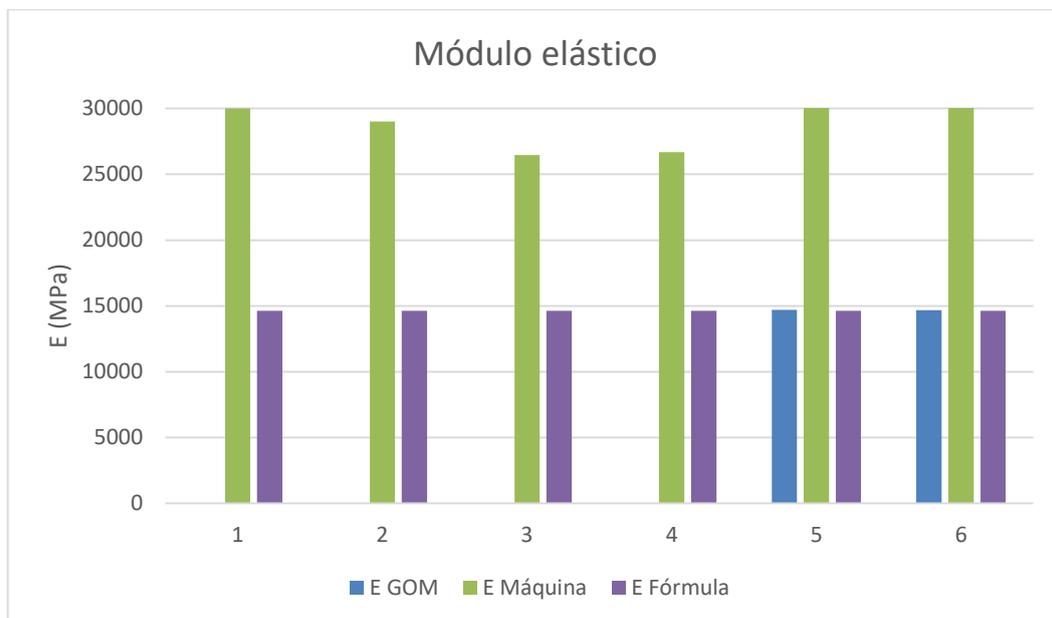


Figura 101. Módulo elástico obtenido de las diferentes fuentes de medición para las probetas aglomeradas.

ANEXO II

En este segundo anexo se plantea el análisis modal realizado, que finalmente no fue incluido en la propia memoria debido a que los ensayos experimentales no fueron realizados sobre la muela abrasiva a continuación estudiada.

1. INTRODUCCIÓN

El análisis modal experimental es una de las principales tipologías de ensayo para la determinación de las frecuencias naturales y sus modos de vibración asociados, los cuales dependen de parámetros del sistema estudiado como la rigidez, la masa o el amortiguamiento.

Al someter un objeto a una excitación mecánica se genera una vibración sobre el mismo, que se propaga en forma de onda sinusoidal. Al llegar al final de dicho medio, ocurre el fenómeno de la reflexión, el cual induce un cambio de fase de 180° en la onda, adquiriendo el nombre de onda estacionaria. De esta forma, y mediante el principio de superposición, ambos grupos de ondas interfieren entre sí, produciendo un estado vibratorio estacionario denominado onda estacionaria [32], [33].

Las frecuencias a las que se forman dichas ondas son las denominadas frecuencias naturales y al patrón de movimiento provocado sobre el sistema se le denomina modo de vibración. La frecuencia mínima capaz de generar dicha onda estacionaria es la frecuencia fundamental, o primera frecuencia natural, siendo el resto de modos de vibración múltiplos de esta.

Toda onda estacionaria dispone de unos puntos característicos, denominados nodos y antinodos de vibración. Los nodos son aquellos puntos que permanecen estacionarios, es decir, no sufren vibraciones ni desplazamientos, debido a que las ondas que generan la estacionaria interfieren de forma destructiva. En el caso de los antinodos, son los que vibran con amplitud máxima, debido a que las ondas interfieren de forma constructiva. La distancia que separa dos puntos consecutivos es media longitud de onda (Figura 102).

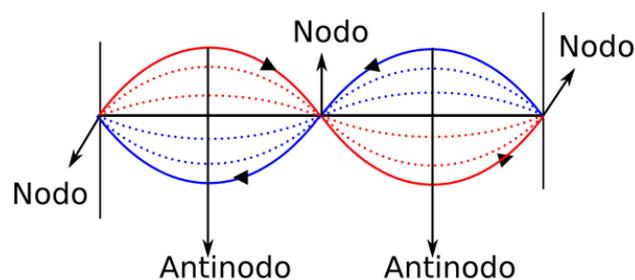


Figura 102. Representación de nodos y antinodos en una onda estacionaria [33].

2. MUELA A ESTUDIAR

Se trabajará una única muela suministrada por el fabricante *Manhattan*. Se trata de una muela compuesta (Figura 103), la cual presenta una primera zona interior en la que se empleó aglutinante resinoso, y una segunda zona exterior destinada al caucho, por lo que se adapta a la tipología de muelas estudiada a lo largo del proyecto. Al tratarse de materiales diferentes, a pesar de ser los mismos granos, la muela poseerá diferentes propiedades en cada zona.



Figura 103. Muela para análisis modal.

Mediante estos ensayos se pretende obtener la frecuencia de excitación de la muela, para la obtención del módulo elástico mediante la aplicación de la expresión matemática de muelas de caucho. Aun así, se realizará un pesaje de la muela (Figura 104), para obtener así su densidad.



Figura 104. Pesaje de la muela del análisis modal.

Para el volumen, se emplea la fórmula de un cilindro, en el que se implementa el agujero interior, obteniendo la siguiente expresión. Ambas zonas presentan el mismo espesor, y conociendo el diámetro hasta el que se da la resina, se pueden calcular el volumen de cada una de ellas.

$$V = \pi * \left[\left(\frac{D}{2} \right)^2 - \left(\frac{d}{2} \right)^2 \right] * t \quad (20)$$

Siendo:

- V el volumen total
- D el diámetro total
- d el diámetro del agujero central
- t el espesor

Conociendo la masa y el volumen de la muela, se puede calcular la densidad. Sin embargo, en este caso no puede calcularse la densidad de las dos partes de la muela de las que se ha hablado, ya que no existe forma física de pesarlas independientemente. La única opción sería emplear la regla de tres para obtener las masas, pero se descarta al no ser nada preciso.

$$\varphi = \frac{m}{V} \quad (21)$$

Siendo:

- φ la densidad
- m la masa total

Todos estos parámetros son indicados en la siguiente Tabla 44:

Tabla 44. Parámetros iniciales del análisis modal.

PARÁMETRO	VALOR	UNIDADES
Diámetro exterior	340	mm
Diámetro resina	205	mm
Diámetro interior	15	mm
Anchura	40	mm
Volumen resina	829380,4605	mm ³
Volumen caucho	2311426,7949	mm ³
Volumen total	3140807,2554	mm ³
Masa total	3849,5	g
Densidad	0,0012	g/mm ³

3. CONDICIONES DE CONTORNO

Una vez se dispone la muela que será sometida al análisis, se definen las condiciones de contorno del problema, es decir, los apoyos sobre los que serán dispuestas. De acuerdo a la norma ASTM mencionada previamente, existen dos tipos de configuraciones, los apoyos blandos y los apoyos duros. Para saber que disposición de apoyos es la más adecuada para obtener la frecuencia fundamental de la muela es necesario conocer sus modos de vibración. Sin embargo, no se dispone de los apoyos duros, por lo que estos son descartados.

Para los apoyos blandos, se emplean dos líneas de espuma de poliuretano, colocadas en forma de cruz en el centro de la muela. Este tipo de apoyos no suponen una gran interferencia en el cálculo del primer modo de vibración, por lo que será suficiente con posicionarlos visualmente. Esta configuración se recomienda para probetas con una relación diámetro-espesor menor de 10.

Se estudian los dos principales modos de vibración de la muela [34]. Por un lado, el modo fundamental de vibración, también denominado modo de vibración anti flexional ortogonal, en el que los desplazamientos del plano transversal son perpendiculares a este y simétricos a dos diámetros ortogonales (Figura 105). En este caso, los nodos de vibración se encuentran sobre dos diámetros ortogonales, con una desviación de 45° respecto al punto de excitación. Respecto a los anti-nodos, se encuentran sobre dos diámetros ortogonales, uno de los cuales sobrepasa el punto de excitación.

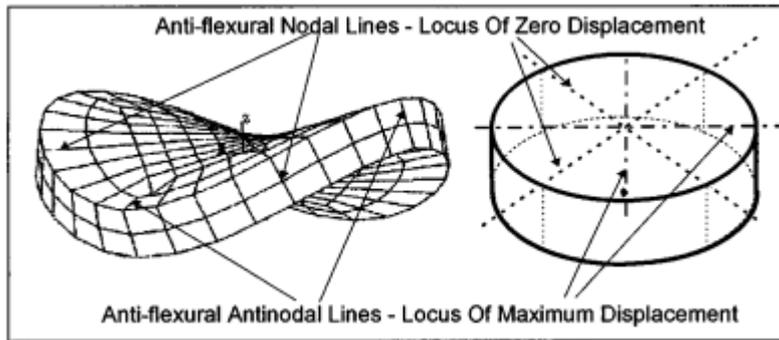


Figura 105. Desplazamientos del primer modo de vibración [34].

Por otro lado, el segundo modo de vibración, o modo de vibración flexional anti simétrico, en el que los desplazamientos transversales de nuevo son perpendiculares a este, pero ya no se caracterizan por esa simetría, ahora son iguales para una distancia radial dada, desde el centro de la muela (Figura 106). De acuerdo a este modo, los nodos se encuentran en la circunferencia nodal que se ha mencionado previamente. Los anti-nodos, en cambio, se encuentran en el perímetro y en el centro de la muela.

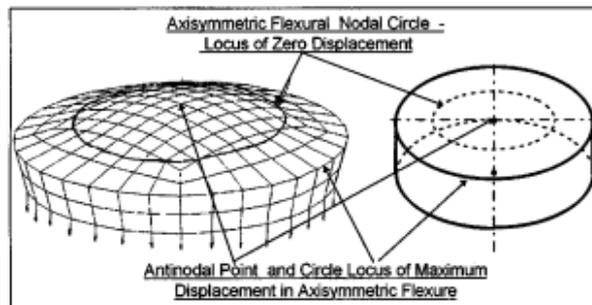


Figura 106. Desplazamientos del segundo modo de vibración [34]

De acuerdo a la norma ASTM, puede llegarse a la excitación del modo fundamental de vibración con ambas configuraciones de apoyos, pero la configuración blanda resulta en una mejor resolución, al realizar un apoyo completo sobre los nodos, mientras que la configuración dura, al emplear apoyos puntuales, pueden excitarse otros modos. Para el segundo modo de vibración, se emplean los apoyos duros, ya que los blandos no permiten la excitación de este.

4. OBTENCIÓN DE LA EXCITACIÓN

Habiendo tratado los apoyos a emplear en los ensayos, es necesario la excitación de los modos de vibración a obtener. Para esta función se emplea un martillo excitador (Figura 104), con el cual se realiza un golpe sobre uno de los antinodos asociado al modo que se desee obtener. Este incorpora puntas o cabezales de diferentes materiales y características, entre los cuales se selecciona en función de las características de cada ensayo. Para la excitación en la resina se emplea la punta metálica, mientras que, en el caucho, la de goma negra, que posee una mayor rigidez que la roja, con la que se obtiene un ruido elevado en la lectura.



Figura 107. Martillo excitador y cabezales.

Para el primer modo de vibración, los antinodos se sitúan sobre dos diámetros ortogonales, con una desviación de 45° respecto a los nodos, por lo que el martillazo se realiza sobre una de las líneas antinodales. Aun así, existe una optimización de este primer caso. Considerando que los nodos del segundo modo de vibración se encuentran en la circunferencia nodal, se puede ejercer la excitación en la intersección entre las líneas antinodales del primer modo de vibración con la circunferencia nodal del segundo modo, con lo que se consigue una mejora en la excitación del modo fundamental de vibración, mientras se atenúa el segundo.

En el caso del segundo modo de vibración, los antinodos se encuentran en el perímetro y el centro de la muela, como ya se ha mencionado, pero no puede recurrirse a la excitación en la zona central, ya que presenta un agujero central. En este caso, se recurre a realizar el golpe en puntos del perímetro de la muela, indistintamente.

Sin embargo, no se dispone de los apoyos duros, por lo que se dificulta la obtención del segundo modo de vibración siguiendo este primer procedimiento. Sin embargo, de acuerdo a trabajos previos que desarrollaban este tipo de ensayos, existe una configuración adicional con la que se posibilita la obtención de ambas frecuencias mediante el empleo de los apoyos blandos. Para ello, se parte de la configuración para la obtención del primer modo de vibración, pero colocando tanto el transductor como el golpe excitador en el perímetro de la muela, sobre la circunferencia anti-nodal del segundo modo de vibración, atenuando así dicho modo, con lo que se permiten estudiar los dos primeros modos. Se sitúan con un desfase de 45° respecto a una de las líneas de apoyo blando, el transductor en horario y el golpe del martillo en anti horario (Figura 108).

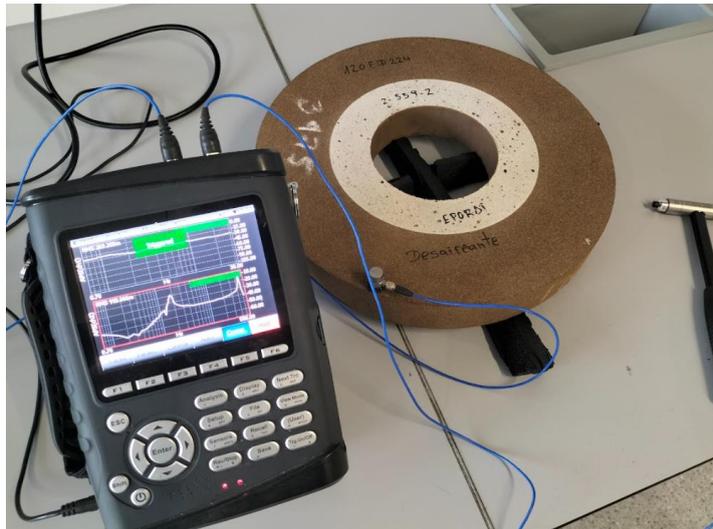


Figura 108. Posicionamiento del ensayo para la obtención de ambos modos de vibración en un único ensayo.

5. RESPUESTA A LA EXCITACIÓN

La respuesta del sistema a la excitación se obtiene mediante un transductor piezoeléctrico, que transforma la vibración según el modo de estudio en una señal eléctrica, que queda registrada en la pantalla, donde pueden obtenerse diferentes aspectos de la vibración de una forma sencilla, entre ellos las frecuencias de excitación. El transductor con el que se ha trabajado es el CoCo 80 (Figura 109), suministrado por *Crystal Instruments*.



Figura 109. Transductor CoCo 80.

El transductor incluye un acelerómetro (Figura 110), quien es el verdadero encargado del registro de la vibración. En este aspecto, para garantizar una captación óptima de la vibración, debe mantenerse en contacto continuo con la muela, para así realizar el mismo desplazamiento, para lo cual se ha empleado cera.

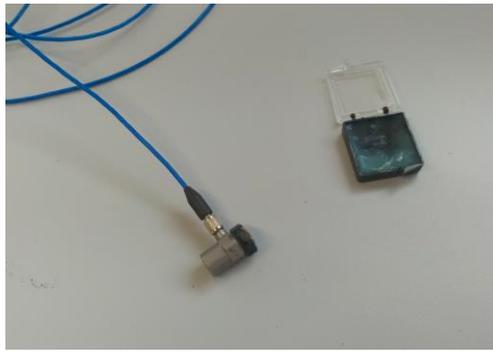


Figura 110. Acelerómetro y cera.

Otro aspecto a considerar sobre el transductor es la colocación en la muela. El acelerómetro debe colocarse sobre un antinodo del modo de vibración a analizar. Como ya se ha mencionado previamente, al no poseer apoyos duros, se está trabajando con la nueva variante, con la cual se obtienen las dos frecuencias a obtener en una única configuración. Cabe mencionar que para la obtención de los resultados se han empleados cables coaxiales (Figura 111) aislados para realizar las conexiones entre elementos, minimizando así los efectos exteriores.



Figura 111. Cables coaxiales.

6. DESARROLLO DEL ENSAYO

Antes de nada, cabe mencionar que se disponen de dos tipos de apoyos suaves, ambos de espuma, pero no de poliuretano. Siguiendo el proyecto del que se parte, ambas clases serían válidas para la realización del análisis, ya que se obtendría las dos primeras frecuencias en ambos casos. Los apoyos seleccionados han sido los que presentaban un menor ruido en la respuesta, proporcionando una lectura más clara y limpia (Figura 112).



Figura 112. Apoyo suave seleccionado.

Una vez se dispone de todo el material necesario, se procede a la realización del análisis modal de la muela. Para una mayor precisión en los resultados, ha sido dividida en cuatro cuadrantes, en cada uno de los cuales se realizarán tres mediciones. Es cierto que, según la norma y las distribuciones mencionadas, los ensayos deben realizarse sobre el perímetro exterior de la muela (Tabla 45), sin embargo, van a considerarse tres posiciones, el diámetro exterior, para medir la zona de caucho, el diámetro interior (Tabla 47), para medir la zona de resina, y la zona de cambio de material (Tabla 46). De esta forma, se obtendrá un total de 36 mediciones.

Tabla 45. Frecuencias obtenidas al excitar el perímetro exterior.

MEDICIÓN	CUADRANTE	F1(Hz)	F2(Hz)
1	1	18,125	475,625
2		18,125	477,5
3		18,125	477,5
4	2	18,75	478,125
5		18,75	478,125
6		18,75	477,5
7	3	18,75	477,5
8		18,125	476,8156
9		18,125	476,8156
10	4	18,125	476,8156
11		18,125	476,8156
12		18,125	476,8156

Tabla 46. Frecuencias obtenidas al excitar el cambio de material.

MEDICIÓN	CUADRANTE	F1(Hz)	F2(Hz)
13	1	18,75	476,8156
14		18,75	477,5
15		18,75	476,8156
16	2	18,75	476,8156
17		18,75	477,5
18		18,75	476,8156
19	3	18,75	478,125
20		18,125	478,75
21		18,125	478,75
22	4	17,5	476,8156
23		17,5	476,875
24		18,125	476,875

Tabla 47. Frecuencias obtenidas al excitar el perímetro interior.

MEDICIÓN	CUADRANTE	F1(Hz)	F2(Hz)
25	1	18,75	479,375
26		18,125	476,8156
27		18,75	477,5
28	2	18,75	477,5
29		18,75	477,5
30		18,75	477,5
31	3	17,5	478,125
32		17,5	483,75
33		17,5	481,875
34	4	18,125	478,75
35		18,125	481,875
36		18,125	481,875

De entre todos estos ensayos se ha hecho una selección, priorizando los ensayos en los que se ha obtenido una respuesta con el menor ruido posible y de mayor repetitividad (Tablas 48, 49 y 50).

Tabla 48. Selección de las frecuencias del perímetro exterior.

MEDICIÓN	CUADRANTE	F1(Hz)	F2(Hz)
3	1	18,125	477,5
6	2	18,75	477,5
8	3	18,125	476,8156
11	4	18,125	476,8156

Tabla 49. Selección de las frecuencias para el cambio de material.

MEDICIÓN	CUADRANTE	F1(Hz)	F2(Hz)
15	1	18,75	476,8156
18	2	18,75	476,8156
21	3	18,125	478,75
23	4	17,5	476,875

Tabla 50. Selección de las frecuencias para el perímetro interior.

MEDICIÓN	CUADRANTE	F1(Hz)	F2(Hz)
27	1	18,75	477,5
29	2	18,75	477,5
32	3	17,5	483,75
35	4	18,125	481,875

A modo de ejemplo, se analiza la curva obtenida para el primero de los casos. Puede implementarse un cursor que se desplace a lo largo del eje de abscisas, con el que se leen los valores de las dos frecuencias de estudio, que en este caso son 18,75 y 477,5 Hz (Figura 110 y Figura 111, respectivamente). Pueden apreciarse claramente los dos picos de frecuencia, asociados a estas. Este es el motivo por el que es de vital importancia la minimización del ruido en el ensayo, ya que además de inducir a posibles equivocaciones en la lectura debido al aumento de número de picos, los valores de estos pueden verse alterados.



Figura 113. Valor de la primera frecuencia.



Figura 114. Valor de la segunda frecuencia.

Sin embargo, tras consultarlo con el fabricante, existe un problema. El valor obtenido para la primera frecuencia de excitación es extremadamente menor de los esperado, por ello, puede creerse que se trate de ruido de la medición, y verdaderamente, el valor obtenido para la segunda frecuencia es el que se le atribuiría a la primera. De esta forma, la verdadera segunda frecuencia quedaría fuera del rango de captación inicial del transductor.

Entonces, se decidió repetir estos ensayos, aumentando su rango de captación, para así confirmar dicha teoría. Sin embargo, principalmente por falta de tiempo, y al no haber empleado dichos valores en los ensayos de flexión, ya que se trabajó con otras muelas cuya frecuencia de excitación se conocía, finalmente no se realizaron.

ANEXO III

En este tercer anexo se han agrupado en una tabla resumen todas las probetas que fueron ensayadas para la caracterización de muelas de caucho. Se han asociado en función de su material, su orientación en la obtención, y el conjunto de ensayo. Además, se han incluido sus tres dimensiones principales.

Tabla 11. Listado de todas las probetas trabajadas.

ENSAYO	PROBETA	GRUPO	BASE (mm)	ALTO (mm)	LARGO (mm)
ENSAYOS PRELIMINAR ES	R1	Radiales	27,08	24,15	99,82
	R2		26,95	24,85	99,3
	R3		27,65	22,7	98,7
	R4		26,95	26,8	102,3
	R5		24,65	25,35	100,45
	A1	Axiales	25,1	25,3	99,05
	A2		24,5	25,6	100,2
	A3		22,05	23,3	100,05
	A4		23,15	23,05	100,1
	D1	Otras dimen- siones	23,7	40,6	100,8
	D2		24,75	40,65	100,1
	N1	Núcleo	24,89	30,31	103,18
	N2		24,84	27,11	101,5
	C1	Caucho	25,02	25,02	25,59
	C2		25,47	25,47	25,13
	C3		26,08	26,08	24,62
	C4		24,63	24,63	26,09
	C5		25,15	25,15	25,65
	C6		24,62	24,62	25,42
	C7		25,14	25,14	25,46
	C8		25,07	25,57	25,57
	C9		24,96	25,76	25,76
	M1	Mixtas	25,23	24,99	99,98
	M2		25,36	24,56	100,65
	M3		25,45	24,68	100,36
M4	24,75		25,84	101,74	
M5	25,58		25,53	100,06	
	EPO-N1		24,94	25,15	98,79

DOCUMENTO IV – ANEXOS

ENSAYOS FINALES	EPO-N3	Resinoide s	24,86	25,08	100,02
	EPO-N5		24,85	25,17	99,85
	EPO-N7		24,91	24,87	100,23
	EPO-N9		24,95	25,12	100,51
	ST-N2		24,93	25,23	98,23
	ST-N4		25,02	25,25	99,91
	ST-N6		24,87	25,26	100,01
	ST-N8		24,97	25,17	100,11
	ST-N10		24,93	25,29	99,89
	EPO-1		Mixtas longitu_ dinales	24,59	24,88
	EPO-3	24,55		24,84	99,08
	EPO-5R	25,12		25,02	99,64
	EPO-7	24,48		24,86	98,76
	EPO-9	24,66		24,92	99,85
	ST-2	24,61		24,85	99,85
	ST-4R	24,95		25,1	100,36
	ST-6R	24,89		24,98	100,37
	ST-8	24,64		24,9	100,31
	ST-10R	25,12		24,94	100,36
	EPO-B1	Mixtas transver_ sales	24,25	24,84	100,13
	EPO-B3		24,23	24,89	100,06
	EPO-B5		24,86	24,25	99,94
	EPO-B7		24,84	24,24	100,25
	EPO-B9		24,9	24,33	99,87
	ST-B2		24,26	24,82	100,1
	ST-B4		24,31	24,79	100,1
	ST-B6		24,82	24,26	100,27
	ST-B8		24,79	24,25	100,17
	ST-B10		24,68	24,24	100,25
	IK1	Otros fabricante s	24,9	24,81	100,1
IK2	24,8		24,82	99,94	
IK3	24,77		24,85	100,2	
NOR1	24,9		24,95	99,87	
NOR2	25,07		24,97	100,4	
NOR3	25,03		24,75	100,3	

