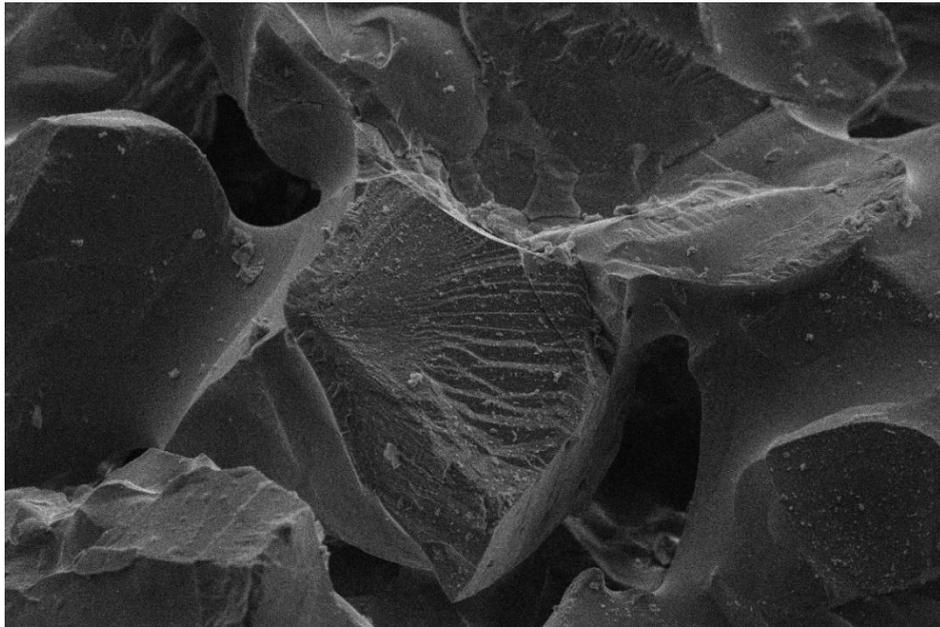

CARACTERIZACIÓN Y SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE AGLOMERANTES VÍTREOS PARA MUELAS DE RECTIFICADO DE ALÚMINA



TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA MECÁNICA

Alumno: Nieves Patricia Gómez González

Director/a: José Antonio Sánchez Galíndez

Curso: 2021 / 2022

Codirector/a: Leire Godino Fernández

Índice

1. Resumen.....	7
1.1 Castellano.....	7
1.2 Euskera.....	8
1.3 English.....	9
2. Lista de tablas, Figuras y Nomenclatura.....	10
2.1 Lista de Tablas.....	10
2.2 Tabla de figuras.....	10
2.3 Nomenclatura.....	13
3. Introducción.....	15
3.1 Contexto.....	15
3.2 Descripción del problema.....	16
3.3 Objetivos.....	17
3.4 Beneficios.....	18
3.5 Alternativas.....	18
3.5.1 Ensayos experimentales durante la operación de rectificado.....	18
3.5.2. Ensayos de caracterización mecánica.....	19
2.2.3. Modelización del desgaste.....	19
3.6 Solución adoptada.....	19
4. Estado del arte.....	21
4.1 Introducción al rectificado.....	21
4.2 Conceptos básicos del rectificado.....	22
4.2.1 Muelas abrasivas.....	23
4.2.2 Granos Abrasivos.....	23
4.3 Fabricación de las muelas vitrificadas.....	28
4.3.1 Fabricación del grano de alúmina.....	28
4.4 Tipos de desgaste.....	29
4.5 Influencia del diseño de las muelas en el desgaste.....	32
4.5.1 Grado de la muela.....	32
4.5.2 Estructura de la muela.....	33
4.5.3 Tamaño de grano.....	34
4.5.4 Material aglomerante.....	34
4.6 Modelización del proceso de rectificado.....	34
Patricia Gómez.....	3

4.6.1 Geometría de los modelos	36
4.6.2 Modelización del desgaste	37
4.7 Comportamiento mecánico de los materiales frágiles	38
4.7.1 Caracterización del comportamiento mecánico de materiales vítreos	40
4.7.2 Caracterización de materiales cuasifrágiles	44
4.7.2.1 Brazilian Test	45
4.8 Enfoque del proyecto	48
5. Ensayos experimentales para la caracterización de las propiedades mecánicas de las muelas abrasivas.	51
5.1 Introducción	51
5.2 Materiales, equipos e instrumentación	51
5.3 Caracterización mecánica de la muela abrasiva grano-aglomerante	56
5.3.1 Diseño de ensayo mecánico de las probetas de material vítreo	56
5.3.2 Resultados de la caracterización mecánica de muelas abrasiva	61
5.4 Caracterización mecánica del material vítreo	65
5.4.1 Diseño de ensayo mecánico de las probetas de material vitreo	65
5.4.2 Fabricación de las probetas de material vítreo.....	67
5.4.3 Resultados de la caracterización mecánica de material vítreo	69
6. Análisis microscópico de la fractura de las muelas abrasivas	73
6.1 Introducción.	73
6.2 Objeto del análisis	73
6.3 Descripción de instrumentación y equipos	73
6.4 Análisis microscópico SEM	75
6.4.1 Primer análisis SEM-EDX	75
6.4.2 Segundo análisis SEM-EDX	82
7. Simulación numérica de los ensayos de flexión a 3 puntos.....	86
7.1 Objeto del modelo	86
7.2 Software empleado	86
7.3 Propuestas para la modelización de las muelas abrasivas como materiales compuestos porosos.....	87
7.3.1 Hipótesis 1. Rotura de aglomerante y fallo por adhesión.....	87
7.3.2 Hipótesis 2. Rotura de aglomerante y granos abrasivos.....	90
7.4 Modelo para la simulación de las muelas abrasivas como materiales compuestos porosos.....	94
7.4.1 Modelización de los granos abrasivos.....	95
7.4.2 Modelización de los poros	99

7.4.3 Creación del modelo de muela abrasiva	101
7.5 Simulación del ensayo de flexión	102
7.5.1 Condiciones de contacto del modelo.....	103
7.5.2 Condiciones de contorno del modelo	103
7.5.3 Mallado del modelo	104
7.5.4 Propiedades mecánicas de los materiales	104
7.6 Resultados de la simulación	106
7.6.1 Tensión de rotura	106
7.6.2 Módulo elástico.....	111
7.6.3 Posibles fuentes de error	113
8. Conclusiones y posibles trabajos futuros.....	114
9. REFERENCIAS.....	116
10. ANEXO IMÁGENES SEM.....	119
10.1 Primer análisis visual	119
10.1 Primer análisis visual	124

1. Resumen

1.1 Castellano

Este trabajo tiene como objetivo principal la caracterización del comportamiento mecánico de una muela de alúmina vitrificada. Nace de la necesidad por parte de los fabricantes de muelas abrasivas de obtener información que permita identificar los fenómenos de desgaste predominantes que suponen el desgaste prematuro de la herramienta durante el proceso de rectificado y, por tanto, un coste adicional.

Tras un análisis exhaustivo el estado del arte en relación a la caracterización mecánica de materiales compuestos y modelización del proceso de rectificado se procede al diseño y realización de la parte experimental del trabajo. Esta consiste en la caracterización mecánica de las muelas abrasivas mediante el ensayo de flexión a 3 puntos. Se analizan probetas de prismáticas cuya composición es la de una muela abrasiva de alúmina vitrificada. Se ensayan 2 tipos de granos abrasivos, los convencionales o policristalinos y los monocristales, con el fin de obtener la influencia de la estructura cristalina en las propiedades mecánicas de la muela abrasiva.

Cabe destacar que esta caracterización mecánica se lleva a cabo tanto de forma experimental como numérica, con el fin de poder determinar las propiedades mecánicas del material de muela abrasiva sin tener que, en un futuro, ensayas experimentalmente cada tipo de composición de muela, siendo suficiente su simulación numérica. Esto abarata los costes de puesta a punto de nuevas configuraciones de muelas.

Además, se lleva a cabo la sensorización de los ensayos experimentales, midiendo fuerza y desplazamiento, para a partir de ellos obtener el valor de la tensión a la fractura y el módulo elástico del material y estudiar la influencia del tipo de estructura cristalográfica sobre el comportamiento mecánico de la muela.

Por otro lado, se toman muestras de las probetas ensayadas experimentalmente y se llevan al laboratorio singular de multiespectroscopias acopladas (LASPEA) de los Servicios Generales de Investigación (SGIKER). En él se realiza una inspección visual de la cara de fractura mediante la toma de imágenes SEM y análisis EDAX. Con ello se estudia a nivel microscópico los fenómenos de desgaste que predominan y favorecen la fractura del material, así como la influencia de su composición.

Finalmente, una vez estudiados los aspectos mencionados en el bloque de ensayos experimental, de análisis visual microscópico y de simulación computacional, se obtienen unos resultados y se comparan para llegar a unas conclusiones. Además, con esto, se establecen unos puntos de estudio para avanzar en el estudio del comportamiento mecánico de las muelas abrasivas y la naturaleza del desgaste en futuros trabajos.

1.2 Euskera

Lan honen helburu nagusia alumina beiratzatuzko harri baten portaera mekanikoa ezaugarritzea da. Harri urratzaileen fabrikatzaileek informazioa lortzeko duten beharretik sortzen da, artezketa-prozesuan erremintaren higadura goiztiarra dakarten higadura-fenomeno nagusiak identifikatzeko, eta, beraz, kostu gehigarria.

Material konposatuen karakterizazio mekanikoari eta artezketa-prozesuaren modelizazioari dagokion bibliografia ondo aztertu ondoren, lanaren metodologia eta prozedura diseinatu eta egin da. Harri urratzaileen karakterizazio mekanikoa egingo da 3 puntuko flexio-saiakuntzaren bidez. Prismatikoak diren probetak aztertzen dira, eta horien konposizioa alumina beiratzatuzko harri urratzaile batena da. 2 ale urratzaile mota aztertzen dira, konbentzionalak edo polikristalinoak eta monokristalistak, harri urratzailearen propietate mekanikoetan kristal-egituraren eragina lortzeko.

Azpimarratu behar da karakterizazio mekaniko hori esperimentalki zein zenbakizko simulazioaren bidez egiten dela, harri urratzaileko materialaren propietate mekanikoak zehaztu ahal izateko, etorkizunean harri-konposizio mota bakoitza esperimentalki entseatu behar izan gabe, eta zenbakizko simulazioa nahikoa izanik. Horrek harrien konfigurazio berriak prest jartzeko kostuak merkatzen ditu.

Gainera, saiakuntza esperimentalen sentzorizazioa egiten da, indarra eta desplazamendua neurtuz, horietatik abiatuta hausturaren tentsioaren balioa eta materialaren modulu elastikoa lortzeko eta egitura kristalografiko motak harriaren portaera mekanikoan duen eragina aztertzeko.

Bestalde, esperimentalki entseatutako probeten laginak hartzen dira eta Ikerketa Zerbitzu Orokorretako (SGIKER) espektroskopia akoplatuen laborategi berezira eramaten dira (LASPEA). Bertan, haustura-aurpegiaren ikuskapen bisuala egiten da, SEM irudiak hartuz eta EDAX analisia eginez. Horrela, maila mikroskopikoan aztertzen dira materialaren haustura nagusitzen eta errazten duten higadura-fenomenoak, bai eta horien konposizioaren eragina ere.

Azkenik, saiakuntza esperimentalen, ikus-analisi mikroskopikoen eta simulazio konputazionalen blokean aipatutako alderdiak aztertu ondoren, emaitza batzuk lortu eta konparatu egiten dira ondorio batzuk ateratzeko. Gainera, honekin, harri urratzaileen portaera mekanikoaren eta etorkizuneko lanetan higaduraren izaeraren azterketan aurrera egiteko azterketa-puntu batzuk ezartzen dira.

1.3 English

The objective of this work is the characterization of the vitrified alumina grinding wheel mechanical behavior. It arises from the need of grinding wheel manufacturers to obtain information to identify the predominant wear phenomena. This information may allow to reduce the tool premature wear during the grinding process and, therefore, to reduce this additional cost.

Initially, an exhaustive analysis of the state of the art in relation to the composite materials mechanical characterization and the grinding process modeling is carried out.

The grinding wheels mechanical behavior characterization by performing flexural tests is obtained from of the 3-point bending test. Prismatic specimens of vitrified alumina are analyzed. Two types of abrasive grains are tested, conventional or polycrystalline and monocrystalline, in order to obtain the influence of the crystalline structure on the grinding wheel mechanical properties.

This mechanical characterization is carried out both experimentally and numerically, in order to be able to determine the grinding wheel mechanical properties without having to experimentally test each type of wheel composition in the future, being sufficient its numerical simulation. This reduces the costs for the development of new wheel configurations.

In addition, the sensorization of the experimental tests is carried out, measuring force and displacement, to obtain from them the value of the fracture stress and the elastic modulus of the material and to study the influence of the crystallographic structure type on the grinding wheel mechanical behavior.

On the other hand, samples of the experimentally tested specimens are taken to the singular laboratory of coupled multispectroscopy (LASPEA) of the General Research Services (SGIKER). There, a visual inspection of the fracture face is carried out by SEM and EDAX analysis. In this way, the wear phenomena that predominate and favor the fracture of the material, as well as the influence of its composition, are studied at a microscopic level.

Finally, results are obtained and compared to reach conclusions. Furthermore, some future study points are established to advance in the study of the mechanical behavior of grinding wheels and the nature of the wear.

2. Lista de tablas, Figuras y Nomenclatura

2.1 Lista de Tablas

Tabla 1: Propiedades de materiales abrasivos [1]	24
Tabla 2: Propiedades de la alúmina según su estructura	27
Tabla 3: Características de las probetas del lote 1 y 2.	51
Tabla 4: Datos técnicos de la INSTRON 5967	53
Tabla 5: Datos técnicos del utillaje Bend Fixture 642.01A.	53
Tabla 6: Datos técnicos de la ZWICK ROELL Z250.	55
Tabla 7: Características del sensor láser de desplazamiento optoNCDT ILD 1900-2LL (Micro-Epsilon).	55
Tabla 8: Datos técnicos del horno ROHDE ME 30/13	56
Tabla 9: Características de las probetas de muela de alúmina vitrificada	58
Tabla 10: Mediciones de la sección de las probetas del bloque experimental 2.....	59
Tabla 11: Mediciones de la sección de las probetas del bloque experimental 3 tras el pulido..	60
Tabla 12: Ajuste de la flecha medida en los ensayos experimentales de flexión a 3 puntos del bloque 1.	62
Tabla 13: Resultados del bloque experimental 2.....	63
Tabla 14: Resultados del bloque experimental 3.....	64
Tabla 15: Comparativa entre las mediciones en los bloques experimentales 2 y 3.	64
Tabla 16: Resultados de la caracterización del comportamiento mecánico de las muelas ensayadas.....	65
Tabla 17: Proporción de la composición de las mezclas empleadas en la fabricación de las probetas del aglomerante.....	67
Tabla 18: Medición de las dimensiones de las probetas ensayadas.....	70
Tabla 19: Resultados del ensayo de flexión a 3 puntos de las probetas de aglomerante vítreo.	71
Tabla 20: Comparativa entre la tensión última del vítreo, muela y granos de alúmina.	71
Tabla 21: Composición de los 2 modelos simulados.....	95
Tabla 22: Tamaño y porcentaje de grano en las secciones de corte.	98
Tabla 23: Comparación de la tensión de fractura obtenida en la simulación.....	110
Tabla 24: Comparación del módulo elástico obtenido en la simulación.	113

2.2 Tabla de figuras

Figura 1: a) elementos básicos en rectificado; b) parámetros básicos en rectificado. [8].....	22
Figura 2: Estructura de una muela aglomerada [9].....	23
Figura 3: a) Producción mundial de granos abrasivos: a producción de abrasivos convencionales en 2011; b) producción de super abrasivos en 2008 [12].	24
Figura 4: Fases en la fabricación de muelas abrasivas vitrificadas [1]	28
Figura 5: Inputs y outputs en los desgaste a macroescala y microescala [2].....	29
Figura 6: Fenómenos de desgaste: a) fractura del vítreo; b) wear flat; c) macrofractura del grano; d) desprendimiento del grano; e) microfractura del grano; f) embotamiento de viruta.	30
Figura 7: Sistema estándar para la denominación de muelas convencionales [8]	32

Figura 8: Tipos de estructura de las muelas de rectificado [1]	33
Figura 9: Posibles modelos y sus interrelaciones [27].	35
Figura 10: Simulación de las tensiones por contacto en micromodelo [25].....	36
Figura 11: Topografía de un modelo 3D de muela con geometría esférica de granos abrasivos [11].	36
Figura 12: Evolución del desgaste en un modelo de único grano a distintas alturas de exposición [26]	38
Figura 13: Curvas σ - ϵ para materiales frágiles (a), dúctiles (b) y cuasi-frágiles (c)	39
Figura 14: Curva σ - ϵ para un material cuasifragil sometido a tracción pura.	40
Figura 15: Configuración de los ensayos de flexión a 3 puntos (a) y a 4 puntos (b) [29]	42
Figura 16: Porosidad para varias muelas Norton en función de su grado [8].....	45
Figura 17: Distribución de la componente ϵ_{yy} del tensor de deformaciones en la fase de iniciación de grieta del espécimen homogéneo (a) y del espécimen no homogéneo (b) [26]. ..	46
Figura 18: Composición de a) hormigón, b) muelas abrasivas.....	47
Figura 19: Ensayo de flexión en 3 puntos con entalla inferior [39].	48
Figura 20: Polvo CMC.	52
Figura 21: INSTRON 5967.	52
Figura 22: Utilaje Bend Fixture 642.01A con montaje de rodillos $\varnothing 8\text{mm}$	53
Figura 23: Calibración del sensor Eddy Current.	54
Figura 24: ZWICK ROELL Z250.	54
Figura 25: Horno ROHDE ME 30/13.	55
Figura 26: Parámetros de la curva de calentamiento del controlador TC504.	56
Figura 27: Diagrama del montaje de la configuración del ensayo de flexión a 3 puntos según ASTM C293	57
Figura 28: Medición de la deflexión con sensor Eddy Current.	59
Figura 29: Pulido de las probetas del bloque 3 del ensayo experimental	60
Figura 30: Montaje del sistema de medición láser.	61
Figura 31: Esquema de la indentación de los rodillos sobre la probeta de alúmina vitrificada. ..	61
Figura 32: Marcas de indentación de los rodillos del bloque 1 de ensayos.....	62
Figura 33: Diagrama σ - ϵ del bloque experimental 2.....	63
Figura 34: A) Molde de Nylon, B) Molde por extrusión de acero, C) Molde de acero, D) Molde de acero con cinta, E) Molde de aluminio.....	67
Figura 35: Proceso de fabricación de las probetas de aglomerante vítreo en verde.	68
Figura 36: Ciclo de sinterizado de probetas de vítreo.....	69
Figura 37: Probetas de aglomerante vítreo tras el ciclo de sinterizado.	69
Figura 38: a) Sección ovalada de una probeta de aglomerante vítreo, b) medición de \varnothing y \varnothing_2 de la probeta ovalada.....	69
Figura 39: Tratamiento de imagen SEM de la sección de una probeta de aglomerante vítreo con Image J.....	70
Figura 40: Equipo de Microscopía de Barrido Electrónico Carl Zeiss EVO-40.....	74
Figura 41: Equipo metalizador por sputtering.	74
Figura 42: Obtención de muestras de las probetas de 5MVA.	75
Figura 43: Recubrimiento de oro sobre las muestras de alúmina monocristal.	75
Figura 44: Fractura de aglomerante vítreo.	76
Figura 45: Puente de unión de material vítreo entre dos granos abrasivos	77
Figura 46: Imagen SEM de la fractura de las probetas del bloque experimental 1 (5MBA).....	77
Figura 47: Imagen SEM y análisis EDAX de la fractura de probeta de 5MBA.....	78
Patricia Gómez	11

Figura 48: Imagen SEM y análisis EDAX de la fractura de probeta de 5MBA (tracción).	78
Figura 49: Imagen SEM y análisis EDAX de la fractura de probeta de 5MBA (tracción).	79
Figura 50: Polvo desprendido del ensayo de flexión a 3 puntos del bloque 1 (5MBA).	80
Figura 51: Grano de alúmina desprendido de una operación de rectificado.	80
Figura 52: Grano de alúmina desprendido de una operación de rectificado.	81
Figura 53: Análisis EDAX sobre probetas de alúmina monocristal (izqda) y convencional (dcha).	83
Figura 54: Fractura de probeta con MA en distintos planos (izqd), fractura en probeta de CBN en un mismo plano (dcha.....	83
Figura 55: Análisis EDAX e imagen SEM de EDAX de la fractura de probeta de MA (tracción). .	84
Figura 56: Análisis EDAX e imagen SEM de EDAX de la fractura de probeta de CBL (tracción)..	84
Figura 57: Análisis EDAX e imagen SEM de EDAX de la fractura de probeta de CBL (compresión)	85
Figura 58: Análisis EDAX e imagen SEM de EDAX de la fractura de probeta de CBL (tracción). 85	85
Figura 59: esquema representativo del modelo inicial con ED.	88
Figura 60: Esquema representativo del segundo modelo con ED.	89
Figura 61: Condiciones de fractura para las vigas de unión de los ED.	90
Figura 62: Esquema representativo del tercer modelo con ED.	91
Figura 63: Conexión nodos entre elementos sólido y viga.	91
Figura 64: Condiciones de contacto de los elementos del tercer modelo.	92
Figura 65: Esquema representativo del quinto modelo con ED.	92
Figura 66: Fuerzas aplicadas por los rodillos durante la simulación del ensayo de flexión a 3 puntos.	93
Figura 67: Distribución de tensiones (Rankine) de un stick isótropo.	93
Figura 68: Tamaño de grano según tamiz empleado.	95
Figura 69: Ajuste por distribución normal del tamaño de grano.	96
Figura 70: Superficie proyectada de un corte de sección de una distribución aleatoria de esferas.	96
Figura 71: Creación de granos según las condiciones descritas en 5x5x5mm	97
Figura 72: Proceso de ajuste de datos del modelo 3D a 2D.	97
Figura 73: Histograma de \varnothing de grano (μm) y ajuste según distribución GEV.	98
Figura 74: Creación de granos en 20x6.5x0.5mm según las condiciones descritas.	99
Figura 75: a) imagen tomada de la superficie de la muela; b) revelado de la porosidad con Image J.	99
Figura 76: Histograma de \varnothing de poro (μm) y ajuste según distribución log. logistic.	100
Figura 77: Condición de posición para la creación de nuevas esferas poros.	101
Figura 78: Creación de poros en 20x6.5x0.5mm según las condiciones descritas	101
Figura 79: Modelo 2D para la simulación del ensayo de flexión a 3 puntos a escala 1:4.	102
Figura 80: Contacto entre grano (contact body) y aglomerante (target body).	103
Figura 81: Mallado del modelo.	104
Figura 82: Propiedades mecánicas de la alúmina monocristal introducidas en el modelo de Ansys.	105
Figura 83: Propiedades mecánicas de la alúmina convencional introducidas en el modelo de Ansys.	105
Figura 84: Propiedades mecánicas del material vitreo introducidas en el modelo de Ansys..	105
Figura 85: Progresión del FS según Mhor-Coulomb para modelo convencional.	107
Figura 86: Progresión del FS según Mhor-Coulomb para modelo con monocristal.	108
Patricia Gómez	12

Figura 87: FS según Mhor-Coulomb para modelo monocristal en la zona inferior central..... 109
 Figura 88: FS según Mhor-Coulomb para modelo convencional en la zona inferior central.... 109
 Figura 89: Medición de la flecha para el modelo de grano convencional. 111
 Figura 90: Medición de la flecha para el modelo de grano monocristal..... 112

2.3 Nomenclatura

G	-	Relación de rectificado
Vw	μm^3	Volumen de material de pieza extraído
Vs	μm^3	Volumen de material de pieza desgastado
v	-	Coefficiente de Poisson
K	GPa	Módulo de rigidez
E	GPa	Módulo de elasticidad
G	GPa	Módulo de cizalla
σ	Mpa	Tensión de fractura
P	N	Carga aplicada durante el ensayo de flexión a 3 puntos
L	mm	Vano entre apoyos del ensayo de flexión a 3 puntos
D	mm	Diámetro de las probetas ensayadas en el ensayo de flexión a 3 puntos
h	mm	Espesor de las probetas ensayadas en el ensayo de flexión a 3 puntos
B	mm	Ancho de las probetas ensayadas en el ensayo de flexión a 3 puntos
m		Módulo de Weibull
r	MN/min	relación de carga aplicada en en el ensayo de flexión a 3 puntos
S	MPa/min.	relación de aumento de tensión en las fibras de la parte externa en el ensayo de flexión a 3 puntos
A	mm^2	Sección transversal de las probetas ensayadas durante el ensayo de flexión a 3 puntos
I	N/mm^4	Inercia
d_g	μm	Diámetro de grano
M	μm	Número de tamiz por el que se filtra el grano abrasivo
\varnothing_{min}	μm	Diámetro mínimo de grano
\varnothing_{med}	μm	Diámetro medio de grano
\varnothing_{max}	μm	Diámetro máximo de grano
ϕ		Pendiente del ángulo de rozamiento interno en el círculo de Mhor-Coulomb
τ	MPa	Esfuerzo cortante
c		
σ_{MAexp}	MPa	Tensión de fractura experimental de alúmina monocristalina vitrificada
σ_{MAsim}	MPa	Tensión de fractura simulada de alúmina monocristalina vitrificada
σ_{CBLexp}	MPa	Tensión de fractura experimental de alúmina convencional vitrificada
σ_{CBLsim}	MPa	Tensión de fractura simulada de alúmina convencional vitrificada
F_{MAexp}	N	Fuerza soportada por la alúmina monocristalina vitrificada durante el ensayo experimental
F_{MAsimu}	N	Fuerza soportada por la alúmina monocristalina vitrificada durante la simulación computacional

$F_{CBN_{exp}}$	N	Fuerza soportada por la alúmina convencional vitrificada durante el ensayo experimental
$F_{CBN_{simu}}$	N	Fuerza soportada por la alúmina convencional vitrificada durante la simulación computacional
$y_{MA_{exp}}$	mm	Flecha alcanzada por la alúmina monocristalina vitrificada durante el ensayo experimental
$y_{MA_{simu}}$	mm	Flecha alcanzada por la alúmina monocristalina vitrificada durante la simulación computacional
$y_{CBN_{exp}}$	mm	Flecha alcanzada por la alúmina convencional vitrificada durante el ensayo experimental
$y_{CBL_{simu}}$	mm	Flecha alcanzada por la alúmina convencional vitrificada durante la simulación computacional
E_t	GPa	Módulo elástico teórico de la muela

3. Introducción

3.1 Contexto

Este trabajo se realiza junto al grupo de investigación de Fabricación de Alto Rendimiento del departamento de Ingeniería Mecánica de la UPV/EHU, en la Escuela de Ingeniería de Bilbao. Su investigación está enfocada a los procesos de fabricación centrándose en el fresado a alta velocidad, la electroerosión, el corte y grabado láser y el rectificado. Dentro de éste, en función del proceso, se encuentran diferentes subgrupos de investigación, concretamente, este trabajo se ha desarrollado dentro del Grupo de Rectificado.

Cabe mencionar que el proceso de rectificado es una operación crítica presente en las últimas etapas en la fabricación de componentes de alta precisión. Dentro de los procesos de mecanizado, supone entre el 20 y el 25% de los costes totales de arranque de viruta en los países industrializados en sectores como la automoción, aeronáutica, ferrocarril, energía y biomédica. Por ello, es necesario desde un punto de vista industrial conocer y aplicar a sus procesos el know-how del rectificado y desde un punto de vista científico seguir desarrollando nuevas tecnologías enfocadas tanto a la herramienta, la muela, como al propio proceso y a las variables que intervienen.

Además, Euskadi es una de las regiones más importantes en Europa dentro del sector del metal debido al papel que representa su posición en la industria de la máquina-herramienta, la envergadura del número de empresas que comprende (siderurgia, fundición, forja, automoción, naval, energía...) y los puestos de trabajo que genera. Además, cuenta con un gran número de instituciones de soporte que apoyan las actividades de I+D y la difusión de nuevas tecnologías. Dentro de los sectores mencionados se imponen unos requisitos de fabricación cada vez más exigentes que fuerzan el continuo desarrollo del proceso de rectificado. Esta tendencia conduce al desarrollo de nuevos materiales abrasivos, de nuevas configuraciones de muela e incluso de nuevas tecnologías de rectificado.

Para lograr este objetivo es necesario una mayor comprensión del comportamiento de las muelas abrasivas durante el proceso. El grupo de rectificado lleva 6 años trabajando sobre esta materia en cuestión. A día de hoy, no se conocen con certeza las propiedades mecánicas de las muelas abrasivas, ni el comportamiento de las mismas frente al mecanizado de nuevos materiales, por ello, es necesario seguir trabajando sobre esta línea.

Los recientes avances en muelas abrasivas de alúmina vitrificada la sitúan como una valiosa opción frente a otras alternativas más costosas como las muelas superabrasivas. Esto es posible gracias al desarrollo de granos de alúmina con capacidad de autoafilado, las nuevas formulaciones de los fabricantes de aglomerantes vítreos o la alta eficiencia de las nuevas estrategias de operación desarrolladas como el creep.

Asimismo, cabe destacar la estrecha colaboración del grupo de rectificado con fabricantes de rectificadoras como Danobat S. Coop., centros tecnológicos especializados en tecnologías de fabricación y producción industrial como IDEKO y fabricantes de muelas abrasivas como Abrasivos Unesa S.L. Esto permite combinar los

modelos teóricos con estrategias de monitorización que permiten optimizar los procesos productivos en los que interviene la operación de rectificado. El trabajo desarrollado entra dentro de este objetivo, ya que se pretende avanzar en la caracterización del comportamiento mecánico de las muelas abrasivas con el fin de cuantificar y minimizar el desgaste sufrido por las mismas durante el proceso. En concreto, este trabajo nace de la necesidad del fabricante de muelas abrasivas UNESA de conocer el comportamiento mecánico de las muelas, para así facilitar a sus clientes soluciones a medida sin pérdidas de tiempo y económicas debido a una larga puesta a punto del proceso. Esta empresa, además de dedicarse a la fabricación de las muelas abrasivas, ha apostado en ofrecer soluciones del proceso de rectificado a medida a sus clientes, por lo que le es indispensable conocer las propiedades mecánicas de las muelas, trabajo que realiza en colaboración con el grupo de rectificado y que concretamente se aborda en este trabajo.

Cabe destacar que el trabajo se desarrolla en los talleres de la Escuela de Ingeniería de Bilbao de la Universidad del País Vasco. Además, se realizan a través de los servicios generales de investigación (SGIker) ensayos de caracterización de materiales mediante la realización de ensayos mecánicos y análisis SEM en el laboratorio singular de multiespectroscopias acopladas (Raman-LASPEA).

3.2 Descripción del problema

El proceso de rectificado supone entorno al 25% de los costes de fabricación de una pieza [1], dentro de los cuales, el coste de la herramienta supone una parte significativa de los costes de la operación de rectificado. Por ello, minimizar el consumo de herramientas, de muelas abrasivas, es crucial para minimizar los costes de producción del proceso. El desgaste prematuro de la herramienta es hoy día uno de los aspectos más importantes a abordar a la hora de diseñar un proceso de rectificado, ya que no sólo implica un consumo elevado de muelas, sino que también puede llevar al rechazo de piezas por no cumplir los requisitos de calidad superficial y tolerancias geométricas y dimensionales requeridas por el cliente. Cada tipo de desgaste que pueden sufrir las muelas abrasivas está relacionado con un tipo de defecto ocurrido en el proceso.

Por un lado, la pérdida de la capacidad de corte de la herramienta puede ocasionar daño térmico en la superficie rectificada o rugosidades más elevadas de las diseñadas. Por otro lado, si la herramienta se desgasta de una forma prematura, lo que se conoce como desgaste volumétrico, supone un importante aumento en los costos del proceso al estar desechando tempranamente material abrasivo aprovechable, además de no conseguir las tolerancias dimensionales y geométricas de diseño. La vida de la muela está directamente relacionada con su desgaste. Por ello, la minimización del desgaste y los efectos que puede ocasionar son aspectos fundamentales y que llevan siendo objeto de estudio durante los últimos años.

La mayor parte de las investigaciones que estudian el desgaste se centran en los granos abrasivos. Estudian su friabilidad, la generación de caras planas o el impacto que tiene los distintos tipos de diamantado y su frecuencia. En el estudio del desgaste volumétrico, existe una preocupación por su cuantificación, utilizando para ello el parámetro G-ratio de desgaste. Aunque a día de hoy no existen estudios que profundicen en la fractura del aglomerante o en su caracterización mecánica, desde el punto de vista industrial, existe la necesidad de conocer el comportamiento de cada tipo de aglomerante y de su comportamiento en el conjunto grano-aglomerante, como compuesto de muela.

La muela abrasiva, compuesta por los granos abrasivos y el aglomerante, que además tiene porosidad, se puede considerar como un material compuesto. El aglomerante actúa como la matriz, que da forma a la herramienta, retiene los granos y transmite los esfuerzos a los que la muela está sometida durante la operación. Cada grano se comporta como un micro filo de la herramienta y otorgan a esta la capacidad de corte. La porosidad permite por un lado conducir el fluido de corte y por otro lado evacuar la viruta. Cada elemento que compone las muelas abrasivas tiene sus propiedades mecánicas. En general, las propiedades de los granos abrasivos (dureza, friabilidad, tensión de rotura...) se pueden obtener fácilmente en bibliografía. Sin embargo, para el aglomerante, debido a la gran variedad existente en el mercado, con una composición química para cada caso, no es común encontrar esta información. Además, el comportamiento de la herramienta será una combinación del comportamiento individual de ambos, afectando, además, la porosidad de la muela. Este proyecto nace de la necesidad de caracterizar el comportamiento mecánico de las muelas abrasivas, concretamente las muelas de alúmina con aglomerante vítreo. Esta información es de gran utilidad para comprender el origen del desgaste volumétrico de las muelas.

3.3 Objetivos

El objetivo final del proyecto es caracterizar el comportamiento mecánico de una muela de alúmina vitrificada obteniendo para ello los valores de tensión de rotura y módulo de Young. Para llegar a ello, este trabajo se centra en tres bloques:

1. Caracterización experimental de la muela abrasiva mediante ensayos de flexión a 3 puntos. Se realizan ensayos experimentales de probetas de muela vitrificada variando el tipo de grano de alúmina para caracterizar el comportamiento mecánico del material y estudiar la influencia del tipo de estructura cristalina. De forma paralela se realiza la caracterización del material vítreo a partir de la fabricación y ensayo de probetas sinterizadas.

2. Análisis microscópico de la fractura predominante. Se realiza un análisis visual a partir de la toma de imágenes mediante microscopía electrónica de la cara de rotura de las probetas ensayadas. Con ello se busca principalmente identificar el tipo de fallo predominante.

3. Modelización computacional de los ensayos de flexión a 3 puntos. Se realiza una simulación de los ensayos de flexión a 3 puntos mediante un modelo de elementos finitos con el fin de obtener una metodología para caracterizar distintas tipologías de muelas sin necesidad de realizar ensayos experimentales y minimizar costes.

Con ello se espera aportar información de base que permita en un futuro ahondar en el desgaste de la herramienta durante el proceso de rectificado. Para ello se estudiarán los fenómenos de desgaste predominantes que llevan a la muela a la fractura cuando se le somete a un esfuerzo estático. También se estudiará la influencia del tipo de estructura cristalográfica de los granos abrasivos en el comportamiento mecánico de la muela.

3.4 Beneficios

Respecto a los beneficios que puede aportar esta investigación, se amplían los conocimientos en el área del proceso productivo de las muelas abrasivas de alúmina convencionales en cuanto a la eficiencia del producto. Se parte de la necesidad de empresas como Abrasivos Unesa de conocer el comportamiento frente al desgaste de las muelas convencionales, como de los sectores de la industria mencionados que esperan afinar el costo que les supone el desgaste de la propia muela. En concreto, se obtiene información de cómo puede afectar al desgaste volumétrico los siguientes parámetros:

- Propiedades mecánicas de los componentes de la muela abrasiva. En cuanto a la forma en la que se produce la fractura de la muela y la progresión de la fractura.
- Grado de adhesión entre los componentes de la muela abrasiva. En cuanto a la calidad del aglomerante y su capacidad para la transmisión de esfuerzos a los granos abrasivos.
- Proporción de los componentes. En cuanto a la progresión de la fractura, la resistencia y la rigidez de la muela.
- Tipo de estructura cristalográfica de la alúmina. En cuanto a la progresión de la fractura y el nivel de adhesión del aglomerante.

Mediante la modelización del ensayo caracterización del comportamiento mecánico de la muela planteado es posible estudiar otras configuraciones de muela abrasiva de forma sencilla y práctica sin la necesidad de realizar nuevos ensayos experimentales físicos con lo que se puede ahorrar el gasto de materiales, recursos y tiempo. Además, la realización de los ensayos, metodologías planteadas y la simulación del moldeo puede ser ajustable a futuros trabajos relacionados con los objetivos.

3.5 Alternativas

En este apartado se detallan las dos alternativas con las que se pueden alcanzar los objetivos del presente trabajo anteriormente descritos. Se exponen las características generales de cada método y las ventajas e inconvenientes que pueden aportar. En un posterior apartado se realiza una valoración de las alternativas y se justifica la elección que se ha tomado.

3.5.1 Ensayos experimentales durante la operación de rectificado

Habitualmente se realizan estudios que tratan de definir el mecanismo de desgaste predominante durante la operación del rectificado en base al control y monitorización de diferentes parámetros como:

- Las fuerzas de rectificado. Un aumento de la fuerza tangencial respecto de la normal es signo de la pérdida de los filos de corte.
- Temperaturas en el punto de contacto. La medición de temperaturas elevadas en el contacto es signo un aumento del rozamiento entre la muela y la pieza derivado de la generación de caras planas.
- Desgaste volumétrico de la muela. Un desgaste excesivo de la muela está asociado un uso de muelas demasiado blando, es decir, un aglomerante que retiene poco a los granos.
- Cambio en la rugosidad de la pieza. Puede implicar el desgaste por la pérdida de los filos de corte.

- Medición de los residuos de la operación. Se puede identificar, en base al tamaño y forma, la fractura del grano.

3.5.2. Ensayos de caracterización mecánica.

Los ensayos mecánicos se efectúan para caracterizar las propiedades mecánicas de los materiales, determinar sus aplicaciones y asegurar que cumplen la finalidad de acuerdo a la que fueron diseñados. Habitualmente se realizan este tipo de ensayos sobre materiales metálicos, cerámicos... en general materiales homogéneos. Para el caso de los granos abrasivos se caracterizan parámetros como su dureza, friabilidad, resiliencia o resistencia frente a esfuerzos de compresión o flexión. Esto puede aportar información en relación al desgaste según los fenómenos de fractura de grano o pérdida de filo. Sin embargo, no nos aporta información del desgaste volumétrico. Para ello es necesario caracterizar el aglomerante y la muela abrasiva. Como se ha comentado, no es habitual la realización de ensayos mecánicos del conjunto de la muela abrasiva. La caracterización del comportamiento mecánico de la muela abrasiva no sólo sirve para determinar el desgaste volumétrico de forma experimental, en base a sus propiedades mecánicas, sino que es de gran utilidad para la modelización tanto de los ensayos mecánicos, como del desgaste volumétrico de la muela. Con esta caracterización se obtiene los valores de módulo de elasticidad y de tensión de rotura, los cuales son fundamentales para determinar el comportamiento mecánico de los materiales frágiles.

2.2.3. Modelización del desgaste.

Tanto los modelos analíticos basados en formulaciones matemáticas como las simulaciones de modelos de elementos finitos permiten conocer más en profundidad la evolución del desgaste provocado por el contacto entre pieza y granos abrasivos. Es habitual que estos modelos se enfoquen en un solo grano o en un pequeño número en una porción reducida de muela, sobre una misma capa. En este sentido existen trabajos que estudian el desgaste de cara plana del grano abrasivo durante la operación del diamantado o la fractura de grano en función de su grado de exposición.

3.6 Solución adoptada

Para la caracterización de las propiedades mecánicas de las muelas abrasivas, en este proyecto se ha optado por combinar dos de las alternativas anteriores: la realización de ensayos mecánicos para la caracterización de las propiedades mecánicas de las muelas abrasivas y la modelización de dichos ensayos teniendo en cuenta la naturaleza heterogénea y arbitraria de la muela. Los ensayos experimentales y la monitorización del proceso de rectificado implican a menudo costosas pruebas que, en muchas ocasiones, requieren la parada del proceso productivo. Además de esto, los parámetros que se suelen controlar durante la operación, anteriormente definidos, pueden aportar información del grado de desgaste al que está siendo sometida la muela, pero a menudo no esclarecen el foco o fenómeno predominante que lo produce. Esto se debe a la complejidad de aislar los fenómenos de desgaste que a menudo suelen solaparse.

El desgaste volumétrico de una muela se debe principalmente a la fractura del aglomerante, aunque también se suele dar, de manera menos predominante, la fractura de los granos. Para conocer el comportamiento global del compuesto es fundamental tener en cuenta el material aglomerante, cuyas propiedades son habitualmente omitidas

tanto en ensayos experimentales como en modelos analíticos. Para que el desgaste de la muela sea moderado no solo interesa la dureza, capacidad de corte, grado de exposición o conductividad térmica de los granos, sino que se debe tener en cuenta las propiedades del material que los sustenta, su capacidad de retención, de transmisión de esfuerzos y su rigidez. Estas propiedades son difíciles de encontrar en bibliografía debido a la variabilidad de aglomerantes. Además, normalmente los fabricantes de muelas tampoco poseen esta información. Es por ello por lo que este trabajo aborda la caracterización mecánica de las muelas abrasivas. Además, se trata de determinar la fractura predominante durante los ensayos mecánicos, diferenciando entre la fractura del grano de alúmina, la fractura del aglomerante y el fallo por adhesión entre grano y aglomerante, o la fractura en la interface entre grano y aglomerante.

La alternativa escogida se centra en la obtención de las propiedades mecánicas de la muela combinando la realización de ensayos mecánicos y la modelización la muela abrasiva diferenciando el aglomerante y los granos abrasivos. En la simulación del modelo se tendrán en cuenta las características individuales de cada uno de los componentes en cuanto a geometría, proporciones y propiedades mecánicas. Para ello se ha escogido una configuración de muela que permita aislar los fenómenos de desgaste que se pretenden estudiar.

4. Estado del arte

4.1 Introducción al rectificado

El proceso de rectificado es un proceso abrasivo que emplea herramientas con partículas abrasivas de alta dureza [1]. Las partículas abrasivas se aglutinan mediante un elemento aglomerante que las fija y da forma a la herramienta abrasiva o muela. En rectificado la muela gira a grandes revoluciones para conseguir velocidades periféricas elevadas en comparación con otros procesos de mecanizado, como el fresado o el torneado. Cada grano abrasivo es una herramienta de corte potencialmente microscópica. El proceso de rectificado utiliza miles de puntos de corte abrasivos simultáneamente que eliminan el material de pieza, más blando que los granos abrasivos. El comportamiento de las muelas abrasivas puede ser altamente flexible, atendiendo al tipo de material abrasivo y aglomerante, entre otros factores, por lo que es determinante una elección acorde a cada operación.

En muchos casos, sobre todo en la producción de componentes críticos o de materiales de alta dureza, se realizan operaciones de rectificado en las etapas finales que buscan evitar la aparición de tensiones residuales o zonas afectadas por el calor con el objeto de mejorar la calidad superficial y asegurar las correctas tolerancias geométricas de diseño [2]. El rectificado está presente en industrias como la marítima, aeronáutica, biomecánica, alimentaria y los motores grandes [3].

El desarrollo de métodos de fundición y forja más precisos con los que se consiguen piezas con geometría cercana a la final (*near-to-shape*) reducen considerablemente la tasa de material a retirar, eliminando así operaciones intermedias, como el fresado o el torneado. Otro aspecto fundamental en cuanto a optimización del proceso y reducción de costes es el avance de las máquinas rectificadoras en cuanto a rigidez, precisión de la cinemática, automatización del proceso y el desarrollo de componentes extras como los cambiadores de herramientas o equipos de medición en la máquina. Además, el avance de los softwares de simulación ha permitido a numerosos investigadores realizar modelos para predecir o controlar lo que ocurre durante un proceso de rectificado [4].

Los recientes avances en muelas abrasivas de alúmina vitrificada permiten considerar esta opción como una solución óptima en un gran número de aplicaciones, frente a las costosas muelas superabrasivas de diamante o CBN. El desarrollo de nuevos materiales de baja maquinabilidad, la exigencia de alcanzar ajustadas tolerancias, excelentes acabados superficiales y de asegurar la integridad de las superficies mecanizadas, ha aumentado los esfuerzos de la industria para mejorar la eficacia tanto de las herramientas existentes, como de los procesos utilizados y de la reducción de los costes [3], [5].

4.2 Conceptos básicos del rectificado

Las variables del proceso de rectificado están determinadas por el resultado que se pretende obtener. Dependen de múltiples factores como del material a rectificar, su dureza, el acabado superficial deseado, la cantidad de material a eliminar y el nivel de integridad que requiere la pieza y del tipo de operación (rectificado plano, cilíndrico, sin centros...). Los elementos básicos que intervienen en la operación son la muela de rectificado, la pieza a rectificar, la máquina rectificadora, el fluido de corte y la herramienta de diamantado como se ilustra en la Figura 1. Cada uno de los elementos puede implicar numerosas fuentes de error. Por la naturaleza de la operación es fundamental tener un control profundo de todas las variables a las que se suman los parámetros del proceso: la velocidad de corte de la muela, su anchura, la profundidad de pasada y la velocidad de la mesa (Figura 1).

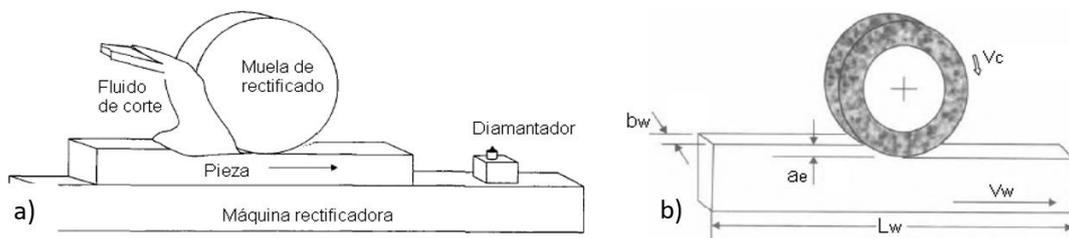


Figura 1: a) elementos básicos en rectificado; b) parámetros básicos en rectificado. [8]

La composición y comportamiento de la muela son factores que definen la eficiencia del proceso por lo que se les prestará especial atención en el presente trabajo. En los siguientes apartados se realiza un análisis de sus componentes y las variables que pueden afectar en su comportamiento durante la operación.

Para evitar los defectos causados por el desgaste de la muela y restaurar su topografía y forma es necesario realizar una operación de diamantado. La frecuencia de diamantado y la profundidad de pasada son parámetros fundamentales en el rendimiento de la operación. Se deben elegir con criterio, ya que el diamantado implica tiempos muertos y si se realiza de forma temprana supone la pérdida de material abrasivo que aún puede aprovecharse. La operación de diamantado no evita el desgaste, pero sí previene los defectos que puede causar que son inaceptables en una operación donde prima la precisión. Por ello múltiples autores se centran en la optimización e innovación de técnicas de diamantado [6], [7].

El desgaste de la herramienta en el proceso de rectificado es el factor más importante que controla el rendimiento y vida útil de las muelas, suponiendo así, una parte importante del coste total de la operación. Un desgaste excesivo puede modificar la forma, dimensiones o estructura de la muela lo que puede afectar la calidad superficial de la pieza rectificada o alterar las condiciones del proceso, aumentando la energía específica consumida o suponiendo la aparición de daño térmico en la pieza [8]. El estudio del desgaste de los componentes de las muelas abrasivas y la forma en la que puede influir en ellos los parámetros de diseño y de operación, supone un campo de investigación muy interesante tanto desde el punto de vista científico como desde el punto de vista industrial. Más adelante, en el apartado 2.4, se ahondará en los

fenómenos causantes del desgaste en muelas abrasivas, tema en el que se centra el presente trabajo.

4.2.1 Muelas abrasivas

Las muelas abrasivas pueden considerarse como materiales compuestos, formados por tres elementos: uno o varios tipos de abrasivos, un material aglomerante para fijar o sostener el abrasivo y alguna porosidad como se ilustra en la Figura 2.

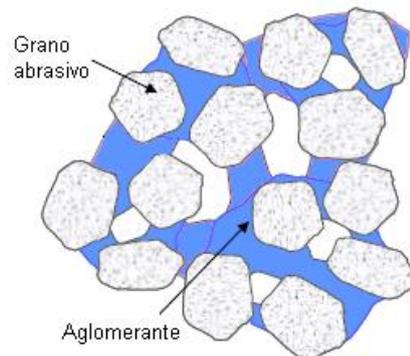


Figura 2: Estructura de una muela aglomerada [9].

La función de la porosidad es proporcionar espacio para las virutas creadas durante el proceso de rectificado, para el transporte de fluidos y para mejorar las diversas interacciones que tienen lugar en la zona de contacto. La porosidad en sí puede ser natural o inducida artificialmente. El disco es el formato básico de las muelas de rectificado en el que se distribuyen de forma aleatoria los granos abrasivos.

El rendimiento y la viabilidad de un proceso de rectificado está mayormente definido por los granos abrasivos. Por ejemplo, el tamaño del grano tiene una influencia significativa en las fuerzas, la potencia, el índice de desgaste y el acabado superficial.

Para darle compactación a estos abrasivos, se emplea un material aglomerante o aglutinante de diferentes naturalezas, el cual también está normalizado y forma parte de la denominación de las muelas.

4.2.2 Granos Abrasivos

Los materiales abrasivos se pueden considerar como micro herramientas de corte de geometría variable con aristas afiladas y que se caracterizan por su alta dureza. Cada tipo de abrasivo se escoge en función de la naturaleza del material a rectificar y de su dureza, que siempre debe ser siempre inferior.

Existen dos grupos en función de su dureza, los convencionales y los superabrasivos. Los abrasivos convencionales más comúnmente empleados son materiales sintéticos basados en el óxido de aluminio (Al_2O_3) y el carburo de silicio (SiC) que suelen aglomerarse con materiales vítreos o resinoides. El diamante y el nitruro cúbico de boro (CBN) pertenecen al grupo de los superabrasivos y suelen utilizarse con aglomerantes resinosos o metálicos, además de vítreos en el caso del CBN. Otro aspecto importante es la afinidad química que pueda surgir entre el abrasivo y el material de la pieza, que puede influir en el desgaste de la herramienta. El carburo de silicio es el abrasivo más duro dentro de los convencionales, pero debido a su alta afinidad con el hierro y níquel,

su uso se limita al mecanizado de materiales no féreos como las cerámicas. En la Tabla 1 se especifican los valores de dureza de los abrasivos mencionados.

Tabla 1: Propiedades de materiales abrasivos [1]

Grain Abrasive Material				
	Aluminum oxide (Al ₂ O ₃)	Silicon Carbide (SiC)	Cubic Boron Nitride (CBN)	Diamond
Crystal structure	Hexagonal	Hexagonal	Cubic	Cubic
Melting Point (°C)	2040	2830	~3200 at 105kbar (triple point)	~3700 at 105kbar (triple point)
Knoop Hardness (GPa)	20.6	23.5	46.1	78.5

Las muelas fabricadas con superabrasivos suelen ser de 10 a 100 veces más caras [10], por lo que los abrasivos convencionales siempre han abarcado un amplio porcentaje de la producción. Años atrás existía una previsión de auge del uso de superabrasivos, destacando el CBN [5]. Con la tecnología de rectificado con muelas de CBN se lograban alcanzar altas velocidad de trabajo, mayor resistencia al desgaste (intervalos entre diamantados más largos) y temperaturas de rectificado más bajas [3]. Pero en este escenario todavía existía la necesidad de desarrollar sistemas y características de la máquina que permitiese el uso de CBN en aplicaciones industriales a bajo costo.

Una previsión de la evolución del tamaño del mercado global de abrasivos [11] estima un crecimiento de los 46.4 mil millones de dólares recaudados en 2020 a 58.0 mil millones para 2025. El auge de este sector se atribuye al avance de diferentes industrias (automotriz, electrónica, las industrias de fabricación de metales, etc.). Las estadísticas sobre la producción mundial de granos abrasivos de la Figura 3, muestra que la producción anual de abrasivos convencionales como la alúmina y el carburo de Silicio (2.200.000 de toneladas) está muy por encima de la producción de superabrasivos como el diamante o el nitruro de boro cúbico (11.150 toneladas) [12].

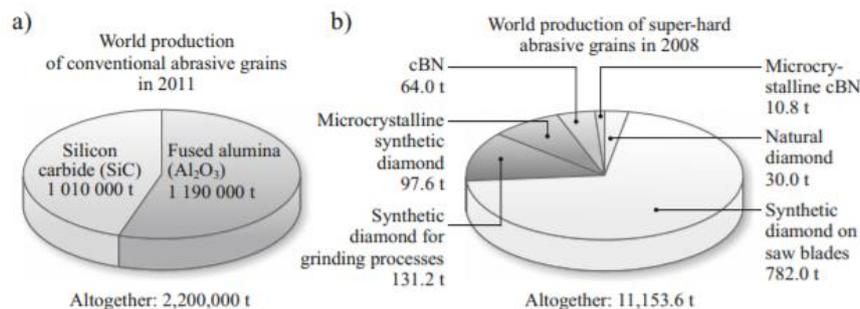


Figura 3: a) Producción mundial de granos abrasivos: a producción de abrasivos convencionales en 2011; b) producción de super abrasivos en 2008 [12].

Los recientes avances en muelas abrasivas de alúmina vitrificada permiten considerar esta opción como una solución óptima en un gran número de aplicaciones. A la previa ventaja del costo inferior frente a otros superabrasivos se le han sumado una mejora de Patricia Gómez

las estrategias y el desarrollo de las tecnologías de diamantado, el desarrollo de la alúmina microcristalina con una mejora en las propiedades mecánicas y auto afilado [12], las nuevas formulaciones de los fabricantes de aglomerantes vítreos que mejoran vida útil alrededor de un 10% [9], la reciente transcendencia de las operaciones de creep o de alta relación del caudal de material eliminado [1]. Es por ello por lo que la alúmina vitrificada se sitúa como una buena alternativa de las costosas muelas superabrasivas cuyo uso se dirige a operaciones en las que se debe asegurar la integridad de las piezas, operaciones críticas como el rectificado interno de orificios [5], o en el rectificado de materiales de alta dureza [9].

El mecanizado de nuevos materiales de alta dureza como las aleaciones de níquel y titanio [9] o de materiales frágiles no metálicos, como la cerámica, los carburos cementados y los vidrios, han promovido la producción de nuevos materiales abrasivos [2]. Actualmente se utilizan muelas de alúmina vitrificada de alto rendimiento en múltiples aplicaciones: mantenimiento de railes de ferroviarios con daños superficiales [13], operaciones de Grind Hardening [9], rectificado cilíndrico de rodillos para las modernas máquinas de impresión [5], aeromotores y elementos de transmisión en motores de helicópteros [14], bolas de rodamientos, y cristales ópticos [15].

La tendencia conducirá al desarrollo de nuevos procesos abrasivos de super acabado y optimización de máquinas herramienta. Para lograr este objetivo, una mayor comprensión del abrasivo existente, de los procesos de acabado y el desarrollo de los modelos de simulación son vitales. Las demandas futuras descritas anteriormente son todo un desafío, no sólo para fabricantes de máquina herramienta y de herramientas abrasivas, sino también para investigadores de procesos abrasivos. La colaboración entre fabricantes de máquina herramienta, proveedores de herramientas abrasivas y la comunidad investigadora será fundamental para pasar a la nueva generación de tecnología abrasiva de superacabado empleando muelas convencionales.

4.2.2.1 Alúmina

La alúmina como abrasivo se desarrolló a finales del siglo XIX, resultante de la fundición de la bauxita a 2200°C [15]. Actualmente se pueden obtener distintas variantes del óxido de aluminio en función del proceso de obtención y de la composición química. En función de ello se pueden obtener granos con distintos grados de pureza y formas de cristalización. El producto abrasivo se obtiene principalmente por electrofusión o procesos más recientes como la precipitación química y el sinterizado. En función de la pureza y de los aditivos empleados destacan:

- Alúmina marrón. Contiene entre un 91-93% de Al_2O_3 . Se le suele añadir TiO_2 , que puede aumentar su resistencia, aunque reduce su dureza, que varía en función de su contenido. Tiene una friabilidad media y se suele usar en muelas resinosas o vitrificadas para operaciones de acabado rugoso donde no influye la rapidez del desgaste de la muela.
- Alúmina Blanca. Se caracteriza por su alta dureza, y pureza. Se suele utilizar en muelas de aglomerante vítreo para operaciones de acabado fino por la capacidad de alcanzar granos de tamaño micrométrico. Para producir tamaños micrométricos, la alúmina se muele con bolas o con vibración después de la trituración.

- Alúmina rosa. Se le añade óxido de cromo y TiO_2 consiguiendo un grano de tamaño medio más duro que la alúmina blanca.
- Alúmina roja. Tiene mayor contenido en óxido de cromo y mayor friabilidad que la alúmina rosa. Por sus ejes altamente afilados y su baja conducción térmica es empleada en operaciones de rectificado en seco.

Otro aspecto importante, además de la pureza de los granos de alúmina, es su tipo de estructura cristalina, que influye en el tamaño de grano y en su comportamiento frente a la fractura [1]. Los enlaces entre los átomos de los cristales cerámicos son por lo general covalentes o iónicos. Estos enlaces son mucho más fuertes que los metálicos. En consecuencia, las propiedades como la dureza o resistencia térmica son significativamente más elevadas. Han emergido métodos alternativos de producción debido a la limitación de la electrofusión para crear estructuras cristalinas más pequeñas. En función del tipo de estructura cristalina cada grano tendrá un número interno de cristales:

- Estructura convencional. Los granos están compuestos por tres o cuatro cristales. Son menos duros y resistentes a la presión, pero arrancan material de forma más brusca debido a su menor friabilidad. Su color y dureza varía en función de las proporciones de impurezas como NiO_2 o CrO que se añadan. Se utiliza como base para la mayoría de las muelas de alúmina, aunque estas sean SG o monocristal en su conjunto. Así mejoran las propiedades mecánicas de las muelas. Su uso está muy extendido, generalmente en las aplicaciones de rectificado de aceros.
- Estructura monocristalina. Cada grano consta de un único cristal con filos de alta capacidad de corte. Se obtiene mediante un proceso de fusión y cristalización controlado en los que se añaden sulfuro de hierro y compuestos alcalinos para conseguir un material puro. Este material es mucho más puro que los granos convencionales ya que sólo contiene pequeñas cantidades de impurezas de óxido, y tiene la gran ventaja de que los granos no son sometidos a grandes fuerzas debida a la trituración antes de ser utilizados en una muela [15]. Se utiliza en aplicaciones con requerimientos de alta precisión dimensional o en piezas de acero de alta aleación.
- Estructura microcristalina. Cada grano está compuesto por miles de microcristales de aproximadamente $0.2 \mu m$ de tamaño. Se obtiene mediante un proceso de sinterizado de una pasta fina de bauxita calcinada posteriormente granulada o picada. Destaca por su capacidad de autoafilado: la fractura se da en las fronteras de los microcristales, que al liberarse dejan disponible una nueva superficie del grano con aristas afiladas. Su tamaño puede ser controlado en la operación de granulado. Se utilizan en operaciones de altas tasas de arranque de material como el creep [14].

Tabla 2: Propiedades de la alúmina según su estructura

	Dureza (Gpa)	Índice de friabilidad	Tensión última de rotura (Mpa)	Modulo de Young (Gpa)
Convencional 	20 - 22.2	56.6	1400	279
Monocristal 	22.4	47.7	2100	386
Microcristal 	6.5 - 11	19 - 13.4	1770	350

Los granos de estructura microcristalina o alúmina sinterizada fueron desarrollados por la compañía Norton en 1986 y su comportamiento durante la operación de rectificado ha sido ampliamente estudiado [12]. Actualmente se utilizan añadiendo un porcentaje a muelas con base de alúmina convencional consiguiendo aumentar su vida útil hasta en un 10% con respecto a las muelas convencionales, aunque los costes de las herramientas son también mayores.

4.2.2.2 Material aglomerante

El aglomerante utilizado en una muela tiene varias funciones: retener los granos abrasivos durante el proceso, evitando pérdidas prematuras de grano, desgastarse a un ritmo controlado con respecto al desgaste del grano permitiendo liberar granos desafilados, resistir las fuerzas centrífugas, especialmente en el caso de la alta velocidad rectificado y exponer fácilmente los ejes de corte de los granos permitiendo su trabajo [1]. Para aprovechar al máximo las capacidades operativas de granos abrasivos, es fundamental el uso de un material aglutinante que posea de las propiedades adecuadas para cada aplicación.

La creación de enlaces entre granos abrasivos y un aglutinante resulta de la interacción fisicoquímica en un proceso de tratamiento térmico, donde se sinteriza el aglomerante en un rango de temperaturas de entre 800–1200 °C, formándose una fina capa que recubre los granos y forma puentes entre ellos que los unen [16].

Existen tres tipos principales de materiales aglomerantes, los vítreos, resinoides y metálicos. El aglomerante vítreo es considerado uno de los más empleados ya que, debido a la posibilidad de controlar la porosidad y la estructura de la muela, permiten ajustar con mayor precisión la resistencia de las muelas y eliminar más fácilmente el producto abrasivo [16], [17]. La flexibilidad del sistema de aglomerado vítreo permite acondicionar la topografía de este tipo de muelas para conseguir una amplia gama de tasas de arranque de metal y características de acabado superficial. Además, en comparación con los otros tipos de aglomerado, los vitrificados facilitan el reavivado de la muela. Por ello, los desarrollos en la unión del abrasivo cerámico se han acelerado en los últimos años, especialmente en las muelas de CBN por sus numerosas ventajas [5]. Por otro lado, los aglomerantes resinoides se componen de resinas termoestables. Su estructura es densa y habitualmente reaccionan químicamente con algunas taladrinas. Son más flexibles y menos porosos que los ligantes vítreos. Finalmente, los aglomerantes metálicos se combinan a altas presiones y temperaturas con superabrasivos como el diamante o CBN. Tienen una gran capacidad de retención de grano.

Aunque la elección de un aglutinante adecuado es determinante, sus propiedades no son tan estudiadas como las del material abrasivo. Algunos autores estudian cómo crear nuevas fases en los aglomerantes vítreos a través de ajustes en su cocción [16]. Si se realiza un proceso controlado se pueden conseguir ligantes que combinen fases amorfas-cristalinas de forma que se comporte de forma similar que la alúmina sinterizada frente al desgaste. Con este tipo de estructuras mixtas se consigue llevar un control más preciso de la capacidad de corte durante la operación de rectificado.

4.3 Fabricación de las muelas vitrificadas

Para la fabricación de las muelas se realizan los siguientes pasos de acuerdo con la Figura 4:

1. Tanto el aglomerante vítreo en polvo como los granos de abrasivo se pasan a través de un tamiz estandarizado.
2. Las proporciones de material aglomerante y abrasivo son pesadas y posteriormente mezcladas.
3. Una prensa aplica presión a la mezcla previamente depositada en un molde en forma de disco.
4. La muela “en verde” se introduce en un horno donde se somete a una curva de sinterizado.

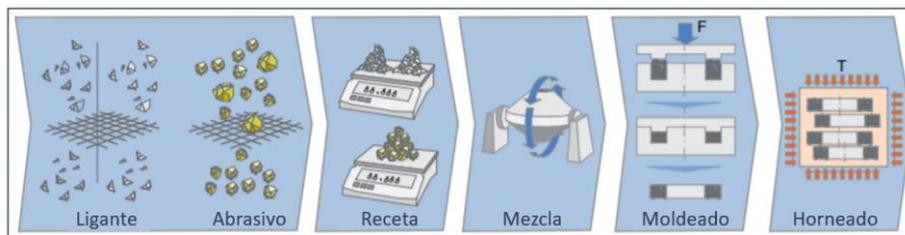


Figura 4: Fases en la fabricación de muelas abrasivas vitrificadas [1]

Habitualmente se dota a las muelas de la geometría con un perfilado final y un equilibrado que garantice una rápida puesta a punto en máquina.

4.3.1 Fabricación del grano de alúmina

Los minerales abrasivos empleados hoy en día son generalmente de origen sintético. Están definidos según su forma, tamaño, estructura, y sus propiedades mecánicas.

La alúmina monocristalina se fabrica a partir de bauxitas calcinadas, en horno de arco eléctrico. El proceso Bayer es el principal método industrial para producir alúmina a partir de bauxita. La bauxita es una mezcla de hidróxidos de aluminio (solo contiene entre un 30 y 54% de Al_2O_3) con otros minerales como arcillas, sílice, cuarzo libre, hidróxidos y óxidos de hierro. En el proceso Bayer, la bauxita es primero triturada y luego lavada con una solución caliente de hidróxido sódico (sosa), $NaOH$. La sosa disuelve los minerales de aluminio dejando como residuo sólido la mayoría de las impurezas que acompañan a la bauxita. La temperatura de la digestión se escoge en función de la composición de la bauxita. Tras retirar las impurezas sólidas mediante un proceso de decantación y filtrado, la solución se precipita de forma controlada para formar hidróxido de aluminio puro. Para favorecer la cristalización del grano, se somete a la solución a un

proceso de enfriamiento controlado, formándose bloques a los que se les puede añadir partículas de hidróxido de aluminio. Estos bloques preparados se someten a temperaturas en torno a 2100 °C en presencia de algún reductor y fundente. Finalmente, estos bloques se someten a un proceso de triturado y cribado. Este procedimiento se realiza bajo norma estándar Fepa. El tipo de estructura cristalina del grano de alúmina dependerá del grado de reducción de los óxidos que acompañan a la bauxita (Fe₂O₃, SiO₂, TiO₂, etc.), es decir, de la pureza de la alúmina y del grado de control del proceso de enfriado. Esto supone la variación de la viscosidad del grano y su dureza.

4.4 Tipos de desgaste

El desgaste de la herramienta supone una parte significativa de los costes de la operación de rectificado [15]. La vida de la muela está directamente relacionada con su desgaste. Por ello, la minimización del desgaste y sus efectos en el proceso son aspectos ampliamente estudiados.

Se puede hacer una clasificación del desgaste en función de la escala geométrica a la que afecta: a escala micrométrica, cuando se pierde la capacidad de corte de los granos abrasivos, o a escala macrométrica, cuando la muela pierde su geometría y forma. Ambos fenómenos pueden conllevar importantes deficiencias como el aumento de la potencia consumida por la máquina, el incumplimiento de las tolerancias y acabados de diseño, daño térmico o quemado o la disminución de los intervalos entre operaciones de diamantado, aparte del valor económico que supone el desgaste de la propia herramienta. En la Figura 5 se muestra los factores que intervienen en el desgaste a macro y micro escala (inputs) y los defectos que pueden ocasionar (outputs).

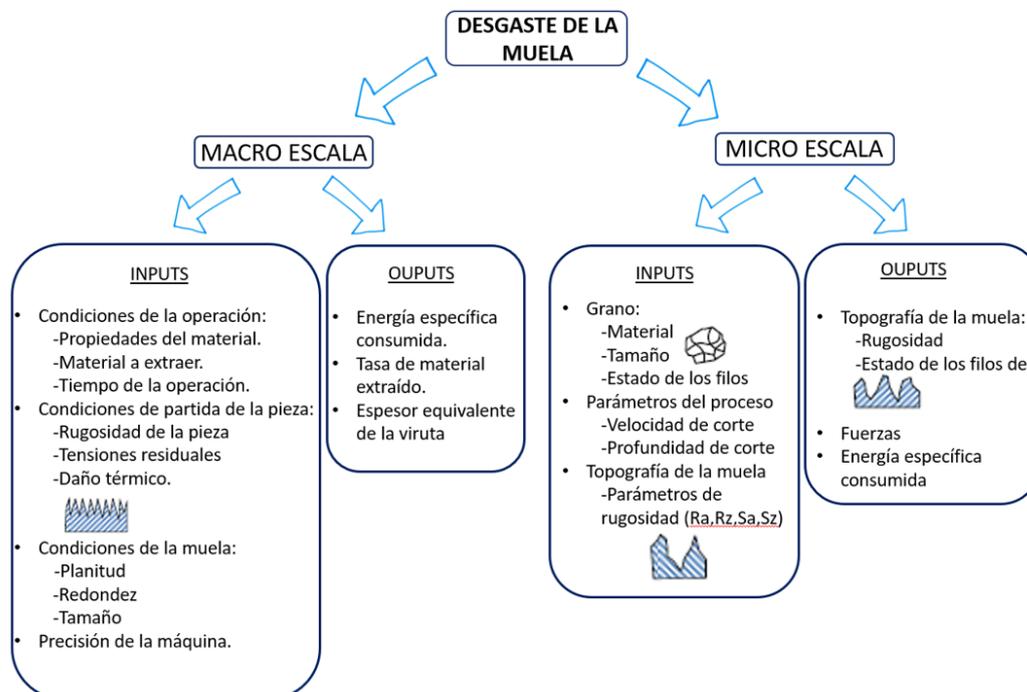


Figura 5: Inputs y outputs en los desgaste a macroescala y microescala [2].

Los fenómenos de desgaste más importantes de los componentes de la muela se producen en la zona de contacto entre la herramienta y el material de la pieza y pueden

deberse al efecto causado por la carga de choque con la pieza, a la fatiga por la repetición cíclica de esta carga y a la fatiga térmica debida a las altas temperaturas que se alcanzan en la zona de contacto. En consecuencia, las fuerzas de rectificado, la energía específica de rectificado, el acabado superficial de la pieza y la vida útil de la muela se ven afectadas. El comportamiento del rectificado sólo puede explicarse en términos de la naturaleza del contacto del grano y los efectos del desgaste.

Existen cuatro tipos de desgaste micrométrico que se ilustran en la Figura 6: fractura del grano, fractura del aglomerante, wear flat o la generación de caras planas del grano y embotamiento de viruta [13].

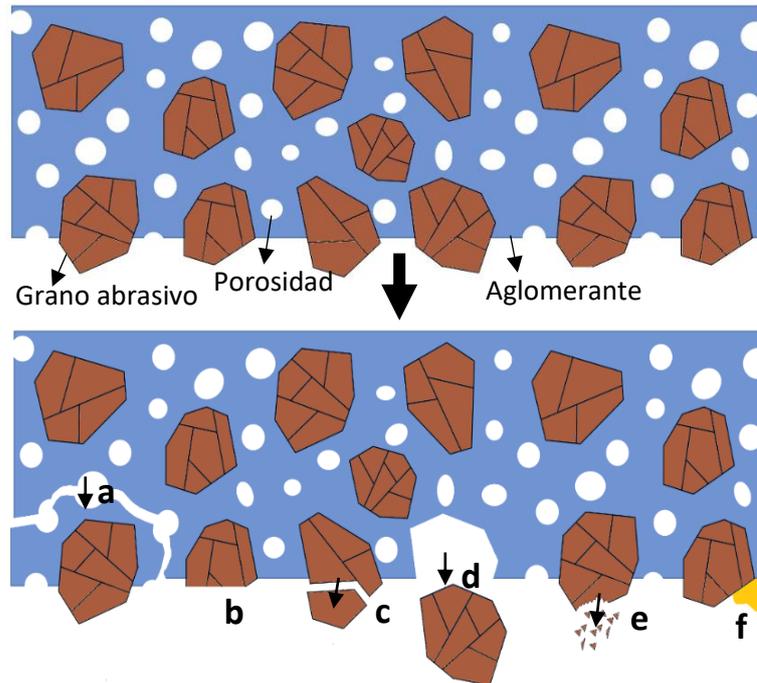


Figura 6: Fenómenos de desgaste: a) fractura del vítreo; b) wear flat; c) macrofractura del grano; d) desprendimiento del grano; e) microfractura del grano; f) embotamiento de viruta.

La fractura parcial de un grano o el astillado de los filos se produce por las tensiones térmicas y mecánicas a las que llega a estar sometido durante la operación. Si se estudia un grano de forma aislada, este está sometido ciclos muy rápidos de a altas tensiones térmicas y mecánicas, que provocan la formación de microgrietas que se propagan a través de las fronteras de su estructura cristalográfica. Aunque a simple vista pueda parecer un inconveniente, la fragilidad de los granos de abrasivo se aprovecha para evitar altas temperaturas en la cara de desgaste de estos. Lo ideal es que el grano se fracture a una velocidad moderada, de manera que se produzcan continuamente nuevas aristas afiladas de corte (microfractura o autoafilado) [8].

La fractura de una fracción del aglomerante puede suponer consigo la pérdida de un grano abrasivo al que estaba unido. Si las fuerzas que sufren los granos durante el proceso son mayores que la fuerza de retención o agarre que el aglomerante ejerce sobre la superficie de los granos, se puede dar un fallo de adhesión. Esto se puede deber a que la exposición del grano sea excesiva o a que el tipo de aglomerante no sea el adecuado para la operación. Que la fractura del aglomerante esté controlada, de forma que permita emerger una nueva capa de granos (regular en toda la superficie de

la muela), cuando la anterior se encuentra desgastada, es el caso óptimo. De forma general, se recomienda emplear aglomerantes más blandos en los materiales más duros, ya que permiten reducir los esfuerzos residuales y el daño térmico en la pieza de trabajo. Las herramientas más duras, se suelen utilizar en materiales más blandos para poder retirar grandes cantidades de material a altas velocidades.

La generación de caras planas en los granos aparece cuando la tendencia de desgaste es mayor en los granos abrasivos que en el aglomerante. Consiste en el desafilamiento de las aristas de corte de un grano, originalmente puntiagudas, por lo que se desarrolla una cara aplanada debido al rozamiento con la superficie de la pieza [18]. Este fenómeno puede conducir a una excesiva generación de calor por el contacto de la superficie adicional. Supone un aumento de las fuerzas de rectificado y la obtención de piezas con marcas superficiales y posibles daños térmicos. Un parámetro con el que se puede medir el desgaste por wear flat es la medición de área de caras planas.

El embotamiento de la muela se da cuando parte de la viruta generada durante la operación se aloja en las cavidades o poros de la superficie de la muela. Este fenómeno produce los mismos efectos que la pérdida de filo de los granos. Se puede evitar con la correcta aplicación del fluido de trabajo que asegure la limpieza de la superficie de contacto entre el disco y la pieza [15].

Un parámetro muy empleado para controlar el rendimiento frente al desgaste volumétrico de la muela abrasiva es la relación de rectificado. Establece la relación entre el volumen de material de pieza que se ha extraído respecto al volumen de muela que se ha desgastado:

$$G = \frac{V_w}{V_s} \quad \text{Ec. 1}$$

Este índice permite comparar el desgaste volumétrico en muelas utilizadas en distintas operaciones, pero la disminución del volumen de la herramienta solo puede deberse a dos tipos de desgaste: la fractura de aglomerante y la fractura del grano. El desgaste por generación de caras planas, o el embotamiento de la viruta no pueden ser detectados a través de esta relación.

El desgaste se puede predecir a través de la medición de las fuerzas y la potencia consumida durante la operación [4], pero la identificación del tipo de desgaste causante o predominante es dificultosa: pueden coexistir distintos tipos de desgaste, en los desechos de la operación se mezclan el material perdido de la muela con la viruta, el desgaste se da a escala micrométrica, etc.

Distintos investigadores tratan de identificar el tipo de desgaste predominante mediante distintas técnicas. En [19] tratan de recoger información acerca de los mecanismos de desgaste separando y retirando las partículas metálicas de los residuos del rectificado. A partir de ello se realiza un estudio del peso y la distribución de tamaño de las partículas que provienen de la muela. La distribución de tamaños se puede comparar con el tamaño original del grano, en caso de ser menor puede indicar fractura del grano, si es similar puede significar que se ha desprendido por un fallo de adhesión del aglomerante y si es superior puede suponer el embotamiento o adhesión de material. Con esta

metodología no se podría identificar generación de caras planas o pérdida excesiva de los filos de corte de los granos. En [20] realizan la instalación, en la propia rectificadora, de una cámara de alta resolución para tomar imágenes digitales cada x número de ciclos. Estas imágenes son procesadas para medir el área de las caras planas de los granos y con ello predecir el wear flat. Otros autores [17] relacionan el fallo predominante en muelas de alúmina vitrificada en función de la tasa de eliminación de material. Para tasas bajas predomina la generación de caras planas y adherencia de material mientras que para tasas altas los fenómenos predominantes son la fractura de grano y aglomerante.

4.5 Influencia del diseño de las muelas en el desgaste

La denominación de las muelas está normalizada con un sistema estandarizado de letras y números que indican el tipo de abrasivo, tamaño de grano, grado de dureza, tipo de estructura y tipo de aglutinante. En la Figura 7 se muestra el sistema para muelas convencionales.

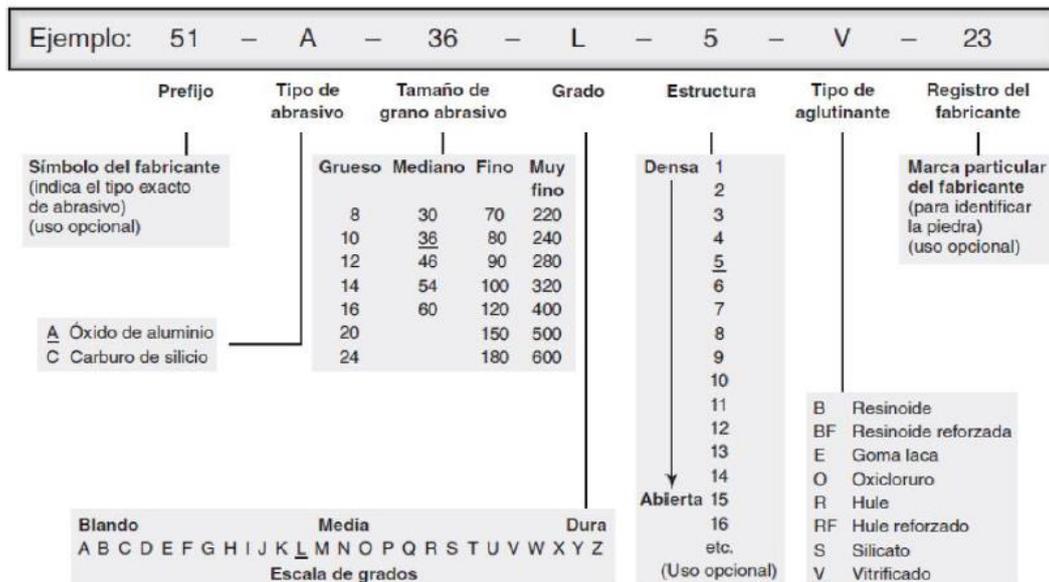


Figura 7: Sistema estándar para la denominación de muelas convencionales [8]

El desgaste de las muelas es un proceso complejo que puede estar asociado a eventos individuales de desgaste que se combinan. Diversas investigaciones han identificado la relación entre los mecanismos de desgaste individuales predominantes en función de diversos factores del diseño de las muelas [9], [13]. En los siguientes subapartados se expone la manera en la que puede afectar cada uno de estos parámetros de diseño en su comportamiento durante la operación. En función de cómo se seleccionan estas variables y como se definen los parámetros del proceso, predominarán un tipo de desgaste sobre los demás.

4.5.1 Grado de la muela

Se utilizan diferentes materiales de unión según el uso previsto de la muela abrasiva que se clasifican por su resistencia individual, denominada grado de la muela [16]. Si el grado de la muela es bajo, esto quiere decir que los granos se desprenden fácilmente y

ésta se desgasta rápidamente. A su vez, esto supone la aparición de granos nuevos cuyos filos de corte no han sido desgastados, sin que haya sido realizada una operación de diamantado. En cambio, si el grado de la muela es alto, los granos están fuertemente sujetos y el desgaste volumétrico de la muela es menor aumentando, así la vida útil de la herramienta. Por otro lado, estos granos se desgastan en mayor medida, perdiendo su capacidad de corte, lo que puede ocasionar el quemado de la pieza si no se diamanta con la frecuencia adecuada.

4.5.2 Estructura de la muela

El tipo de estructura de la muela depende de la concentración de aglutinante/abrasivo [13]. El porcentaje de material aglomerante influye en aspectos como [21]:

- Espesor de recubrimiento sobre los granos
- Radio de los puentes de aglomerante que conectan los granos.
- Longitud media de los puentes. Es decir, cómo de separados se encuentran los granos.

Una mayor proporción de material aglomerante supone un aumento de estos parámetros, lo que asegura o fija en mayor medida a los granos. Cuando se produce la rotura de un puente de unión entre dos granos en una muela con concentración alta de aglomerante, el área que deja es mayor, lo que implica un incremento de las rugosidades de la operación. Por otro lado, este aspecto también permite obtener altos niveles de material extraído por pasada. En una muela abierta los granos abrasivos están más expuestos, por lo que son capaces de cortar más profundamente la pieza. Están sometidos a altas tensiones, siendo mayor el peligro de fractura del propio grano.

En las muelas con estructuras más cerradas las rugosidades de la superficie de pieza que se pueden alcanzar son menores, pero la fricción que se genera en el contacto muela-pieza es mayor y en consecuencia el peligro de dañar térmicamente la superficie de la pieza. En este caso la altura de exposición de los granos es baja y no pueden penetrar en la superficie, por lo que rozan muy ligeramente la pieza provocando un leve desgaste en ella, apenas perceptible. Su desgaste principal es la generación de caras planas. La porosidad de una muela depende de cómo de abierta sea. La porosidad es necesaria para evacuar el calor generado durante el proceso, permitir el transporte de fluidos y dar espacio para la formación de virutas [9]. En la Figura 8 se muestra como el nivel de apertura de la muela aumenta con el tamaño y porcentaje de volumen de los poros.

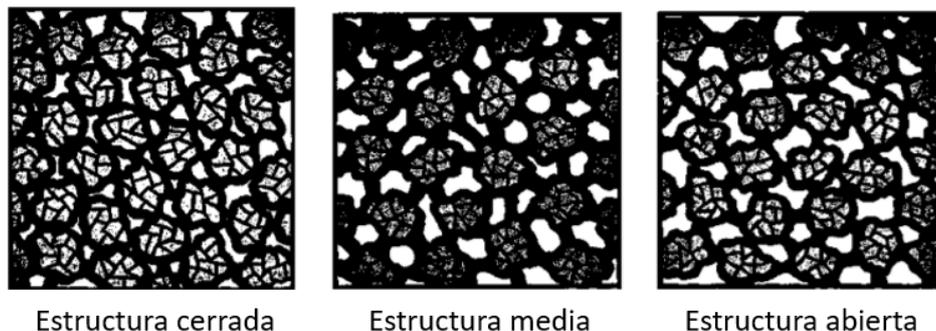


Figura 8: Tipos de estructura de las muelas de rectificado [1]

4.5.3 Tamaño de grano

La selección del tamaño y tipo de grano también influye en el comportamiento de la muela frente al desgaste. En función del tipo de grano y de su estructura la friabilidad puede variar, es decir, la tendencia de un grano a fracturarse bajo compresión. Una alta friabilidad lleva implícito una baja resistencia a la fractura [15]. Por lo tanto, cuanto más friable sea un abrasivo, más rápidamente se fragmenta ante las fuerzas de la operación y es capaz de generar nuevos bordes afilados sin una operación de diamantado, lo que se conoce como autoafilado. Por otro lado, esto puede suponer un aumento del desgaste volumétrico de la muela y la reducción de la vida de la herramienta abrasiva. La dureza de un grano no siempre implica un desgaste bajo de la muela. Si su dureza es excesiva para una aplicación puede producir un aumento de la fricción, creando calor y vibraciones. La fractura del grano abrasivo depende fuertemente de su tipo de estructura cristalina; los granos convencionales tienen una alta friabilidad y por tanto una baja resistencia a la fractura. En cambio, en los granos microcristalinos la resistencia a la fractura es mayor. Esto se debe a que el gran número de fronteras intergranulares ayuda a frenar la propagación de la grieta. Por otro lado, en los granos con estructura monocristalina no puede ocasionarse fractura al carácter de fronteras intergranulares.

4.5.4 Material aglomerante

La resistencia del aglomerante no solo define la capacidad de retención de los granos abrasivos según la fuerza de adherencia que ejerce sobre la superficie de los granos. La fractura del aglomerante también está directamente relacionada con su microestructura y composición de fases. El aumento del número de fases aumenta la capacidad del material para fracturarse en micro fragmentos. Esto puede producir un aumento en el desgaste y la rugosidad de la pieza, pero también una mayor tasa de arranque de material [16], [21].

Por lo tanto, el tipo de estructura de la muela, su grado de dureza, el tipo de grano y su capacidad abrasiva definen dos factores fundamentales del proceso de rectificado; el cumplimiento de las especificaciones de diseño de la pieza (tolerancias geométricas, dimensionales y superficiales) y la cantidad de muela consumida que esto supone.

4.6 Modelización del proceso de rectificado.

La modelización y simulación de los fenómenos resultantes del contacto entre muela y pieza resulta una tarea compleja. Esto se debe principalmente a la naturaleza de la muela abrasiva, comprendida por infinidad de granos de tamaño y forma variable dispuestos de manera aleatoria, además de la porosidad, también de carácter variable. A ello se le suma la dependencia entre los parámetros que se pretenden estudiar en los modelos y que varían con el tiempo como se ilustra en la Figura 9. Existen interrelaciones entre aspectos que influyen continuamente entre sí como la calidad superficial de la pieza, fuerzas y temperaturas generadas, energía específica consumidas, y el desgaste de la muela.

Un modelo consiste en una representación abstracta y habitualmente simplificada de un proceso. El modelo pretende establecer un vínculo entre causa y efecto y busca establecer una relación entre las entradas y salidas del fenómeno que se pretende

estudiar. Con ello lo que se busca es prever los posibles efectos ante cambios en el proceso de mecanizado. La simulación es una imitación del proceso durante cortos periodos de tiempo. Los modelos contribuyen significativamente a la comprensión del proceso en sí, y constituyen la base para la simulación de los procesos de rectificado. Existen diferentes enfoques de las prácticas de modelado del rectificado, incluyendo los empíricos, analíticos, de dinámica molecular y los análisis de EF [3].

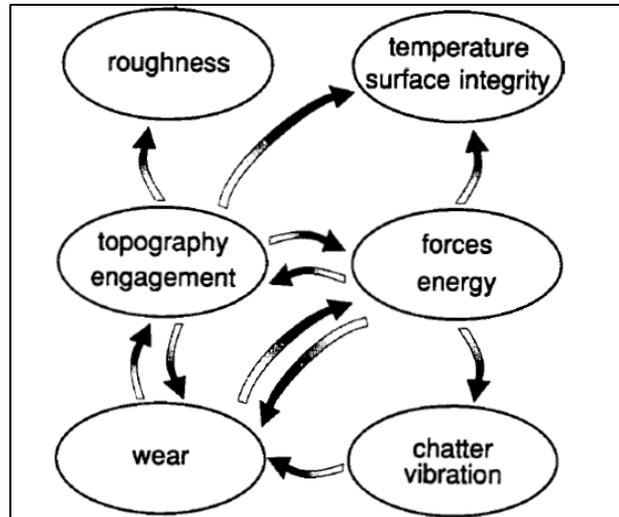


Figura 9: Posibles modelos y sus interrelaciones [27].

Los modelos se pueden clasificar en función de su dimensión que depende del fenómeno que se pretenda tratar: los modelos a macroescala consideran la interacción general entre la muela y la pieza de trabajo, mientras que los modelos a microescala se centran en las interacciones individuales entre el grano y la pieza de trabajo.

Los modelos a macroescala pretenden estudiar los efectos que genera la muela abrasiva sobre la pieza sin describir de forma detallada de la superficie de la herramienta, es decir, considerándola como un único elemento sólido. El objetivo de estos modelos generalmente es predecir la temperatura y/o las tensiones producidas en la pieza por la muela completa durante el proceso de rectificado. Los macromodelos térmicos 2D de EF permiten predecir aspectos como la aparición de la fase de martensita (quemado de la pieza) y su profundidad en el rectificado de piezas de aleaciones de acero, determinar la distribución de temperaturas en la pieza rectificada, o calcular la desviación de forma longitudinal de la pieza después del rectificado [3]. Uno de los aspectos más estudiados recientemente en macromodelos bidimensionales de EF es la verificación de la longitud de contacto real entre superficie y muela que define el contacto con la fuente de calor, y la presión aplicada [28].

Los modelos a microescala consideran la interacción entre el grano y la pieza, principalmente en una sección reducida de la pieza y un grano en contacto permitiendo simular el proceso real en detalle cómo se ilustra en la Figura 10. Se utilizan para estudiar el contacto entre grano y pieza.

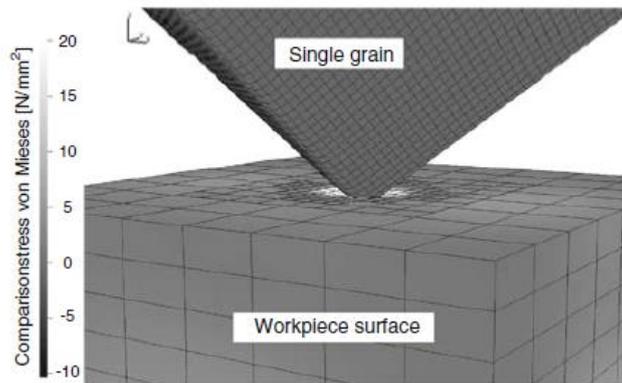


Figura 10: Simulación de las tensiones por contacto en micromodelo [25].

La ventaja de los modelos micro es que las aristas de corte de granos individuales pueden ser comparadas antes y después del proceso, y su geometría es conocida. En [25] realizan la simulación de la evolución de la fractura de un grano individual, utilizando distintas geometrías, al impactar con el diamantador. Un aspecto muy estudiado en estos micromodelos es la simulación de la formación ideal de la viruta durante la penetración de los granos para obtener la relación entre su sección y las fuerzas a las que se someten individualmente. Además, jugando con distintas geometrías se pueden predecir la calidad superficial de la pieza obtenida [24].

4.6.1 Geometría de los modelos

El modelado de la operación de rectificado requiere la consideración de la superficie de la muela. El control de la geometría de los granos abrasivos individuales, que están distribuidos y orientados de forma aleatoria en la superficie de la muela, conduce a una mejor comprensión del proceso rectificado y diamantado. Normalmente, hay dos estrategias para obtener la geometría superficial de una muela: escanear la superficie real de una muela usando microscopios confocales y modelar geoméricamente la topografía. Además, existen dos tipos principales de modelos topográficos: empíricos y físicos. Los modelos empíricos utilizan parámetros estadísticos o experimentales que suponen poco gasto computacional. Por el contrario, los modelos físicos utilizan parámetros que son independientes de la aplicación.

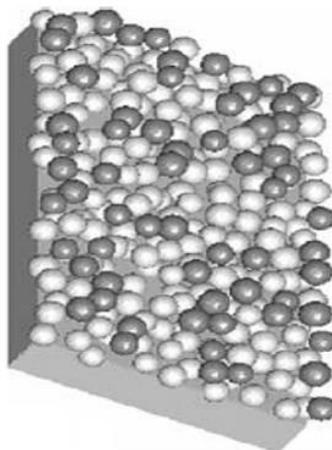


Figura 11: Topografía de un modelo 3D de muela con geometría esférica de granos abrasivos [11].

Son ampliamente utilizados los modelos bidimensionales para el modelado, asumiendo la representación geometría de los granos basándose en formas geométricas más simples como en la Figura 11.

En estos modelos se tienen en cuenta además la distribución del grano en la superficie de la muela, su colocación y la altura de exposición de los granos. En [10] se realiza el modelado de la herramienta suponiendo esférica la geometría de los granos, espaciados aleatoriamente en el volumen de la muela para simular el efecto del diamantado. Otros autores [11], [24], también utilizan esferas para modelizar la geometría de los granos debido a que, desde el punto de vista de la modelización hace que el problema sea manejable puesto que únicamente depende de un parámetro (el diámetro) y la orientación no influye. Justifican esta simplificación teniendo en cuenta que los granos abrasivos presentan ángulos de inclinación muy negativos con respecto al trabajo. Otros autores basan la geometría de los granos en otras formas geométricas como pentágonos [22], pirámides [23], octaedros [24], conos, elipses [4] e incluso combinaciones de elementos esféricos y octaédricos en modelos tridimensionales para acercarse lo más posible a la geometría real, asumiendo el coste que ello supone [25].

De acuerdo con lo anterior, para contrarrestar el alto coste que supone la simulación del modelo del proyecto, este se realizará en 2D, simulando los granos a partir de geometrías circulares cuyo tamaño se define en base a parámetros estadísticos.

4.6.2 Modelización del desgaste

El desgaste se suele estudiar en base a la medición de consumo de energía o variación del volumen de la muela, pero con esto no se alcanza a conocer con profundidad cómo se produce el desgaste entre muchos granos individuales y la pieza de trabajo o qué tipos de fenómenos de desgaste actúan de forma simultánea y cómo identificarlos.

Aunque la mayoría de los modelos de desgaste encontrados tienen un enfoque analítico basándose en formulaciones matemáticas de leyes físicas básicas, algunos autores sí que han desarrollado micro modelos 2D de EF para simular la evolución del desgaste en modelos micro o de único grano. Esto se debe a la complejidad de simular la superficie de la muela que cambia con el tiempo, cambiando así las condiciones de contacto. En este sentido, en [22] se realiza un modelo de EF que estudia el contacto de un único grano suponiendo una geometría de un pentágono. La simulación analiza el comportamiento mecánico del grano bajo los esfuerzos de flexión ocasionados por las fuerzas tangenciales a distintas alturas de exposición del grano como se muestran en la Figura 12 Con ello pudieron estudiar cómo afecta el tamaño de grano, su altura de exposición y sobre todo la fuerte influencia de la fuerza de adherencia del aglomerante metálico en la fractura del grano.

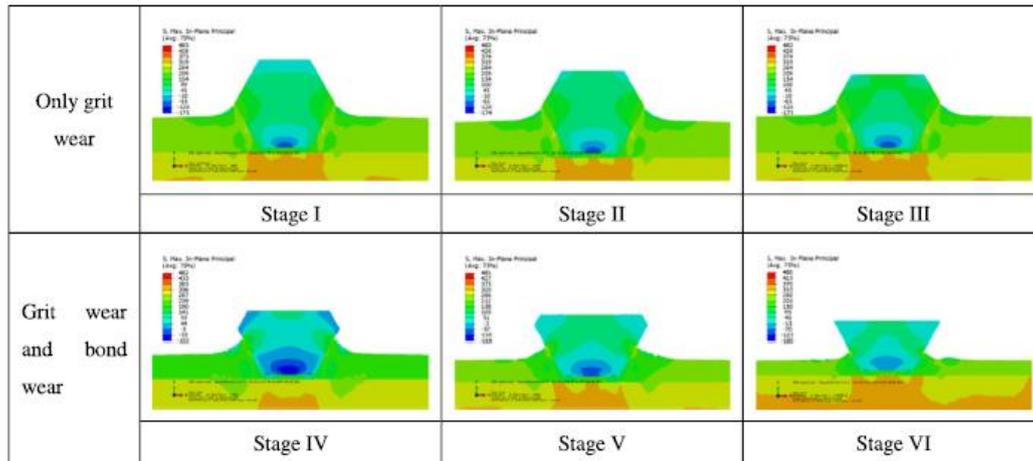


Figura 12: Evolución del desgaste en un modelo de único grano a distintas alturas de exposición [26]

Otros autores [23] realizan un modelo similar para analizar la fuerza de adherencia de la capa galvánica de muelas metálicas, que produce la pérdida del grano (grain pull-out). Por los resultados de la simulación establecen una correlación entre fuerza de adhesión con el grosor de la capa de aglomerante que embebe el grano y su orientación.

4.7 Comportamiento mecánico de los materiales frágiles

Las muelas abrasivas pueden ser consideradas como un material compuesto de dos materiales cerámicos. Los granos abrasivos con estructura monocristalina o policristalina, permiten dislocaciones entre los enlaces atómicos, pero en un grado mucho más restringido que los materiales dúctiles [15]. El aglomerante vítreo, con estructura amorfa, impide la existencia de dislocaciones por lo que tiene un comportamiento no dúctil hasta que alcanza la rotura. Además, las muelas abrasivas presentan un volumen de poros considerable que influye negativamente la resistencia del material. Reducen la sección útil de la muela y se comportan como defectos estructurales, pero son necesarios para contribuir a la refrigeración de la herramienta. Tanto la fracción de poros como su tamaño son factores que influyen fuertemente en el comportamiento mecánico de la muela. En base a esto, no está claro que las propiedades de la muela se ajusten a las de un material frágil.

El comportamiento mecánico de una cerámica bajo tensión se puede resumir en la deformación elástica y el fallo frágil. La deformación elástica se define por la recuperación completa e instantánea de la deformación, si la tensión se elimina. Muchas cerámicas, aunque no todas, son elásticas a temperatura ambiente.

Como se aprecia en la Figura 13, los materiales dúctiles alcanzan un estado de plastificación al sobrepasar la tensión elástica máxima llevando a un rápido aumento de las deformaciones sin necesidad de aumentar la carga. Los materiales frágiles fallan de forma instantánea al alcanzar la tensión máxima elástica. Por otro lado, los materiales cuasifrágiles tienen un comportamiento intermedio al de los materiales frágiles y dúctiles. Como se ilustra en la Figura 13, las deformaciones post-pico que se producen no son muy elevadas, al contrario que en los materiales dúctiles.

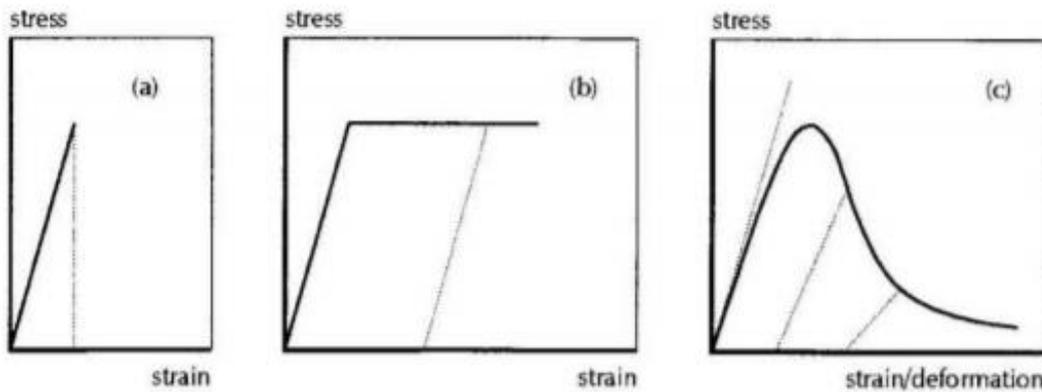


Figura 13: Curvas σ - ϵ para materiales frágiles (a), dúctiles (b) y cuasi-frágiles (c)

Las propiedades elásticas de los materiales cerámicos vienen definidas por *el módulo de Young (E), módulo de cizalla (G), módulo de rigidez (K) y el coeficiente de Poisson (ν)*. Estos parámetros están relacionados entre sí según las expresiones:

$$\nu = \frac{E}{2G} - 1 \quad \text{Ec. 2}$$

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

En estos materiales a temperatura ambiente se verifica la ley de Hooke, es decir, existe una dependencia lineal entre la tensión aplicada y la deformación hasta el momento en que se produce la fractura. Además, muestran grandes diferencias entre la resistencia a tracción y a compresión, siendo las de compresión alrededor de 5 a 10 veces las de tracción.

La teoría de Griffith manifiesta que la resistencia de los materiales frágiles depende esencialmente de los posibles defectos estructurales presentes en el material como poros o microgrietas y no tanto de las fuerzas de unión interatómica. Las grietas introducen fuertes concentraciones de tensiones en sus extremos en los materiales elásticos y frágiles. Debido a esto, la resistencia real de los materiales frágiles es inferior a la que teóricamente se predice.

La caracterización de los materiales cuasifrágiles se dirige a materiales como el hormigón o rocas y es estudiada en sectores como la construcción [26]. La composición de este tipo de materiales podría tener un carácter similar al de las muelas convencionales vitrificadas. Estos materiales rompen por la propagación de un conjunto de microfisuras que confluyen en una grieta por la que acaban fallando. En la Figura 14 se ilustran las tres fases que se dan en un ensayo a tracción pura de un material cuasifrágil. La fase pre-pico está dividida en dos zonas, en la primera (O-A) se da un comportamiento elástico mientras que en la segunda (A-B) comienzan a formarse las microgrietas que producen un endurecimiento por fractura. En la tercera zona o zona post-pico se produce un ablandamiento fuertemente no lineal hasta la fractura total. Los parámetros que definen su comportamiento son la tensión última de rotura σ_u , que limita la zona frágil previa al pico de tensión y la tenacidad a la fractura del primer modo K_{IC} .

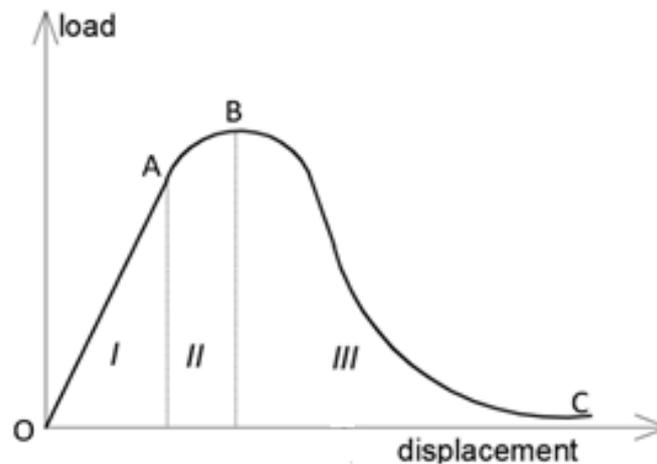


Figura 14: Curva σ - ϵ para un material cuasifragil sometido a tracción pura.

4.7.1 Caracterización del comportamiento mecánico de materiales vítreos

Las propiedades mecánicas de los materiales vítreos de forma aislada, sin formar parte de la muela abrasiva, no suelen ser muy estudiadas [27]. La naturaleza frágil de este tipo de materiales vítreo-cerámicos y la no homogeneidad de las probetas dificulta la realización y lectura de los ensayos de caracterización mecánica que son descritos en los siguientes subapartados. A estas trabas se le suma que la composición exacta puede variar ligeramente de una empresa a otra y la formulación no se divulga por razones de propiedad.

Los aglomerantes vítreos se forman a partir de mezclas de una arcilla, feldespatos y una frita o mezcla con alto contenido en Cuarzo y Boro, entre otros componentes, que se encarga de formar la fase vítrea. La composición varía en función de la naturaleza de la muela que se desea obtener. Estas mezclas se ablandan y funden en el rango de temperatura de 950 a 1400 °C [27]. Las mezclas más ricas en arcilla se funden a temperaturas más altas mientras que las que tienen un mayor porcentaje de frita se funden a temperaturas más bajas. Por lo tanto, es posible preparar mezclas con diferentes viscosidades y, por tanto, diferentes resistencias a la fractura a una temperatura determinada y así adaptar el aglomerado a la estructura requerida de la muela final.

Los aglomerantes vítreos comerciales suelen tener la composición $\text{Na}_2\text{O} - \text{K}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{B}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ [16], son relativamente menos pesados, con un bajo coeficiente de expansión térmica y buena resistencia a la fractura. Se pueden encontrar aplicaciones en componentes de motor y otras con uso a altas temperaturas. También se utiliza en herramientas de corte como las muelas de rectificado [34].

La composición de los aglomerantes es importante puesto que afecta a su resistencia. En función de la composición, el comportamiento del vítreo puede alterar las propiedades de la muela durante el proceso de fabricación. Uno de los parámetros sobre los que influye es en la viscosidad, que define el grado de impregnación o envoltura del aglomerante sobre la superficie de los granos abrasivos. Las características de fluidez de los aglomerantes vítreos han sido estudiadas por varios investigadores que han concluido en que la capacidad de mojabilidad del material aumenta la resistencia de la

muela [28]. Por ello los aglomerantes vítreos con un punto de fusión inferior son de mayor interés, puesto que aseguran la adhesión completa con el grano. Además, el aumento del porcentaje de caolín (presente en la arcilla) puede suponer un aumento de la tenacidad a la fractura. Otro aspecto estudiado es la estructura amorfa propia de los materiales vítreos. Recientemente se han desarrollado aglomerantes vítreos que combinan las estructuras amorfo-cristalina con los que se consigue mejorar la eficiencia de las muelas abrasivas frente al desgaste por su comportamiento similar al de la alúmina sinterizada (*micro-chipping*) [17]. Este tipo de estructura combinada se consigue mediante un proceso controlado de cristalización gracias al uso de los llamados de lo que se conoce como "agentes nucleantes".

Para la correcta realización de la simulación del modelo es fundamental conocer las propiedades mecánicas tanto de la alúmina como del material vítreo. Puesto que las propiedades mecánicas del aglomerante vítreo no son tan ampliamente estudiadas, en el presente proyecto se llevará a la realización de ensayos mecánicos para su determinación.

4.7.1.1 Métodos estáticos. Pruebas de flexión con carga en tres o cuatro puntos

El método estático más común para determinar las propiedades mecánicas de un material es el ensayo de tracción o compresión uniaxial en el que se mide la deformación de la muestra, mediante galgas extensométricas fijadas a la probeta. Para los materiales no dúctiles, los problemas experimentales asociados con los ensayos de tracción en particular han llevado a utilizar el ensayo de flexión, en el que se mide la flexión central real a través de la medición de desplazamiento lineal. Existen dos modelos del ensayo como se ilustra en la Figura 15; el ensayo de flexión a 3 puntos y el ensayo de flexión a 4 puntos [29]. Además de la tensión de rotura, el módulo de Young también puede calcularse a partir de los gráficos del desplazamiento frente a la carga aplicada, pero se recomienda la medición directa del desplazamiento.

La relativa sencillez de los ensayos de flexión y el bajo coste de las probetas requeridas han hecho que este ensayo sea muy popular en el sector cerámico, a pesar de varios inconvenientes en la interpretación de los datos resultantes. El cálculo se basa en la teoría de la viga simple en la que se asume que el material es isotrópico y homogéneo, los módulos de elasticidad en tensión y compresión son idénticos y el material es linealmente elástico. A menudo es preferible la realización del ensayo de flexión a 4 puntos frente a la variante de 3 puntos debido a que la región central sometida a la tensión máxima es mayor.

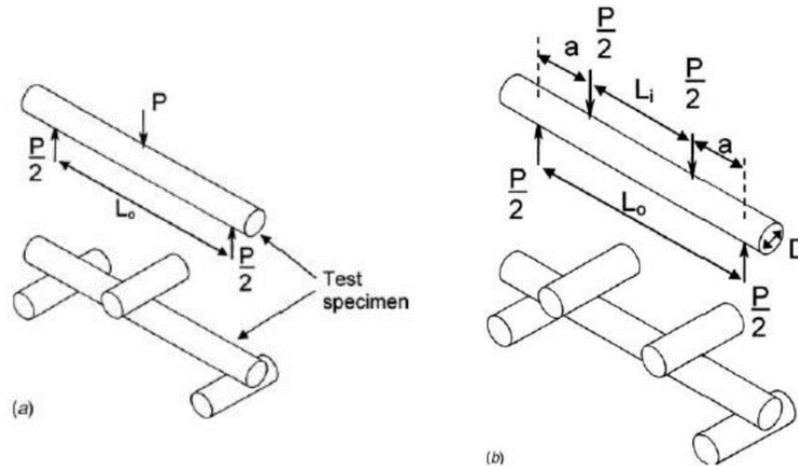


Figura 15: Configuración de los ensayos de flexión a 3 puntos (a) y a 4 puntos (b) [29]

La norma ASTM C1684 “Standard Test Method for Flexural Strength of Advanced Ceramics at Ambient Temperature—Cylindrical Rod Strength” establece las condiciones de los ensayos de flexión para materiales cerámicos avanzados, donde entran las cerámicas vítreas, con probetas de sección circular mecanizadas o cocidas. Con este ensayo se pueden determinar tanto la resistencia a flexión de los aglomerantes vítreos como su módulo elástico flexural. Par los dos modelos de ensayo se prescriben tanto las dimensiones y condiciones de las probetas a ensayar, el utillaje, los vanos y distancias entre puntos de apoyo y el procedimiento del ensayo. Se incluyen recomendaciones de los tamaños de probetas y utillaje, pero permite configuraciones alternativas dentro de los límites especificados. Siendo P la carga máxima aplicada, L la longitud del vano y D el diámetro de la probeta de sección circular, la resistencia a la flexión en el modelo de 3 puntos se puede obtener como:

$$\sigma = \frac{8PL}{\pi D^3} \quad \text{Ec. 4}$$

Los resultados pueden variar de un espécimen a otro por lo que se recomienda un mínimo de 10 especímenes ensayados. Por ello para describir la fractura en este tipo de materiales, se utiliza la función la distribución acumulada de Weibull. Refleja el grado de dispersión de la resistencia a la fractura obtenida durante los ensayos por lo que es un parámetro importante para la medición de la fiabilidad mecánica, especialmente materiales frágiles porosos. El módulo de Weibull (m) y la resistencia característica de Weibull (σ_0) se estiman siguiendo la norma ASTM C1239-07: “Standard Practice for Reporting Uniaxial Strength Data and Estimating Weibull Distribution Parameters for Advanced Ceramics”. El parámetro m describe la variabilidad de la resistencia del material medido en los materiales frágiles. A mayor valor, mayor es la homogeneidad en los resultados obtenidos y, por tanto, el fallo es más predecible. Dicha distribución está definida por la siguiente ecuación:

$$F = 1 - \exp - m \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right) \quad \text{Ec. 5}$$

En la aplicación práctica del ensayo de flexión en tres puntos pueden surgir varias fuentes de error, cuyo efecto acumulativo pueden llevar a valores de resistencia a la flexión que no se ajusten a la resistencia a la flexión real del material vítreo. En concreto, para las probetas de sección circular se toman las siguientes hipótesis [29]:

- La sección transversal de la probeta es perfectamente circular y uniforme a lo largo de su longitud.
- La probeta es perfectamente recta en toda su longitud.
- Los bordes del rodillo de carga no ejercen fricción sobre la superficie de la probeta.
- La línea de apoyo de la probeta es paralela a la superficie de apoyo de los rodillos inferiores. Es decir, la línea de carga y la línea de los soportes son totalmente paralelos.
- No hay perturbaciones del campo de tensiones en los apoyos y en la línea de carga ni en ningún otro lugar de la probeta debido a concentraciones de tensiones.
- La fractura se inicia en la cara inferior, es decir, en la cara de tracción de la probeta, en la posición media del vano directamente opuesta a la línea de carga.

4.7.1.2 Métodos dinámicos

Los métodos dinámicos empleados en la obtención del módulo de Young del material cerámico pueden dividirse en tres grupos dependiendo de las frecuencias alcanzadas: ensayos de baja frecuencia (0.2, 1000 Hz), media frecuencia (100 Hz ,5 MHz) y de alta frecuencia (1 MHz ,1 GHz).

Las técnicas más empleadas son las de media frecuencia, conocidas como métodos de resonancia dinámica. Mantienen una vibración forzada a tensión constante, pero de frecuencia variable en una probeta y se basan en el fenómeno de la onda estacionaria. Las técnicas de resonancia dinámica implican la excitación de modos de vibración longitudinales de flexión en una barra uniforme que puede estar suspendida, apoyada con extremos libres, o fijada en uno o ambos extremos.

Los modos longitudinales y de flexión están relacionados con el módulo de Young que puede ser determinado en la técnica de media frecuencia de forma proporcional al cuadrado de la frecuencia de resonancia.

La norma ASTM E1876 establece un ensayo estándar para la obtención del módulo elástico de materiales vítreos: *“Standard Test Method for Young’s Modulus, Shear Modulus, and Poisson’s Ratio for Glass and Glass-Ceramics by Resonance”*. En este ensayo la excitación de la probeta se realiza a través de un transductor que transforma una señal eléctrica inicial en una vibración mecánica. Otro transductor detecta las vibraciones mecánicas resultantes y las transforma en una señal eléctrica que es utilizada para detectar la resonancia. Conociendo la resonancia, la densidad y masa de la probeta se puede obtener el módulo de Young y el módulo de cizallamiento del material. Todos los materiales vítreo-cerámicos que sean elásticos, homogéneos e isotropos pueden analizarse mediante este método.

4.7.1.3 Ensayo de dureza Knoop

Existen varias técnicas de ensayo que pretenden medir la dureza de un material. El término dureza se entiende como resistencia a la deformación de un material, pero cada método de ensayo sólo define una resistencia a la deformación y la comparación de los valores de dureza obtenidos mediante ensayos diferentes deben evitarse.

Los ensayos de dureza más utilizados para cerámica son los ensayos Vickers, Knoop y Rockwel que miden la dureza de indentación o la resistencia a la deformación plástica, es decir, bajo una carga esencialmente estática. Para los materiales vítreo-cerámicos los indentadores Vickers son mucho más propensos a generar grietas que pueden dificultar su impresión y la posterior medición [30]. En cambio, los indentadores Knoop producen grietas de longitud más fácil de medir y con menor dispersión de tamaños. En este sentido, la norma ASTM C 730 "*Standard Test Method for Knoop Indentation Hardness of Glass*" establece una metodología para la realización de este ensayo en materiales vítreos. El ensayo consiste en presionar en una zona de la muestra con un indentador piramidal de diamante, con una fuerza conocida, durante un tiempo determinado. Las diagonales de la huella resultante se miden utilizando un microscopio. Se obtiene la dureza en términos de dureza Knoop (KHN) o HK que se define como la relación entre la carga aplicada y el área proyectada de la muesca [31].

A bajas cargas de indentación, surgen problemas por la dependencia entre la carga y dureza obtenida y por la alta incertidumbre de la medición debido al pequeño tamaño de la indentación. Por otro lado, con cargas más altas pueden surgir grietas que dificultan la determinación de la zona en la que termina la punta del indentador. Por ello es preferible hacer las indentaciones tan grandes como sea posible para reducir las incertidumbres de la medición, pero no tan grandes como para tener un agrietamiento excesivo que puede interferir con la medición. Dado que la dureza depende en gran medida de la carga de indentación, la carga aplicada siempre debe acompañar siempre al resultado de la dureza HK.

4.7.2 Caracterización de materiales cuasifrágiles.

Las cerámicas porosas, que entran dentro del grupo de materiales cuasifrágiles, tienen un nivel de porosidad entre el 20 y 95% [32]. Como se ha indicado anteriormente, este tipo de materiales tienen similitudes con las muelas convencionales vitrificadas. En concreto, la muela que se pretende estudiar en este trabajo tiene un 47% de porosidad por lo que podría entrar dentro de este grupo.

La porosidad muestra un impacto significativo en la resistencia a la fractura [33], mientras que el tamaño de los poros domina el módulo de Weibull, que como se mencionó en el apartado 5.1.1, es muy utilizado en la caracterización de las cerámicas porosas. En muelas con una proporción de poros por encima del 20% el módulo de Weibull suele ser constante y menos sensible que en muelas de baja porosidad, a las que además afecta más el tamaño de poros [34]. A parte de los defectos que pueda tener la muela otros factores como la composición, el tamaño de grano, el porcentaje de porosidad, su tamaño y su dispersión influyen fuertemente en su comportamiento. Cuanto mayor sea la cantidad de aglomerante presente, menor será la porosidad y más dura será la muela.

Aunque la definición real de grado puede variar de un proveedor a otro en base al se puede estimar el porcentaje de porosidad como en la Figura 16. Este porcentaje puede variar desde 2% hasta el 50% [1] en función de la aplicación.

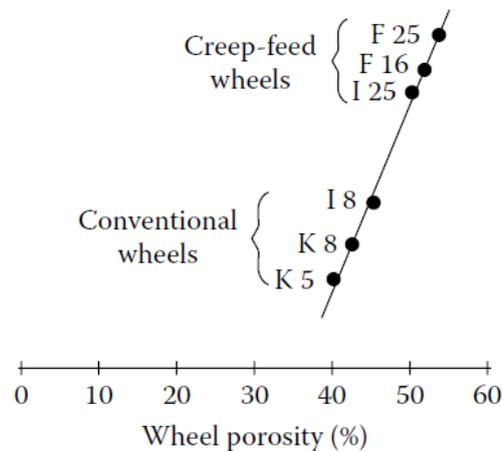


Figura 16: Porosidad para varias muelas Norton en función de su grado [8]

4.7.2.1 Brazilian Test

El brazilian test se utiliza con frecuencia para la caracterización mecánica de materiales frágiles como las rocas, el hormigón y la cerámica [34]. Consiste en la aplicación de una carga radial que comprime una probeta cilíndrica en forma de disco generando una combinación de esfuerzos de compresión y tracción. En general, la ventaja de este método es la baja influencia del acabado superficial de las probetas puesto que las tensiones están distribuidas en un alto volumen de la misma. Esto supone una mejor reproducibilidad en comparación con otros métodos. En los ensayos a flexión de 3 y 4 puntos las tensiones máximas de tracción y compresión se dan a en las superficies superiores e inferiores (en probetas rectangulares), por lo que los posibles defectos superficiales que existan ejercen una alta influencia. El brazilian test es un ensayo fácil de realizar, que da como resultado la resistencia a tracción del material siempre que se cumplan una serie de proporciones entre el diámetro de la probeta, el ancho de reparto de la carga y la longitud característica del material.

Es ampliamente utilizado mediante enfoques analíticos, experimentales y numéricos para el estudio de las tensiones de la rotura y de la propagación de la grieta en materiales frágiles. Varios autores realizan una comparación entre los resultados obtenidos en un ensayo de flexión a tres puntos y un ensayo brasileño de materiales frágiles porosos. Ambos reportan que, en el ensayo brasileño, tras alcanzar la tensión de fluencia, no se produce la propagación de microgrietas, sino que se produce un fenómeno de aplastamiento o degradación en la zona de contacto con las mordazas [32]. Por contrario, en las probetas ensayadas a flexión en 3 puntos se fracturaron catastróficamente después de alcanzar su límite elástico de tracción en la zona media inferior del vano. Además, se realiza una simulación numérica del ensayo brasileño para discos de material cerámico homogéneos y no homogéneos [26]. En el caso de los especímenes homogéneos la fractura se produce por la parte media del disco formando dos mitades, a partir de la propagación de microfisuras. La no homogeneidad del segundo disco provoca una fractura en varios fragmentos que derivan de la propagación

de una grieta ramificada no rectilínea. En la Figura 17 se muestran la distribución de deformaciones de los dos especímenes.

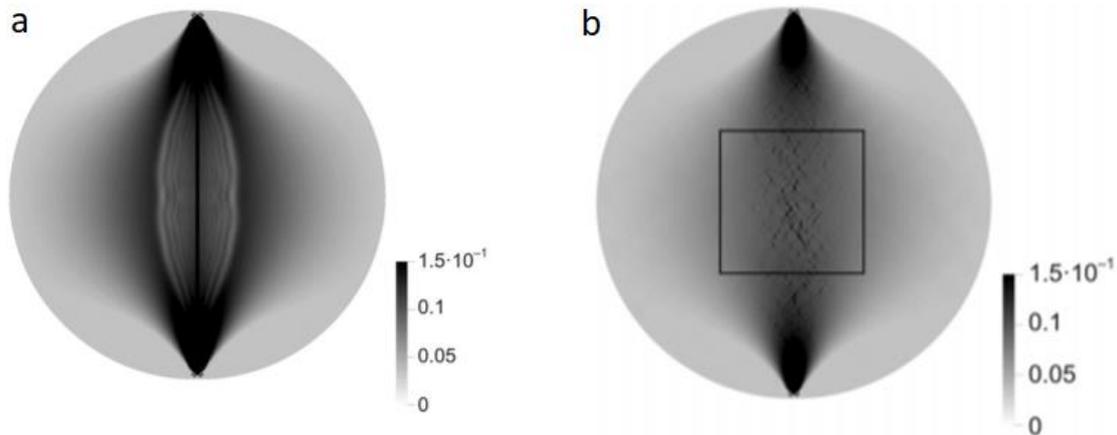


Figura 17: Distribución de la componente ϵ_{yy} del tensor de deformaciones en la fase de iniciación de grieta del espécimen homogéneo (a) y del espécimen no homogéneo (b) [26].

4.7.2.2 Símil entre muela abrasiva y hormigón

No existe una norma específica para la caracterización del comportamiento mecánico de las muelas abrasivas, aunque sí que se han publicado algunas investigaciones en las que se evalúa la resistencia a flexión mediante el ensayo de tres puntos [35], [36]. Para la realización de estos ensayos utilizan probetas prismáticas considerablemente pequeñas (40x8x6mm), así como la máquina en las que se realizan los ensayos. Las deformaciones que se alcanzan son del orden de las 50 μm . De estos ensayos obtienen el módulo de elasticidad de la muela de alúmina (entre 30 y 50 Gpa) y la resistencia a la flexión (entre 15 y 30 Mpa). En [35], tras analizar los resultados, observan que la forma de las probetas tiene una alta influencia en los resultados. Al no disponer de este equipamiento y la incapacidad del fabricante de muelas abrasivas de producir estas probetas se han buscado condiciones alternativas que encajasen con la naturaleza de unas probetas de muela abrasiva de mayores dimensiones.

El hormigón es un material de construcción formado por una mezcla de cemento, arena, agua y grava o piedra machacada. El cemento ejerce de aglomerante al mezclarse con agua y reaccionar químicamente, fase en la que puede generarse cierto nivel de porosidad. Al igual que el aglomerante vítreo, el cemento tiene la función de actuar como matriz del compuesto, es decir, configura geoméricamente la pieza, da cohesión al material, y transmite los esfuerzos a los áridos. La grava del hormigón es el componente más duro y de mejores propiedades mecánicas, su tamaño define la resistencia a compresión del material y está limitado por el tamiz por el que se le hace pasar. Por ello se puede considerar como el elemento análogo de los granos abrasivos de la muela. Al igual que los materiales que componen una muela de alúmina vitrificada, el hormigón está compuesto de materiales frágiles y se fabrican mediante una presión previa y una operación de cocido en el horno.

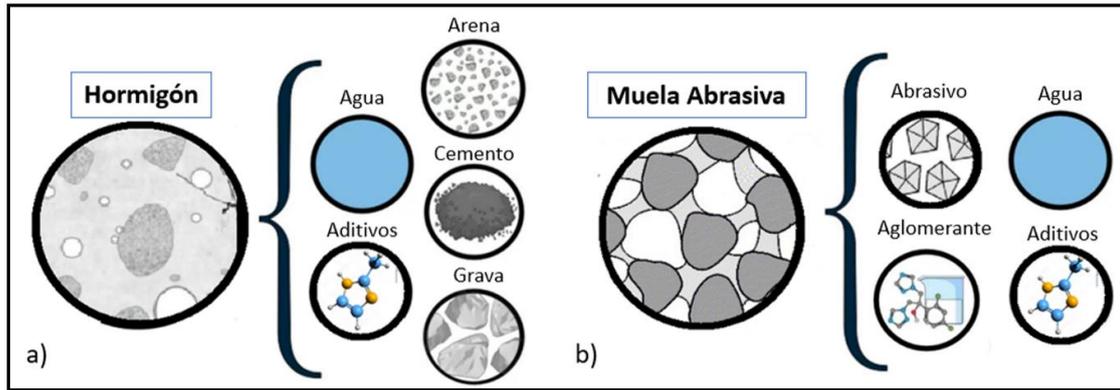


Figura 18: Composición de a) hormigón, b) muelas abrasivas.

El ensayo de flexión es ampliamente utilizado en la evaluación de resistencia de vigas y losas de hormigón frente a esfuerzos de flexión. Se realizan ensayos en diferentes combinaciones del material, variando su tamaño de árido, porcentaje de porosidad, presencia de refuerzos o para estudiar la influencia de tamaños en el resultado. El ensayo de flexión en el hormigón puede realizarse utilizando el ensayo de carga en tres puntos (ASTM C78) o en cuatro puntos (ASTM C293).

Al igual que para materiales vítreos, se monitoriza la fuerza aplicada por el o los rodillos superiores y la flecha generada. A partir de ello se puede obtener la tensión de rotura según la ecuación 6, donde P es la máxima carga aplicada, L el vano entre apoyos inferiores, que debe ser tres veces el espesor de la probeta, del ancho de la probeta (h) y B su espesor.

$$\sigma = \frac{3PL}{2Bh^2} \quad \text{Ec. 6}$$

La resistencia a la flexión podría considerarse una medida indirecta de la resistencia a la tracción. Es un parámetro altamente estudiado en la medición de la calidad de pavimentos, puesto que es un factor determinante en situaciones como el paso de vehículos o con la generación de gradientes térmicos por diferencia de temperatura de un lado a otro de la losa. Las investigaciones se centran estudiar la influencia en los resultados de estos ensayos al variar parámetros como el tamaño de las probetas, el tamaño y proporción de árido o cemento [37] o la presencia de refuerzos de diferentes tipos. Para la medición de la flecha generada durante este tipo de ensayo se suele emplear un transductor de desplazamiento lineal variable (LVDT). Su valor suele estar por debajo del milímetro (en probetas sin refuerzos), por lo que es fundamental que tanto el elemento de medida como su montaje sea el adecuado.

A parte de las propiedades mecánicas del hormigón, múltiples investigaciones pretenden estudiar el comportamiento del material durante propagación de la grieta. Para ello realizan una entalla en la parte inferior central (zona sometida a las máximas tensiones de tracción) y miden su apertura durante el ensayo de flexión a 3 puntos. En general, la tensión de inicio de grieta, que define la fractura del material, es menor que la resistencia a la tracción del hormigón. La propagación de las grietas está además definida por la resistencia a la fisuración. En [38] utilizan esta metodología para estudiar cómo puede mejorar el comportamiento en la post-fractura o tras el inicio de grieta al

añadir refuerzos de fibras de acero. Otros autores relacionan el crecimiento de esta grieta inducida con el tamaño de los áridos o la resistencia del cemento [37], [39]. Para la medición de la apertura de la entalla, que suele ser del orden de las décimas de micras, se suele emplear un clip extensiométrico.

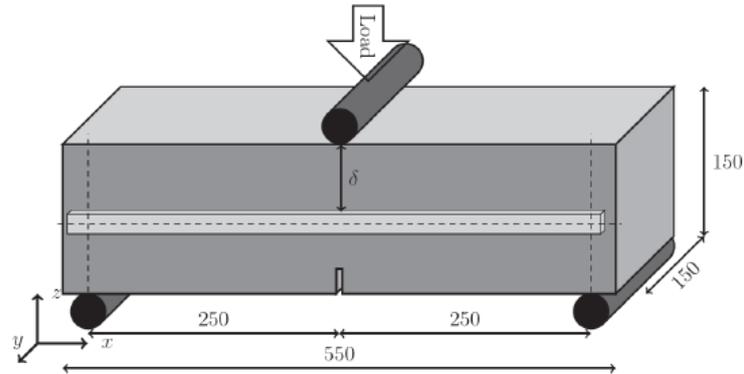


Figura 19: Ensayo de flexión en 3 puntos con entalla inferior [39].

La norma ASTM C293 establece que la distancia inferior entre apoyos o vano, debe ser 3 veces el espesor de la probeta. La carga se aplicará a un ritmo constante hasta la rotura de la probeta. La relación de carga aplicada dependerá de la siguiente ecuación:

$$r = \frac{SBh^2}{L}$$

Ec. 7

Siendo:

- R= relación de carga aplicada en MN/min.
- S= relación de aumento de tensión en las fibras de la parte externa en MPa/min. La norma recomienda un valor entre 0.9 y 1.2.
- B= anchura de la probeta en mm.
- h= espesor de la probeta en mm.
- L= vano del ensayo en mm.

Por el hecho de que la composición de cada muela varía en función de la aplicación para la que se ha diseñado, se debe llevar a cabo la caracterización de cada tipo o variante de la herramienta abrasiva.

4.8 Enfoque del proyecto

Como se ha ido desarrollando en la parte inicial del proyecto, existen múltiples investigaciones que estudian el desgaste de la muela abrasiva, pero no profundizan en los fenómenos de desgaste individuales que favorecen el desgaste prematuro de la muela. Esto se debe a la dificultad que implica su identificación, ya que a menudo estos fenómenos se solapan, sumado la reducida escala de los componentes de la muela. Con esto, usualmente se relaciona el desgaste en base a la tipología de muela o a los parámetros empleados durante la operación de rectificado, sin que se llegue a identificar el foco principal que favorece el desgaste en una tipología concreta de muela.

A menudo se define el comportamiento mecánico de la muela a partir de la caracterización de las propiedades mecánicas de los granos; su dureza, tenacidad,

capacidad de autoafilado, capacidad de disipación del calor o comportamiento frente a los ciclos de diamantado, entre otros. Para comprender el desgaste volumétrico de la herramienta, es fundamental caracterizar el comportamiento mecánico del material que enlaza los granos abrasivos. La pérdida prematura del grano y las tensiones a la que estará sometido dependen en una gran parte de las propiedades mecánicas del aglomerante, es decir, de la resistencia frente a esfuerzos de flexión de los puentes de unión entre granos y de la fuerza de adhesión entre las interfaces de los dos componentes.

Para alcanzar la eficiencia óptima de una tipología de muela en una operación específica, es preciso crear un equilibrio entre las propiedades mecánicas del grano abrasivo y las del material aglomerante. En base a ello, este trabajo se centra en estudiar tanto las propiedades mecánicas individuales de grano y aglomerante como las propiedades globales de la muela.

En cuanto a la modelización del desgaste, la mayor parte de los modelos que estudian el comportamiento mecánico de las muelas abrasivas se centran en los granos abrasivos, sin tener en cuenta el comportamiento del aglomerante que retiene los granos y transmite los esfuerzos. No se han desarrollado modelos de elementos finitos para predecir el desgaste de la muela completa, cuyo comportamiento se asemeja al de un material compuesto. Partiendo de la valoración los procedimientos, ensayos y modelos descritos, que habitualmente se utilizan para el estudio del desgaste de la muela, se define cómo el objeto de trabajo la realización de un modelo que combine las ventajas de los modelos macro y micro: un modelo que respete las dimensiones reales de las muelas abrasivas y que tenga en cuenta su composición real, considerando sus semejanzas con un material compuesto y no como un único elemento sólido. Con ello, se pretende caracterizar el comportamiento mecánico de las muelas abrasivas para así obtener información que ayude a comprender la tendencia a la fractura de los componentes de una muela de alúmina vitrificada. En este proyecto se realiza un modelo simplificado en el que se simulan los ensayos de caracterización del comportamiento mecánico de una tipología de muela específica. En él se tienen en cuenta todos los elementos que componen la muela de rectificado; grano, aglomerante y porosidad. Para comprender el comportamiento real de la herramienta se tienen en cuenta las propiedades individuales de los componentes, su tamaño y la proporción.

De forma paralela se realizan ensayos de caracterización de probetas prismáticas de muela de alúmina vitrificada. Esto permite, aparte de caracterizar el comportamiento mecánico de una tipología concreta de muela de alúmina vitrificada, confrontar los resultados obtenidos de la simulación del ensayo sobre el modelo de EF. Con la validación del modelo se busca un procedimiento que permita caracterizar distintas tipologías de muelas ahorrando el costo que supone la fabricación de probetas, realización de ensayos y procesamiento de resultados. De entre los ensayos de caracterización de materiales cuasifrágiles descritos en el apartado 2.7.2 se lleva a cabo la caracterización de la muela abrasiva siguiendo el estándar ASTM C293 para la realización de ensayos de flexión a 3 puntos sobre especímenes de hormigón. Se opta por esta metodología de ensayos en base a las similitudes de la muela abrasiva con el hormigón, su recomendación para materiales heterogéneos y porosos, la simplicidad del ensayo, la dificultad de fabricación de especímenes de dimensiones reducidas que exigen otros ensayos y la disponibilidad de los equipos necesarios para la realización de los ensayos. Este ensayo consiste en la monitorización de la fuerza aplicada por un rodillo superior centrado sobre probetas prismáticas apoyadas sobre dos rodillos

inferiores. Estas probetas son llevadas hasta fractura total, obteniéndose la tensión de rotura y el módulo elástico a partir de la fuerza aplicada y flecha generada. Se ensayan tres tipologías de muela distintas, en las que se varía el tipo de estructura cristalina del grano para estudiar cómo puede afectar en las propiedades mecánicas de la muela.

Puesto que no se encuentra información publicada de las propiedades mecánicas del aglomerante vítreo, se fabrican probetas cilíndricas, respetando la curva de sinterizado indicada por el fabricante de las probetas ensayadas. Al igual que con las muelas abrasivas, no existe un procedimiento estándar para la caracterización del material vítreo. Por las propiedades químicas del material, la simplicidad del ensayo y la posibilidad de disponer de los equipos necesarios, estas probetas cilíndricas son caracterizadas siguiendo el procedimiento estándar ASTM C1684 para ensayos de flexión a 3 puntos de especímenes de cerámicas de propiedades avanzadas.

Además, se realiza un análisis visual de la cara de fractura de las tres tipologías de probetas ensayadas experimentales mediante la toma de imágenes SEM. Además, se realiza un análisis EDAX en las zonas de las imágenes captadas con el fin de asegurar que se identifican correctamente los dos materiales. De este análisis visual se busca identificar los fenómenos predominantes que favorecen la fractura de las probetas, la falta de adhesión entre los granos abrasivos y el material vítreo, las diferencias entre las zonas sometidas a compresión y a tracción y la influencia de la estructura cristalográfica del grano en la progresión de las fisuras

5. Ensayos experimentales para la caracterización de las propiedades mecánicas de las muelas abrasivas.

5.1 Introducción

El objetivo de estos ensayos experimentales es caracterizar las propiedades mecánicas de tres tipologías de muela de alúmina vitrificada, en las que se varía el tipo de estructura cristalina del grano de alúmina. También se realiza, de forma paralela, la caracterización del aglomerante vítreo presente en la composición de las probetas de muela ensayadas. El ensayo se realiza en el laboratorio de caracterización de macroconducta de los servicios generales de investigación (SGIker) de la Universidad del País Vasco. En los siguientes apartados se detallan los materiales y máquinas empleados, la metodología seguida y los resultados obtenidos de estos ensayos experimentales.

5.2 Materiales, equipos e instrumentación

En este apartado se definen los materiales, máquinas y equipos empleados en los ensayos experimentales. Los materiales empleados en la caracterización de las muelas de alúmina vitrificada y del aglomerante vítreo son los siguientes:

- **Probetas prismáticas de alúmina vitrificada.** Las probetas caracterizadas en el ensayo a flexión de 3 puntos han sido facilitadas por Abrasivos UNESA S.L. Se entregan dos lotes de probetas; 9 en el primero con la misma tipología de muela y 18 en el segundo, de tres tipologías de muela diferentes, que se diferencian por el tipo de estructura cristalina del abrasivo añadido. Todas las probetas coinciden en las propiedades restantes como muestra en su designación técnica: dureza EF, tamaño medio de grano 46, estructura 12 y aglomerante vítreo con referencia CECR-4585/22.

Tabla 3: Características de las probetas del lote 1 y 2.

	Lote 1	Lote 2		
	Tipología de muela	Tipología de muela 1	Tipología de muela 2	Tipología de muela 3
Designación técnica	5MBA46EF12V489P20P	CBL46EF12V489P20P	MA46EF12V489P20P	5MBA46EF12V489P20P
Tipo de abrasivo	Alúmina 50% monocristal, 50% convencional	Alúmina 100% Convencional	Alúmina 100% monocristal	Alúmina 50% monocristal, 50% convencional
Dimensiones (mm)	150x50x50	100x25x25		

Para la fabricación de los tres tipos de probetas el fabricante ha respetado las mismas proporciones en peso de las sustancias integrantes, además del mismo nivel de porosidad inducida. Con esto se llega a la siguiente composición en volumen:

- 41% de grano abrasivo.

- 12% de aglomerante vítreo.
- 47% de porosidad.

Las probetas se realizan a partir del prensado en moldes adaptados de una mezcla del material vítreo y el abrasivo en las proporciones adecuadas. Posteriormente se introducen en hornos para su sinterizado siguiendo unas curvas variables. Las dimensiones de las probetas se muestran en la Tabla 3, en función al lote al que pertenecen. Debido a su alta porosidad y la aleatoriedad de la posición de los componentes las dimensiones pueden variar hasta 3.6 mm.

- **Polvo del material vítreo:** Se emplea en la fabricación de las probetas de vidrio sinterizado para la caracterización del material. Se utiliza un polvo suministrado por la empresa FERRO con referencia CECR-4585/22. La composición exacta del polvo es desconocida por razones de confidencialidad del laboratorio fabricante. Los aglomerantes vítreos comerciales suelen seguir la siguiente formulación: $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ [19].
- **Carboximetilcelulosa.** Se emplea en la fabricación de las probetas de vidrio sinterizadas. Se utiliza para dar consistencia a la mezcla y favorecer el desmoldeo de las probetas.



Figura 20: Polvo CMC.

Los equipos empleados en la realización de los ensayos son los siguientes:

- **Máquina de flexión a 3 puntos INSTRON 5967.** Los ensayos de los bloques experimentales 2 y 3 para la caracterización de la muela de alúmina vitrificada se han llevado a cabo en la máquina multiensayo electromecánica INSTRON 5967.



Figura 21: INSTRON 5967.

La máquina puede trabajar tanto a compresión como tracción y se le pueden adaptar diferentes tipos de mordazas y utillajes. Los datos técnicos de la máquina se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4: Datos técnicos de la INSTRON 5967

INSTRON 5967	
Capacidad (KN)	30
Rango de velocidad (mm/min)	0.001-1000
Máximo recorrido (mm)	1212
Número de columnas	2
Espacio entre columnas (mm)	418 mm
Resolución de la fuerza (dígitos)	100
Resolución de la posición (mm)	0.01

La lectura de fuerza aplicada por el rodillo superior se toma a través de una célula de carga con precisión de milésimas de N y capacidad de 30 KN. La medición de la deflexión se realiza a través del sensor de recorrido del travesaño de la máquina de ensayos.

- **Uillaje Bend Fixture 642.01A.** Para la realización del ensayo con la máquina INSTRON 5967 se emplea este utillaje de flexión que permite el montaje de rodillos de diferentes tamaños tal y como se indica en la Tabla 5. Además, estos dispositivos permiten ajustar los vanos. En la realización de los ensayos se han utilizado rodillos de $\varnothing 8$ y $\varnothing 18$.

Tabla 5: Datos técnicos del utillaje Bend Fixture 642.01A.

Bend Fixture 642.01A	
Capacidad de carga estática (KN)	30
Capacidad dinámica (KN)	10
Vano inferior (mm)	24-152
Diámetro de rodillos disponibles (mm)	5,8,10,12,18

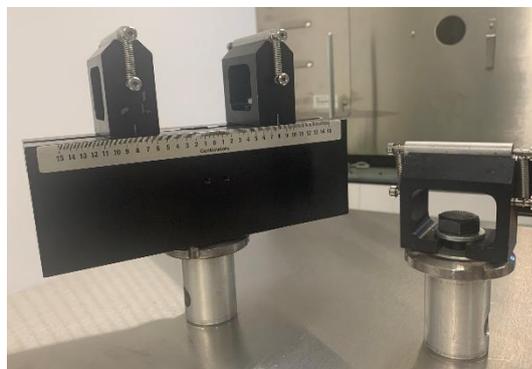


Figura 22: Utillaje Bend Fixture 642.01A con montaje de rodillos $\varnothing 8$ mm.

- **Sensor EddyCurrent.** Se emplea en la lectura de la deflexión alcanzada durante el bloque 2 de ensayos de caracterización de la muela de alúmina vitrificada. Se

trata de un sensor inductivo empleado en la medición sin contacto de desplazamiento, distancia, posición, oscilación y vibraciones. Consta de una resolución de $4\ \mu\text{m}$ y un rango de trabajo de 0 a 2 cm. Las mediciones de la señal del sensor se realizan con una frecuencia de 100Hz. Su funcionamiento se basa en una bobina que es alimentada con una corriente alterna que genera un campo magnético a su alrededor. Si un metal conductor es colocado dentro de este campo electromagnético, se inducen corrientes de Eddy las cuales forman un campo electromagnético de acuerdo a la ley de Faraday. Puesto que las probetas ensayadas no tienen carácter conductor se coloca una capa de papel de aluminio en la zona de máxima deflexión para permitir su medición durante el ensayo. Previamente al ensayo se realiza la calibración del sensor y se obtiene la ecuación que relaciona el voltaje de la señal medida con la distancia respecto al sensor.

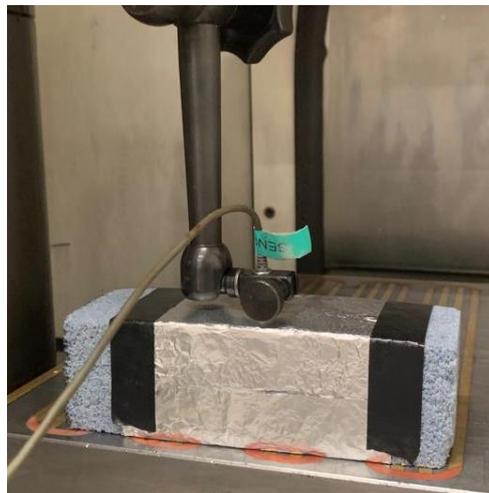


Figura 23: Calibración del sensor Eddy Current.

- **Máquina de flexión a 3 puntos ZWICK ROELL Z250.** Tanto los ensayos del bloque experimental 3 para la caracterización de la muela de alúmina vitrificada como los ensayos de caracterización de las probetas de vítreo se han llevado a cabo en la máquina multiensayo electromecánica ZWICK ROELL Z250. En la Tabla 6 se muestran los datos técnicos de la máquina.



Figura 24: ZWICK ROELL Z250.

Tabla 6: Datos técnicos de la ZWICK ROELL Z250.

INSTRON 5967	
Capacidad (KN)	250
Rango de velocidad (mm/min)	0.00005-1000
Máximo recorrido (mm)	1212
Número de columnas	4
Espacio entre columnas (mm)	1500 mm
Resolución de la posición (mm)	0.02

- Sensor láser.** Para la medición de la profundidad de la deflexión alcanzada por las probetas del bloque de ensayos experimentales para la caracterización de la muela se ha hecho uso del sensor láser de desplazamiento optoNCDT ILD 1900-2LL, del fabricante Micro-Epsilon. El sensor proyecta un haz láser sobre el objeto a detectar, y basándose en el principio de triangularización calcula la distancia a este con una precisión de hasta 0,1 μ m. Este modelo en concreto utiliza un láser con forma de línea, lo que facilita la medición en superficies rugosas. En la Tabla 7 se muestran las características del sensor empleado.

Tabla 7: Características del sensor láser de desplazamiento optoNCDT ILD 1900-2LL (Micro-Epsilon).

Sensor láser de desplazamiento	
Rango de medición (mm)	2
Frecuencia de medición (kHz)	0.25 - 10kHz
Linealidad (μ m)	$< \pm 1$
Repetibilidad (μ m)	$< \pm 0.1$
Señal de salida (V)	Analógica / Digital (4-20mA / 0-5V / 0-10V)

- Horno de cámara ROHDE ME 30/13.** Se utiliza para la sinterización de las probetas de material vítreo de acuerdo con la curva proporcionada por el fabricante en la que se alcanzan los 1135°C. Las características del horno se encuentran en la Tabla 8.



Figura 25: Horno ROHDE ME 30/13.

Tabla 8: Datos técnicos del horno ROHDE ME 30/13

ROHDE ME 30/13	
Temperatura máxima (°C)	1300
Dimensiones internas (mm)	250x500x200
Elementos calefactores	3 paredes de rodillos
Capas de aislamiento	2
Sistema de Control	TC504

El control de la curva de calentamiento se realiza a través del controlador TC504 de ROHDE, el cual lleva a cabo una regulación constante y de alta precisión del horno. El gráfico de Figura 26 se muestra los parámetros de la curva de cocción del controlador, que permite dos rampas de calentamiento con una velocidad de calentamiento máxima de 998 °C/h. La rampa 3 no está controlada puesto que el horno no dispone de ningún sistema de enfriamiento.

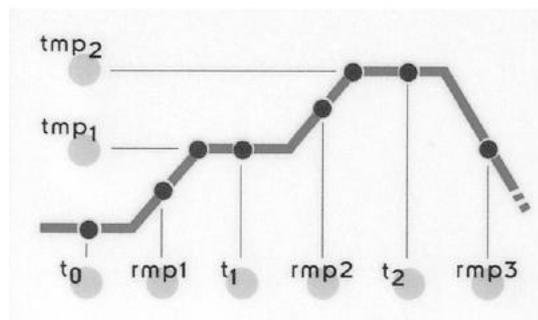


Figura 26: Parámetros de la curva de calentamiento del controlador TC504.

Los puntos de la curva del programa indican los siguientes parámetros que se deben introducir:

- t0: tiempo de retardo de comienzo del ciclo en (h.min).
- rmp1: Rampa de calentamiento 1. El horno se calienta a la velocidad introducida (°C/h).
- rmp1: Temperatura del 1er punto de conmutación (°C)
- t1: Tiempo de mantenimiento de tmp1 (h.min)
- rmp2: Rampa de calentamiento 2 (°C/h).
- tmp2: Temperatura del 2º punto de conmutación (°C)
- t2: Tiempo de mantenimiento de tmp2. (h.min)
- rmp3: Rampa de enfriamiento (°C/h).

5.3 Caracterización mecánica de la muela abrasiva grano-aglomerante

5.3.1 Diseño de ensayo mecánico de las probetas de material vítreo

El ensayo de flexión a tres puntos se utiliza para determinar la resistencia a la flexión del material de ensayo. Se busca con ello analizar la rigidez del material ante un esfuerzo realizado en una dirección determinada. El ensayo consiste en colocar la probeta sobre dos apoyos (rodillos inferiores) separados una cierta distancia L . Una vez colocada la probeta, un rodillo situado en la parte central de los apoyos y por encima de la probeta, comienza a descender, flexionando la parte central de la probeta hasta llevarla a la fractura final. Durante el ensayo se realiza la medición de la fuerza aplicada por el rodillo central sobre la probeta, así como la flecha alcanzada.

Existen distintas normas que definen las condiciones del ensayo en función del material que se pretende caracterizar. Varían parámetros como forma y dimensiones de las probetas, su procedimiento de fabricación, la velocidad de aplicación de la carga, la distancia del vano entre apoyos inferiores y la tipología de máquina y tipología de utillaje a emplear, entre otros. Como se comenta en el capítulo 5, no existe una norma específica para la caracterización de muelas de rectificado. Por las similitudes con el material, los ensayos de este trabajo se realizan según las directrices del estándar ASTM C293 para los ensayos de flexión del hormigón. A partir del ensayo de flexión se puede obtener módulo de elasticidad o módulo de Young, la resistencia a la flexión, y otras propiedades como el alargamiento.

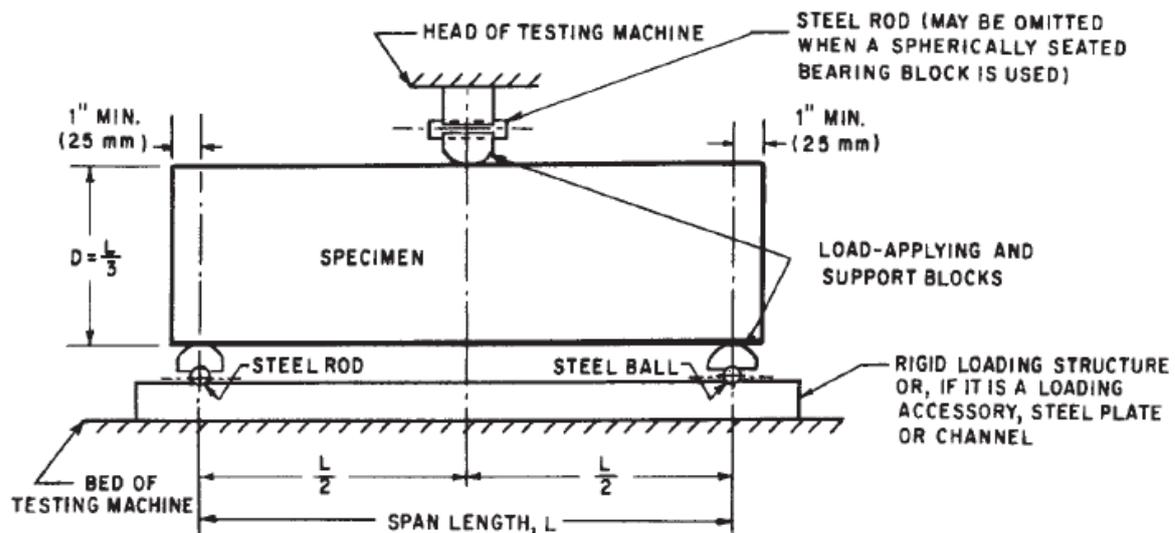


Figura 27: Diagrama del montaje de la configuración del ensayo de flexión a 3 puntos según ASTM C293

El estándar ASTM C293 indica que las probetas deben ser fabricadas según los estándares C 31 o C192. En ellos se proporcionan los requisitos estandarizados para fabricación, curado, protección y transporte de los especímenes de hormigón para diferentes ensayos de caracterización. La viga estándar según estos procedimientos es de 150x150 mm de sección transversal. De acuerdo con el esquema de la Figura 27, la relación entre el ancho de las probetas prismáticas (D) y la distancia entre apoyos (L) debe ser de $1/3$. La longitud total de la probeta deberá ser de al menos 50mm mayor que tres veces su anchura. El procedimiento especifica que todas las superficies serán lisas, libres de arañazos, muescas, huecos y marcas de indentación. Se deberá además asegurar la perpendicularidad de las caras laterales con las caras superior e inferior de las probetas prismáticas.

La tensión de rotura se puede obtener a partir de la Ec. 8, siendo P la fuerza aplicada, B el ancho de la probeta y d el espesor.

$$\sigma = \frac{3PL}{2Bh^2} \quad \text{Ec. 8}$$

El módulo elástico se obtiene a partir de la teoría de vigas Timonshenko. Se trata de una particularización de la teoría de vigas de Euler-Bernoulli (primer término de la Ec. 9) para modelos de viga corta, como sería el caso de las probetas ensayadas:

$$E = \frac{PL_0^3}{48Iy} + \frac{PL}{4kGA} \quad \text{Ec. 9}$$

Los rodillos de apoyo y de aplicación de carga no deberán tener un radio mayor de 64mm y de una longitud que asegure el contacto en toda la anchura de la probeta. El montaje del utillaje y la probeta deberá asegurar que las fuerzas aplicadas serán perpendiculares a la cara del espécimen sin excentricidad. La carga será aplicada a una razón constante y sin impacto.

El utillaje con el que se cuenta en el laboratorio de macroconducta admite una distancia entre vanos de hasta 150mm. Para ajustarse a ello, se fabrican probetas de tamaño reducido respetando las proporciones que indica la norma. Por las dificultades en la medición de la flecha y la identificación de los rodillos sobre la superficie de las probetas se realizan 3 bloques de ensayos buscando corregir errores que alteren los resultados. En estos bloques se varían las dimensiones de las probetas fabricadas y el procedimiento de medición de la flecha. En la Tabla 9 se indican las condiciones de cada bloque de ensayos.

Tabla 9: Características de las probetas de muela de alúmina vitrificada

	Dimensiones de las probetas (mm)	Tipo de probetas ensayadas	Número de probetas ensayadas	Diámetro de los rodillos (mm)	Medición de la deflexión	L (mm)
Bloque 1	150x50x50	-50% MA + 50% CBL	9	8	Sensor de recorrido de la máquina.	100, 120
Bloque 2	100x25x25	-50% MA + 50% CBL -MA -CBL	8	18	Sensor de recorrido de la máquina y sensor Eddy Current	80
Bloque 3	100x25x25	-50% MA + 50% CBL -MA -CBL	9	14	Sensor de recorrido de la máquina y láser	80

- Bloque 1: Se realiza un primer ensayo de probetas de mayor tamaño. Todas cuentan con la misma composición, un 50% de grano convencional y un 50% de grano monocristal. Se emplea el utillaje con los rodillos de menor diámetro con los que se cuenta en el laboratorio.

- Bloque 2: Se fabrican nuevas probetas con las que se puede cumplir la configuración L/D que marca la norma con el utillaje del que se dispone en el laboratorio. Se ensayan 3 probetas de cada tipología. Cada una presenta una proporción distinta del tipo de estructura cristalográfica del grano de alúmina. Se coloca además unas chapas de aluminio de 2 mm de espesor sobre los rodillos inferiores para distribuir la fuerza aplicada y que no haya indentación de los rodillos en las probetas.

Se observan irregularidades en la sección de las probetas por lo que se realiza la medición, con ayuda de un calibre de resolución 0.01mm, de la anchura y espesor de cada probeta en 3 puntos, en los dos extremos y la parte central. En la Tabla 10 se muestra la media de las mediciones para cada probeta. Tener en cuenta esta variación es fundamental para la correcta obtención de los resultados finales.

Tabla 10: Mediciones de la sección de las probetas del bloque experimental 2.

	Anchura (B)				Espesor (H)			
	Extremo izq	Centro	Extremo dcho	Media	Extremo izq	Centro	Extremo dcho	Media
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
5MBA-1	24.66	24.23	24.79	24.560	25.82	27.71	25.96	26.497
5MBA-2	26.24	26.1	25.8	26.047	24.63	24.51	24.56	24.567
5MBA-3	25.8	25.62	25.5	25.64	23.9	24.3	24.2	24.133
MA-1	22.61	23.63	23.83	23.357	25	25.63	25.89	25.507
MA-2	23.47	23.44	23.02	23.310	23.47	23.44	23.02	25.067
CBL-1	24.9	24.95	24.56	24.803	24.58	24.09	23.45	24.040
CBL-2	25.06	25.08	24.67	24.937	23.75	24.06	23.26	23.690
CBL-3	24.61	24.81	24.72	24.713	24.62	24.81	24.72	24.717
			var	1.49			var	0.9

Se introduce, además, como sistema de medición, un Sensor EddyCurrent en la parte inferior central de los prismas como se muestra en la Figura 28. Alineada con este y sobre la probeta se coloca una lámina de film de aluminio que permita, por las ondas del sensor, medir la deflexión alcanzada durante el ensayo.

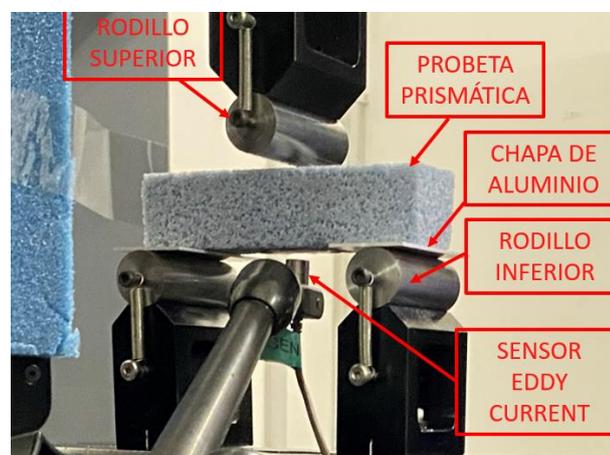


Figura 28: Medición de la deflexión con sensor Eddy Current.

- Bloque 3: Se fabrican probetas con la misma configuración que el bloque anterior, pero se realiza un pulido de su superficie para asegurar la perpendicularidad entre caras y la su planitud (Figura 29).

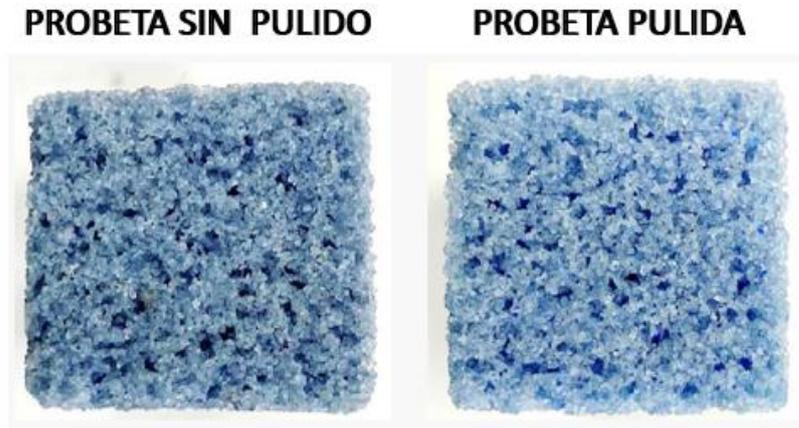


Figura 29: Pulido de las probetas del bloque 3 del ensayo experimental

Tras el pulido, al igual que con las probetas del bloque 2, se realiza la medición en 3 puntos de la anchura y espesor con un calibre de 0.01mm de resolución. Los resultados de estas mediciones se muestran en la Tabla 11.

Tabla 11: Mediciones de la sección de las probetas del bloque experimental 3 tras el pulido.

	Anchura (B)				Espesor (H)			
	Extremo izq	Centro	Extremo dcho	Media	Extremo izq	Centro	Extremo dcho	Media
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
5MBA-4	23.7	23.14	23.8	23.547	25.03	25.02	24.96	25.003
5MBA-5	25.54	25.5	25.35	25.463	24.51	24.65	24.47	24.543
5MBA-6	24.35	24.65	24.85	24.617	25.18	25.3	25.27	25.250
MA-4	23.27	23.24	23.12	23.210	25.61	25.68	25.46	25.583
MA-5	24.8	24.87	24.84	24.837	25.37	25.46	24.47	25.100
MA-6	24.64	24.63	24.52	24.597	24.84	24.91	24.93	24.893
CBL-4	21.32	21.2	21.22	21.247	23.93	23.94	23.82	23.897
CBL-5	24.04	24.21	24.15	24.133	25.29	25.43	25.43	25.383
CBL-6	25.16	25.11	25.42	25.230	24.25	24.03	23.75	24.010
			var	0.58			var	0.3

Para la medición de la deflexión se utiliza un láser que realiza un seguimiento de la deflexión de la zona inferior central de la probeta durante el ensayo (Figura 30). Los ensayos de este bloque son realizados en el centro de caracterización de materiales de la I2M de la ENSAM en Talence, Bordeaux. La máquina utilizada es la ZWICK ROELL Z250 con un utillaje de rodillos fijos de Ø14mm.

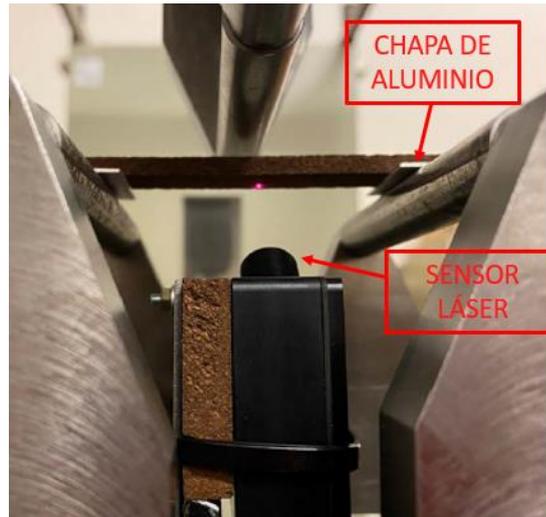


Figura 30: Montaje del sistema de medición láser.

5.3.2 Resultados de la caracterización mecánica de muelas abrasiva

Para lograr la correcta caracterización de las muelas de alúmina vitrificada ensayadas ha sido necesario, tal y como se describe en el apartado anterior, la repetición del ensayo buscando ajustarse al estándar ASTM C 293 en la medida posible, de acuerdo a los recursos de los que dispone el fabricante de las probetas y los equipos y sistemas de medición con los que se cuenta en los laboratorios de macrocomportamiento de materiales a los que se ha acudido.

Las dimensiones de todas las probetas ensayadas difieren de las del espécimen estándar que se define en la norma. Esto se debe a que, no se cuenta con un utillaje en los laboratorios que permita ajustar el vano entre rodillos inferiores a la distancia que se requiere para la probeta estándar. Si se respeta, en los bloques de ensayo 2 y 3, la relación entre L/D que indica la norma, y la longitud total de las probetas.

Por la alta porosidad de la tipología de muela que se pretende caracterizar (46%) y su naturaleza blanda, la indentación de los rodillos ha sido un problema recurrente. Como se ilustra en la Figura 31, los rodillos, que actúan como una fuerza puntual sobre la superficie de la probeta, penetran en su superficie, haciendo que esta se desplace verticalmente, al igual que el rodillo vertical. Con esto, el sensor del banco de pruebas obtiene un valor excesivo en la medición de la flecha alcanzada. Este ha sido un problema recurrente durante la realización de los ensayos y el cual se ha intentado eliminar empleando distintos recursos.

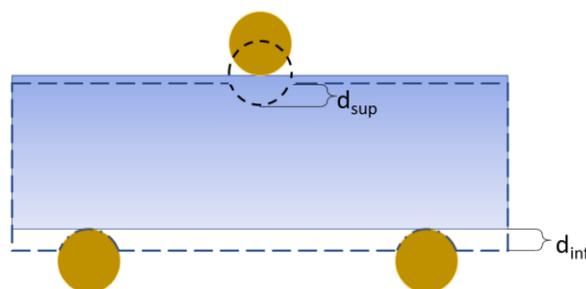


Figura 31: Esquema de la indentación de los rodillos sobre la probeta de alúmina vitrificada.

En la Figura 32 se muestran la marca de indentación que deja el rodillo superior sobre una de las probetas de este primer bloque de ensayos.



Figura 32: Marcas de indentación de los rodillos del bloque 1 de ensayos

Las marcas de indentación de los rodillos superior e inferiores son medidas con ayuda de un reloj comparador y se comparan en la Tabla 12 con la flecha medida por el sensor de la propia máquina durante la realización del ensayo. Por la alta porosidad de la muela y la irregularidad de su marca que complican la medición real de su profundidad se determina que los resultados de estos ensayos no son fiables. Este primer bloque experimental sirve como puesta a punto de los dos bloques de ensayos que se realizan posteriormente. Se ajustan en base a ello las condiciones de los equipos de medida a emplear, el utillaje de flexión, las fuerzas y velocidad de aplicación del ensayo y las dimensiones de un nuevo lote de probetas.

Tabla 12: Ajuste de la flecha medida en los ensayos experimentales de flexión a 3 puntos del bloque 1.

	d _{inf} (mm)	d _{sup} (mm)	d _{total} (mm)	Flecha Ensayo (mm)	Flecha ajustada (mm)
Probeta 1	1.155	4.951	6.106	5.313	-0.793
Probeta 2	1.011	4.332	5.343	5.543	0.200
Probeta 3	1.021	3.029	4.050	3.922	-0.128
Probeta 4	1.088	3.941	5.029	4.399	-0.630
Probeta 5	1.248	3.180	4.427	4.218	-0.210
Probeta 6	1.371	2.691	4.062	4.995	0.932
Probeta 7	1.356	2.675	4.031	4.757	0.726
Probeta 8	1.239	3.471	4.709	4.140	-0.569
Probeta 9	1.625	2.594	4.219	5.672	1.453

De las probetas de este primer bloque se toman 2 muestras que se utilizan en la inspección visual microscópica mediante el microscopio electrónico de barrido (SEM) como se detalla en el capítulo 7 para estudiar los fenómenos de fracturas predominantes que se aprecian en la cara de fractura de la muela.

En el segundo bloque se ensayan 3 tipologías distintas de muela de unas proporciones que permiten respetar las condiciones del estándar de caracterización del hormigón. Por cada tipología de muela se ensayan 3 probetas. En el caso de las probetas con 100% de alúmina monocristal se descarta una de las tres probetas por un error durante la realización del ensayo.

Aunque en el bloque 2 se reduce considerablemente la indentación de los rodillos aumentando su diámetro y con la colocación de las chapas de distribución de carga de aluminio (Figura 28), no se puede asegurar que se elimine al 100%. Esto afecta además en la lectura del sensor EddyCurrent. En la Figura 33 se muestra el diagrama tensión-deformación de las probetas ensayadas a partir del cálculo basado en la flecha medida por la máquina. Las curvas del diagrama de Fuerza-Desplazamiento de la Figura 33 representan claramente la fractura de un material cuasifrágil, en el que los picos se deben a la confluencia de microgrietas que confluyen cediendo para la generación de la fisura o macrogrieta que lleva finalmente a la fractura de la probeta.

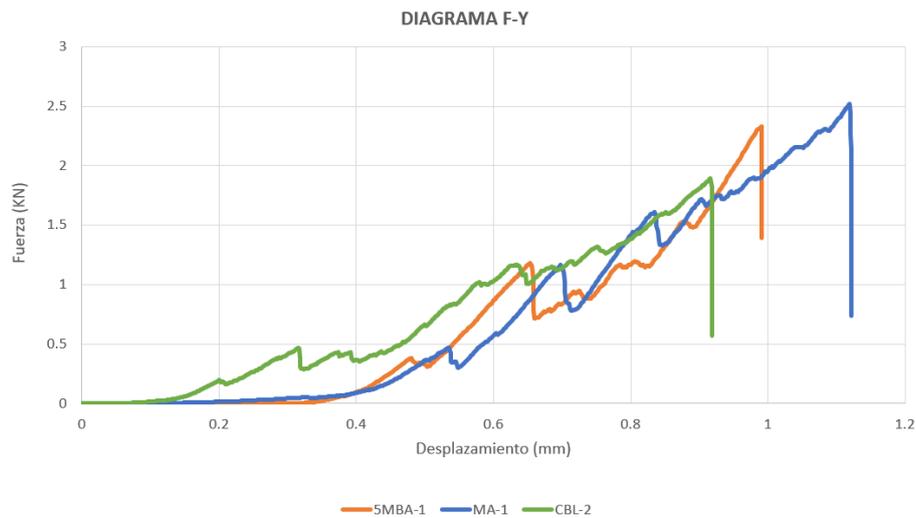


Figura 33: Diagrama σ - ϵ del bloque experimental 2.

En la Tabla 13 se muestran los resultados obtenidos en este segundo bloque de ensayos experimentales. Se observa que las probetas en general alcanzan una tensión de rotura similar. En el caso de las probetas con un 100% de alúmina monocristal este valor es mayor. En cuanto al módulo elástico se obtienen valores bajos en relación al margen dentro del que suele estar este parámetro para las muelas de alúmina vitrificada (10-80Gpa). En concreto para las muelas con alúmina monocristal la rigidez obtenida es destacablemente baja. El valor alto de la flecha medida para estas probetas lleva a pensar que existe un error en la medición.

Tabla 13: Resultados del bloque experimental 2.

	L	F_{max}	Inercia	Flecha sensor máquina	Flecha Eddy Current	E	σ
	(mm)	(N)	(N/mm^4)	(mm)	(mm)	(Gpa)	(Mpa)
5MBA-1	80	2329.65	38073.33	0.9905	0.154	4.24	16.21
5MBA-2	80	2223.69	32181.75	0.9714	0.660	1.12	16.98
5MBA-3	80	2312.07	30032.31	1.14	0.184	4.46	18.58
MA-1	80	2517.76	32299.12	1.12	1.295	0.64	19.88
MA-2	80	2334.04	30595.02	0.9764	0.760	1.07	19.12
CBL-1	80	1466.15	28716.55	0.87	0.233	2.33	12.27
CBL-2	80	1893.26	27628.18	0.916	0.322	2.27	16.23
CBL-3	80	2060.98	31097.09	0.72	0.194	3.65	16.38

Se realiza un tercer bloque de ensayos en el que se busca corregir los aspectos que pueden influir en la medición de la flecha y por tanto en la caracterización del material. Puesto que el módulo elástico es inversamente proporcional a la flecha es fundamental emplear un sistema de medición exacto y libre del efecto de la indentación de los rodillos. Se emplea por ello un sistema de medición por láser, con mayor repetibilidad y fiabilidad. Se corrige además los errores de planitud y perpendicularidad de las caras de acuerdo a las especificaciones del estándar que se sigue mediante un procedimiento de pulido, como se describe en el apartado anterior. Con esto se logra suavizar la dispersión de tamaños de la probeta, reduciendo la varianza en las mediciones de la muestra de 0.81mm (bloque2) a 0.31mm (bloque 3). En estos ensayos se colocan de nuevo las chapas de aluminio para distribuir la fuerza aplicada por los rodillos y reducir con ello su indentación.

Tabla 14: Resultados del bloque experimental 3.

	F_{max}	Inercia	Flecha láser	E	Inercia	σ
	(N)	(N/mm⁴)	(mm)	(Gpa)	(N/mm⁴)	(Mpa)
5MBA-4	1924.06	27210.19	0.285	2.65	27202.26	17.69
5MBA-5	2354.65	33749.59	0.362	2.06	33767.43	17.11
5MBA-6	2047.40	31401.06	0.418	1.66	31388.31	16.47
MA-4	2401.54	26652.92	0.404	2.38	26656.39	23.05
MA-5	2296.66	32058.80	0.298	2.56	32045.89	17.99
MA-6	1988.75	30877.99	0.364	1.89	30869.57	16.04
CBL-4	1231.05	19111.44	0.261	2.63	19099.79	15.40
CBL-5	1915.92	29715.45	0.281	2.45	29731.67	16.36
CBL-6	2146.64	32133.84	0.344	2.07	32133.84	16.04

En la Tabla 14 se muestran los resultados obtenidos del bloque experimental 3. Se puede ver cómo los valores de la flecha media medida por el láser son inferiores a los valores medidos por el sensor del bloque anterior a excepción de las probetas de 5MBA (Tabla 15). Esto indica que en este tercer bloque de ensayos se consigue reducir considerablemente el efecto de indentación de los rodillos y se obtienen resultados más fiables.

Tabla 15: Comparativa entre las mediciones en los bloques experimentales 2 y 3.

	Bloque 2		Bloque3	
	F_{max} (N)	Flecha laser (mm)	F_{max} (N)	Flecha sensor (mm)
5MBA	2288.47	0.332	2108.70	0.355
MA	2425.9	1.048	2228.98	0.355
CBL	1806.79667	0.835	1764.53	0.295

Se obtienen valores muy próximos de la tensión última a la que se produce la fractura para las tres tipologías de muela. Las probetas con un 100% de alúmina monocristal presentan una tensión de rotura de $\sigma_{MA}=19.02$ MPa, ligeramente superior del valor alcanzado por las con el 100% de grano convencional de $\sigma_{CBL}=15.93$ Mpa o de las probetas con la mezcla del 50%, que alcanzan una $\sigma_{5MBA}=17.09$ Mpa. Tanto para los ensayos del bloque 2 como los del bloque 3 las probetas con monocristal son capaces de resistir una mayor fuerza (2,42 KN y 2,28 KN) durante el ensayo que las otras tipologías de muela. Se observa que en los resultados del bloque 3 coinciden las flechas alcanzadas para las probetas con grano monocristal y convencional.

Por otro lado, no se detecta que el tipo de estructura cristalográfica de la alúmina tenga influencia sobre la rigidez de la muela ($E_{MA}=2.47$ GPa, $E_{CBL}=2.38$ GPa y $E_{5MBA}=2.12$ GPa). Los valores bajos del módulo elástico indican que la muela no es capaz de deformarse frente a un esfuerzo. Es decir, no es capaz de transformar la tensión a la que está sometida en energía potencial elástica que derive en una deformación reversible. Con ello se llega a una fractura prematura de las zonas más débiles de la muela. La rigidez de la muela está mayormente influenciada por su porosidad. Esta relación se desarrolla en las conclusiones del capítulo 8.

En la Tabla 16 se muestran los valores medios obtenidos de la caracterización del comportamiento mecánico de las 3 tipologías de muela obtenidas a partir del ensayo de flexión a 3 puntos:

Tabla 16: Resultados de la caracterización del comportamiento mecánico de las muelas ensayadas

	σ_{ult} (MPa)	E (GPa)
5MBA	17.69	2.12
MA	17.11	2.47
CBL	16.47	2.38

5.4 Caracterización mecánica del material vítreo

La caracterización del comportamiento mecánico del material vítreo es necesaria para la simulación numérica de los ensayos de flexión a 3 puntos que se detalla en el capítulo 8. Los fabricantes de los aglomerantes vítreos recelan de publicar información acerca de la composición exacta del producto, sus propiedades mecánicas o químicas. No se encuentran, además, investigaciones previas en las que se caracterice el comportamiento mecánico del aglomerante en específico del que está compuesto las probetas ensayadas. En base a ello se fabrica un grupo de probetas cilíndricas de aglomerante vítreo que serán posteriormente sometidas a un ensayo de flexión a 3 puntos siguiendo la norma ASTM C1684 – 13 que define el procedimiento estándar para el ensayo de flexión a 3 y 4 puntos de cerámicas avanzadas, en concreto para probetas cilíndricas.

5.4.1 Diseño de ensayo mecánico de las probetas de material vitreo

Las dimensiones de las probetas fabricadas se escogen de acuerdo a lo marcado por el estándar ASTM C1684 -13. Para el ciclo de sinterizado se siguen las directrices marcadas por el fabricante de muelas que proporciona las muelas ensayadas con el vítreo que se pretende caracterizar.

Como se comenta en el capítulo 5, el estándar que se pretende seguir establece las condiciones para la obtención de la resistencia frente a la fractura y el módulo elástico de materiales cerámicos avanzados mediante el ensayo de flexión a 3 y 4 puntos. Por la disponibilidad del utillaje, se escoge realizar el ensayo a 3 puntos. Este ensayo sigue el mismo esquema que los ensayos de caracterización de las muelas de alúmina; la probeta cilíndrica se coloca apoyada sobre dos rodillos inferiores separados por una distancia L , mientras que un rodillo superior descende aplicando una carga P en la zona central de la probeta hasta llevarla a la fractura final. La resistencia a la fractura se puede obtener según la Ec. 10:

$$\sigma = \frac{8PL}{\pi D^3} \quad \text{Ec. 10}$$

El estándar marca tanto las dimensiones y condiciones de las probetas a ensayar, el utillaje, los vanos y distancias entre puntos de apoyo y el procedimiento del ensay. Recomienda realizar el ensayo sobre probetas cilíndricas de un diámetro de entre 1.5 y 8 mm y una longitud de entre 25 y 85 mm fabricadas a partir de un proceso de un proceso de extrusión, cocción y mecanizado. En base a las disposiciones del estándar y al utillaje con el que se cuenta para la realización del ensayo se establecen los parámetros del ensayo:

- Diámetro de las probetas: 8mm.
- Longitud de las probetas: 90 mm.
- Vano entre rodillos inferiores: 80 mm.
- Diámetro de los rodillos: 8 mm.
- Velocidad de aplicación de la carga: 1 mm/min.
- Número mínimo de probetas a ensayar: 30.

El ensayo de flexión a 3 puntos se realiza en la máquina multiensayo electromecánica INSTRON 5967. Puesto que para el caso de las probetas de material vítreo no se produce indentación de los rodillos la flecha alcanzada durante el ensayo se toma directamente del sensor del sensor de recorrido de la propia máquina sin necesidad de instalar un sistema de medición externo. El estándar establece las condiciones que deben cumplir las probetas del material a caracterizar para asegurar que no existen fuentes de error que puedan falsear los resultados obtenidos:

- La sección transversal de la probeta es perfectamente circular y uniforme a lo largo de su longitud.
- La probeta es perfectamente recta en toda su longitud.
- Los bordes del rodillo de carga no ejercen fricción sobre la superficie de la probeta.
- La línea de apoyo de la probeta es paralela a la superficie de apoyo de los rodillos inferiores. Es decir, la línea de carga y la línea de los soportes son totalmente paralelos.

- No hay perturbaciones del campo de tensiones en los en los apoyos y en la línea de carga ni en ningún otro lugar de la probeta debido a concentraciones de tensiones.

5.4.2 Fabricación de las probetas de material vítreo

En la fabricación de las muelas de alúmina vitrificada el grano abrasivo es mezclado con el aglomerante en polvo, agua y otros aditivos formando una mezcla que se introduce en el molde y es prensada. Posteriormente la muela en verde se introduce en un horno en el que se somete a un ciclo de sinterizado siguiendo unas curvas de calentamiento y enfriamiento controlado.

La fabricación de las probetas de vítreo se basa en este proceso; se crea una masa a partir del aglomerante en polvo, agua y Carboximetilcelulosa, se prensa dando la preforma cilíndrica, se seca a temperatura ambiente para eliminar la humedad y se somete a un ciclo de sinterizado que se detalla en el siguiente apartado, de acuerdo con las recomendaciones del fabricante. Se añade una pequeña cantidad del carboximetilcelulosa o goma de celulosa para conseguir mejorar la consistencia de la mezcla y facilitar su moldeado. Las probetas ensayadas se fabrican a partir de distintas mezclas cuya proporción se indica en la Tabla 17.

Tabla 17: Proporción de la composición de las mezclas empleadas en la fabricación de las probetas del aglomerante.

	% vítreo	% agua	% goma
Mezcla 1	70.24	28.94	0.82
Mezcla 2	69.93	28.92	1.15
Mezcla 3	68.82	30.23	0.95
Mezcla 4	73.3	25.88	0.82

Para conseguir dar la forma cilíndrica a la masa que se obtiene de estas mezclas es necesaria la fabricación de un molde. Se fabrican varios moldes de distintos materiales como se muestra en la Figura 34, buscando, además, distintas estrategias de llenado, compactación y extracción de las probetas. El estándar marca que las probetas deben tener una sección constante, recta y libre de marcas, poros o grietas que favorezcan la concentración de tensiones.

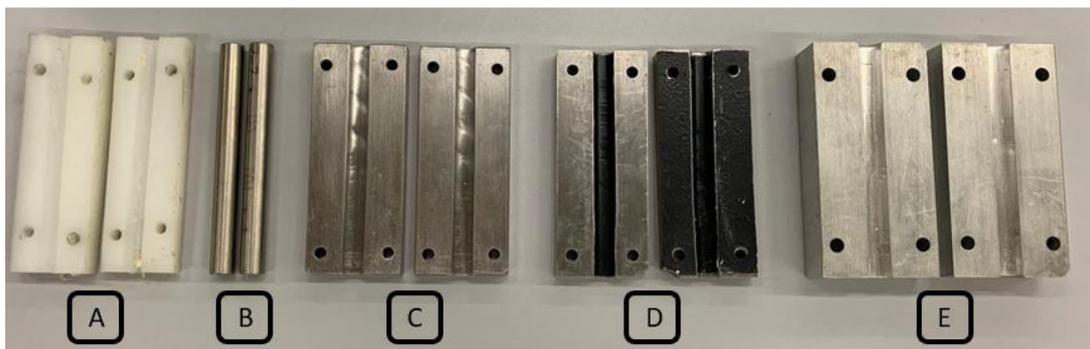


Figura 34: A) Molde de Nylon, B) Molde por extrusión de acero, C) Molde de acero, D) Molde de acero con cinta, E) Molde de aluminio.

Las probetas con menos imperfecciones se consiguen con el molde de acero. La superficie de contacto entre las dos mitades del molde es rectificada con una muela de

alúmina vitrificada. Se prueban varias técnicas para la lograr la extracción de la probeta del molde sin generar daños sobre esta. La extrusión de la probeta con el molde cerrado mediante la introducción de un vástago por un extremo resulta la opción más eficiente. El orificio central se repasa con un escariador para facilitar el deslizamiento de la probeta durante la extrusión.

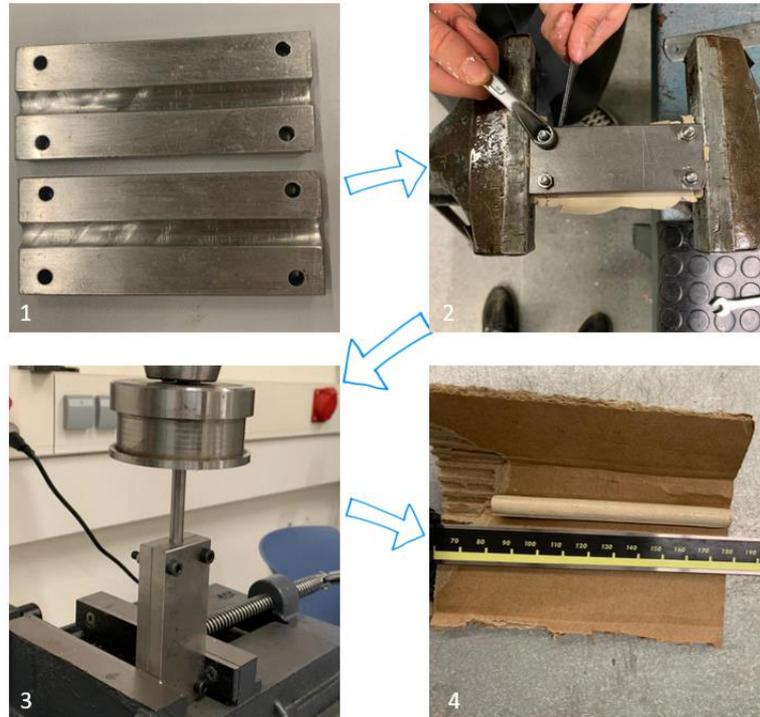


Figura 35: Proceso de fabricación de las probetas de aglomerante vítreo en verde.

En la Figura 35 se muestra las operaciones que se llevan a cabo en la fabricación de las probetas en verde:

1. En primer lugar, se limpian las dos partes del molde y se lubrica el orificio para facilitar la extracción de la probeta.
2. Se asegura una de las partes del molde y se rellena el orificio con la masa de vítreo humidificada. Se cierra el molde y se colocan las tuercas y tornillos de fijación ayudándose de un par de llaves. Se retira el exceso de agua y masa que rebasan por los laterales del molde.
3. Se coloca verticalmente el molde, tapando el orificio inferior. Se aplica presión introduciendo un vástago por el orificio libre. Se vuelve a introducir masa del material vítreo y se repite el proceso de compactación.
4. Se libera el molde de la posición vertical y con ayuda del vástago se realiza la extracción de la probeta introduciéndolo por uno de los orificios. Tras esta operación se debe dejar la probeta cerca de una estufa un tiempo aproximado de 1 día para conseguir eliminar el excedente de humedad.

El ciclo de sinterizado se realiza teniendo en cuenta el ciclo al que se someten las muelas de alúmina vitrificada, que se muestra en la Figura 36. Se muestra además el ciclo al que se someten las probetas de vítreo. En la figura se muestra el ciclo de sinterizado al que se someten las muelas de alúmina vitrificada. Se muestre además el ciclo de sinterizado al que se someten las probetas de vítreo, que se ajusta a los

parámetros del sistema de control del horno. Por las limitaciones del horno la pendiente de la curva de calentamiento en este caso es menos pronunciada lo que únicamente implica que el proceso está más controlado, aunque sea un ciclo más largo.

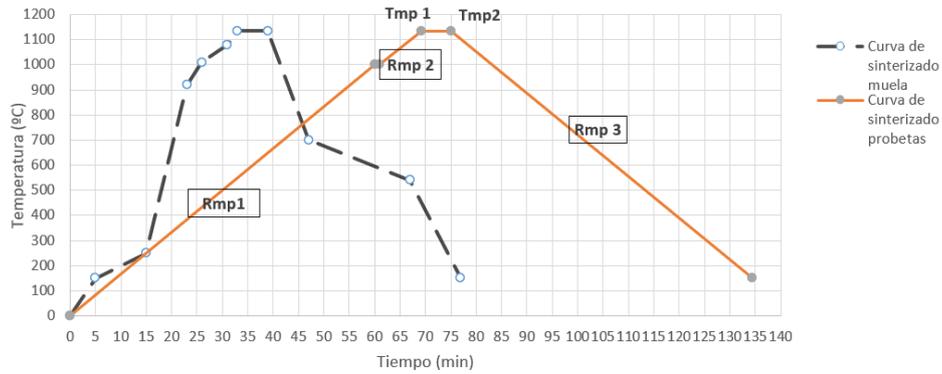


Figura 36: Ciclo de sinterizado de probetas de vidrio.

Las probetas se introducen en el horno sobre un ladrillo refractario que es previamente sometido a un ciclo de secado a 60°C para eliminar la humedad. Finalmente se obtienen un total de 9 probetas como las que se muestran en la Figura 37, que cuya superficie es limada con un papel de lija P80 para eliminar imperfecciones a nivel superficial.



Figura 37: Probetas de aglomerante vítreo tras el ciclo de sinterizado.

5.4.3 Resultados de la caracterización mecánica de material vítreo

Por la irregularidad en la sección de las probetas y las porosidades que se pueden ver a simple vista se realiza la medición individual de la variación de su sección ya que es un parámetro que puede influir fuertemente en la caracterización del material.

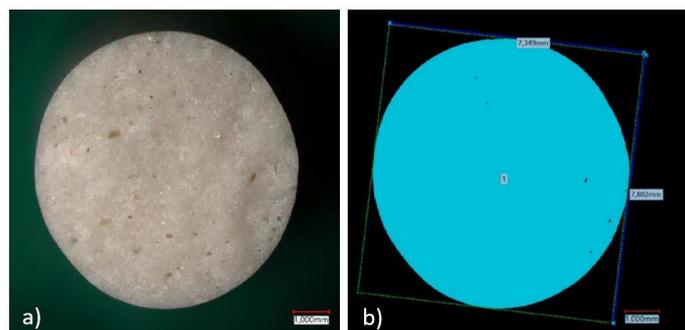


Figura 38: a) Sección ovalada de una probeta de aglomerante vítreo, b) medición de \varnothing y \varnothing_2 de la probeta ovalada.

En la Tabla 18 se muestran los resultados obtenidos de las mediciones de las probetas. Con ello se ve como no se cumplen los requisitos dimensiones de las probetas que se imponen en la norma. De la obtención de la densidad de las probetas se encuentra que la desviación típica de la muestra es alta. Por tanto, no hay homogeneidad entre ellas.

Tabla 18: Medición de las dimensiones de las probetas ensayadas.

	Peso	Largo	Ø	Ø2	Volumen	Densidad
	(gr)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm³)	(kg/mm³)
Probeta 1	8.72	87.35	8.88	7.53	4585.31	1901.73
Probeta 2	8.86	77.62	8.40	-	4301.69	2059.65
Probeta 3	6.74	86.72	7.77	-	4108.45	1640.52
Probeta 4	8.19	85.46	8.25	7.64	4230.58	1935.90
Probeta 5	8.76	87.76	7.95	7.43	4071.39	2151.60
					\bar{x}	1867.30
					σ	193.80

Para estudiar el grado de compactación que se consigue durante la fabricación de las probetas se realiza el procesamiento de una imagen (Figura 39) tomada con el microscopio SEM de la sección de una probeta de vítreo. Para este caso, la porosidad representa un 18,74% del área total de la sección. Este es un nivel alto de porosidad el cual puede reducir las propiedades mecánicas obtenidas de los ensayos experimentales.

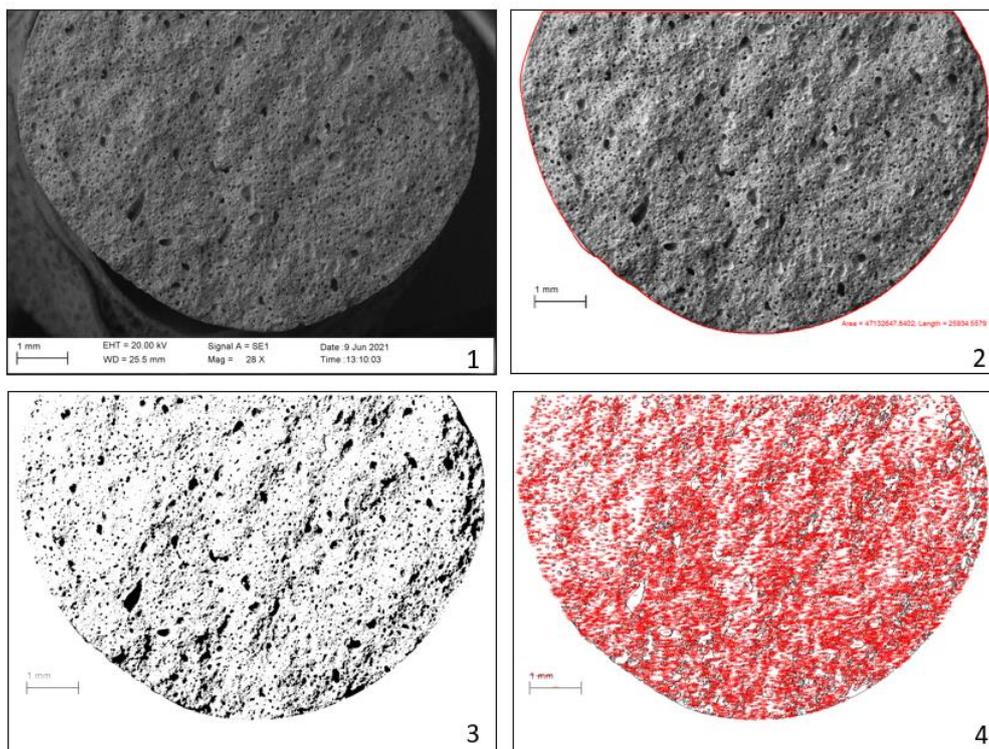


Figura 39: Tratamiento de imagen SEM de la sección de una probeta de aglomerante vítreo con Image J.

Aunque el estándar que se ha seguido marca un número mínimo de 30 probetas a ensayar, se ensayan únicamente 5 probetas por la dificultad que ha supuesto la fabricación de probetas de vítreo de alta relación de aspecto libres de grietas o marcas.

En la Tabla 19 se muestran los resultados obtenidos de la caracterización del material vítreo. El valor medio de la resistencia a la fractura (22,86 MPa) que es capaz de soportar las probetas de vítreo son notablemente bajos.

Tabla 19: Resultados del ensayo de flexión a 3 puntos de las probetas de aglomerante vítreo.

	F_{max}	Flecha	Inercia	E	σ_{ult}
	(N)	(mm)	(mm⁴)	(Gpa)	(MPa)
Probeta 1	69.689	0.14	305.23	11.65	15.98
Probeta 2	83.179	0.1769	201.06	16.71	28.96
Probeta 3	71.167	0.1415	201.06	17.87	24.78
Probeta 4	63.525	0.1333	201.06	16.94	22.12
Probeta 5	64.54	0.1533	201.06	14.96	22.47
			\bar{x}	15.63	22.86

Si comparamos la resistencia última a la fractura obtenida en la caracterización de las 3 tipologías de muela del apartado anterior con la resistencia a la fractura alcanzada por las probetas durante el ensayo de flexión (Tabla 20) se puede ver como la resistencia del aglomerante define la resistencia de la muela, siendo ambos valores del mismo orden. La presencia de distintos tipos de grano de alúmina, de propiedades mecánicas muy superiores a las del vítreo y diferentes entre sí ($\sigma_{ultMA}=2100$ MPa, $\sigma_{ultCBL}=1400$ MPa) apenas afecta en los resultados de la caracterización de las probetas de alúmina vitrificada que difieren entre sí un 3.98%. Esto indica que el fenómeno de desgaste predominante, que define la fractura de la muela bajo una carga estática es la fractura del aglomerante.

Tabla 20: Comparativa entre la tensión última del vítreo, muela y granos de alúmina.

	Probetas de aglomerante	Grano monocristal	Grano convencional	Muela 5MBA	Muela MA	Muela CBL
σ_{ult} (Mpa)	22.86	2100	1400	17.69	17.11	16.47

Si comparamos el módulo elástico obtenido en la caracterización de la muela de alúmina del apartado anterior con el comportamiento elástico del aglomerante vítreo durante estos ensayos se ve como, en el caso del compuesto, presenta un comportamiento más rígido. Esto se debe principalmente a la incorporación en la muela de la porosidad inducida. Implica la reducción de la sección de vítreo que soporta los esfuerzos y que consta de, como se ha visto, una baja resistencia frente a la flexión. Los puentes de vítreo llegan por tanto a la fractura de una forma prematura al no poder deformarse por su reducida sección.

Los valores de la caracterización del aglomerante vítreo serán empleados en el siguiente capítulo para la simulación computacional del ensayo de flexión a 3 puntos realizado sobre las probetas de alúmina vitrificada.

Conocer las propiedades mecánicas individuales de los materiales que componen las muelas de alúmina vitrificada no es suficiente para comprender como se produce y evoluciona la fractura de la muela, como un material compuesto que se puede entender. Es necesario tener en cuenta, además, factores como la proporción de cada componente, el nivel de porosidad, el tamaño de los granos o poros y el nivel de adhesión que se da entre los constituyentes. La influencia de estos parámetros será estudiada en los siguientes capítulos para alcanzar una comprensión más detallada de los factores que favorecen la fractura de las muelas de alúmina vitrificada.

6. Análisis microscópico de la fractura de las muelas abrasivas

6.1 Introducción.

La caracterización de las muelas de alúmina vitrificada nos aporta información acerca de su comportamiento mecánico frente a un esfuerzo estático, es decir, la tensión que es capaz de soportar o su grado de rigidez. No obstante, del bloque experimental no se obtiene información a escala micro que nos pueda ayudar a comprender la naturaleza de las microfracturas que originan la macrofractura o grieta que produce el fallo final del material. Para ello se realiza un análisis visual a nivel microscópico de la cara de la fractura de distintas porciones de las probetas de muela ensayadas en el ensayo de flexión a 3 puntos. Se pretende así, analizar el estado de los componentes de la muela tras la fractura, para identificar el foco predominante que favorece el fallo del material.

Se realizan dos visitas al laboratorio singular de multiespectroscopias acopladas, con muestras de los bloques de ensayos experimentales 1 y 2 que se describen en el capítulo 5. De este estudio se han obtenido resultados que han permitido diseñar el modelo computacional final como se detalla en el capítulo 7.

6.2 Objeto del análisis

Se pueden definir los siguientes puntos como los objetos clave de la realización del análisis visual de las probetas:

- Identificar el fenómeno predominante que favorece la fractura.
- Identificar cuencas o cráteres que indiquen el fallo de adhesión entre grano-aglomerante.
- Estudiar a escala micro la conexión de los elementos del compuesto. Cómo se encuentran los granos de abrasivo conectados por el material aglomerante y cómo este los envuelve y recubre y en qué grado.
- Identificar los puentes de unión que conectan los granos abrasivos, su forma, tamaño y espesor para basar en ello el modelo de EF.
- Identificar los distintos factores que se dan en la superficie de fractura de la probeta sometida a tracción o compresión.

6.3 Descripción de instrumentación y equipos

- Microscopio SEM. Este equipo (Figura 40) permite hacer fotografía tanto a alto vacío (con metalización de las muestras) como a presión extendida o bajo vacío y muestras húmedas (sin necesidad de metalizar las muestras). Además de la toma de imágenes a escala micrométrica permite la obtención de los difractogramas (mediante EDX) de distintos puntos de la imagen o de ella en su totalidad. Esto permite obtener la composición química de la muestra además de observar su textura de forma detallada. Está dotado con un detector de

electrones secundarios (SIM), con detector de electrones retrodispersados y con un analizador elemental EDS. Consta de un cañón de emisión de electrones, que permite una resolución máxima de la imagen de 0,8 nm a 15 Kv, de 1,4 nm a 1kv y 2,4 nm a 0,2 Kv. El rango de potencial de aceleración está comprendido entre 0,02 V y 30 kV.

En concreto se ha empleado el microscopio electrónico de barrido (SEM) del laboratorio singular de multiespectroscopias acopladas (LASPEA) de los Servicios Generales de Investigación (SGIKER) de la Universidad del País Vasco. El rango de potencial de aceleración está comprendido entre 0,02 V y 30 kV. Se realizan tanto la toma de imágenes como los mapeados de alúmina y silicio en distintas zonas de muestras de las tres tipologías de muela con un aumento de 50x, analizando un área de 1,83x2,26 mm.



Figura 40: Equipo de Microscopía de Barrido Electrónico Carl Zeiss EVO-40.

- Metalizador por sputtering. Este equipo permite el recubrimiento de muestras de gran tamaño con diámetros de hasta 300mm. Es adecuado para la preparación de muestras para SEM utilizando metales no oxidantes (nobles). Cuenta con dos targets secuenciales, permitiendo la deposición consecutiva de dos capas de metal sin necesidad de romper el vacío. Mantiene el sistema de despresurización (bomba de vacío rotatoria y turbobomba molecular) fuera de la cámara para evitar la contaminación del ambiente de ésta.



Figura 41: Equipo metalizador por sputtering.

6.4 Análisis microscópico SEM

6.4.1 Primer análisis SEM-EDX

En este primer análisis el objeto principal de la observación es estudiar el fenómeno de fallo predominante entre la fractura de los puentes de vítreo y el fallo de adhesión en la intercara entre aglomerante y grano. Se estudian 3 tipos distintos de muestras:

- Muestra 1: 2 porciones de 2x2x1,5cm (aprox) extraídas (cortada por un disco A80J-B) de las probetas de 5MVA usadas en el bloque 1 de los ensayos de tracción a 3 puntos.
- Muestra 2: Polvo de aglomerante+alúmina desprendido del ensayo de flexión de las probetas de la muestra 1.
- Muestra 3: Granos de Alúmina desprendidos de una muela durante el rectificado de un material férreo. Esta muestra puede contener restos o virutas provenientes del rectificado. Además, también puede contener restos de pegamento ya que la muestra se ha colocado sobre un film transparente adherente.

Se debe tener en cuenta que en las 3 muestras hay una mezcla de granos de alúmina policristalinos y monocristalinos por lo que se puede dar rotura del abrasivo inter y transgranulares. El tamaño medio de los granos es de 330 μm . Como se muestra en la Figura 42 se realizan dos cortes a una de las secciones de las probetas ensayadas para extraer las dos muestras a analizar. Con ello se consigue una muestra de la parte superior de la probeta sometida a compresión y de la parte inferior de la probeta sometida a tracción.



Figura 42: Obtención de muestras de las probetas de 5MVA.

Previo a la introducción de las muestras en el equipo SEM se introducen en el equipo metalizador por sputtering para darles un recubrimiento de oro como se muestra en la Figura 43.



Figura 43: Recubrimiento de oro sobre las muestras de alúmina monocristal.

La microscopía SEM es una técnica que consiste en barrer con un haz de electrones sobre un área de la muestra, mientras que en el monitor se visualiza la imagen a escala de grises que posibilitan estudiar detalles de su morfología. Dichas imágenes tienen tonos más oscuros o más claros dependiendo del peso atómico de cada elemento presente. Un sistema EDX acoplado a un microscopio electrónico proporciona información complementaria de gran importancia puesto que pueden realizar microanálisis puntuales y mapeados de la muestra. La espectroscopía de rayos X dispersiva de energía (EDX) analiza los rayos X característicos generados a partir de la interacción haz de electrones y muestras para proporcionar la composición elemental de la muestra en la forma de espectros (histogramas) en los que se pueden identificar elementos individuales. Los picos en los espectrogramas corresponden a líneas de rayos X característicos de un elemento específico. Así, los espectros proporcionan caracterización química cuantitativa de las muestras. En el caso de este proyecto, únicamente interesa la información cualitativa de los espectrogramas. Es decir, en función de si el espectrograma muestra una mayor intensidad en los espectros del Silicio o el Aluminio, se puede determinar si la zona analizada corresponde al material vítreo o la alúmina.

6.4.1.1 Resultados de la observación

De la observación de las imágenes tomadas en este primer análisis sobre las porciones de alúmina vitrificada se reconocen una serie de signos que permiten la identificación de cada material. Como ejemplo se puede tomar la imagen de la Figura 44, en la que se muestra la fractura de un puente de material vítreo. Se observa en la zona central un defecto de porosidad. Este tipo de defectos no se podrían dar dentro de la estructura cristalográfica de los granos abrasivos por la forma en la que se fabrican.

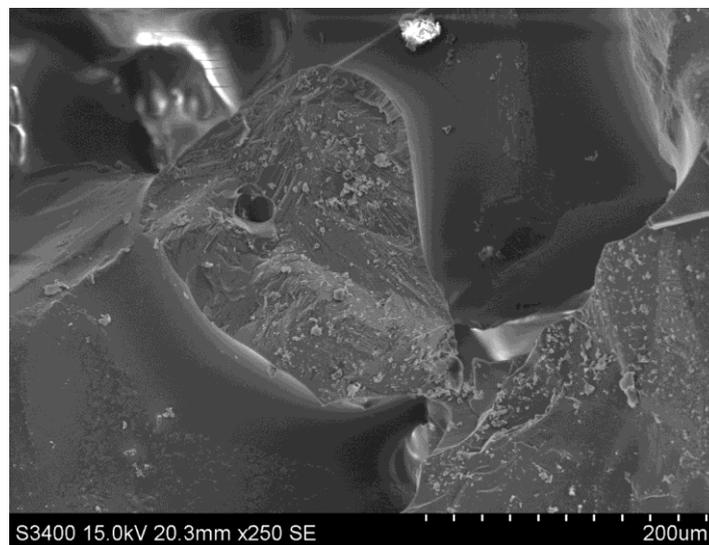


Figura 44: Fractura de aglomerante vítreo.

En general se ven poros en las caras de fractura del aglomerante, lo cual se puede deber a defectos o burbujas surgidos durante la cocción de la muela y que actúan dentro del propio aglomerante como un defecto que incita a la propagación de la grieta. El aspecto de la superficie que rodea la zona de fractura es de un material fluido. Para la fabricación de las probetas se las somete a una curva de sinterizado dentro de un horno con lo que se consigue que el material vítreo se funda y recubra los granos abrasivos.

El aspecto superficial de los granos abrasivos es en cambio, más rugoso (a escala 250:1). Además, un aspecto que se repite en el fallo de los puentes de material aglomerante es la marca clara que deja el perímetro de la cara de la fractura.

En cuanto a la composición de la muela, se ve de forma clara como el material vítreo cumple con su función, envolviendo todos los granos y uniéndolos, dejando entre ellos una determinada distancia. En la Figura 45 se ve un claro ejemplo de dos granos de alúmina abrasiva que se encuentran conectados por un esbelto puente de aglomerante vítreo de unas 100 μm de longitud y 40 μm de espesor.

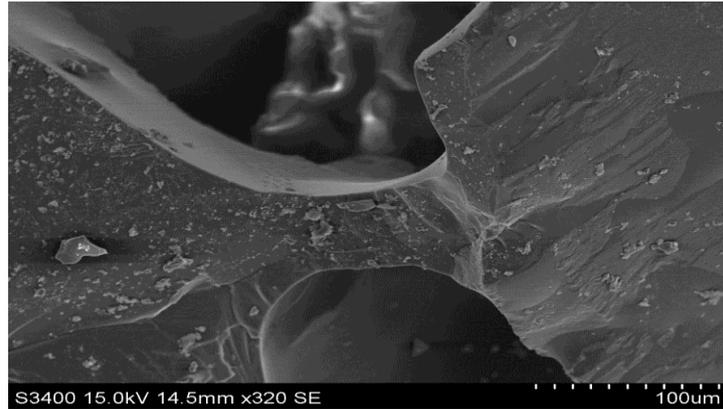


Figura 45: Puente de unión de material vítreo entre dos granos abrasivos

En la Figura 46 se puede ver en la parte central de la imagen a) un grano de alúmina (por su tamaño y filos) embebido en aglomerante. En la periferia de este grano se puede observar la rotura frágil de dos puentes del propio aglomerante. Se identifican en base a lo expuesto anteriormente; la porosidad y la marca en la periferia de la fractura. En la superficie de fractura se observan las grietas propias de la rotura por clivaje que se han dado en la dirección de la flecha blanca. En la imagen c) se muestra la deflexión con otra intercara del aglomerante.

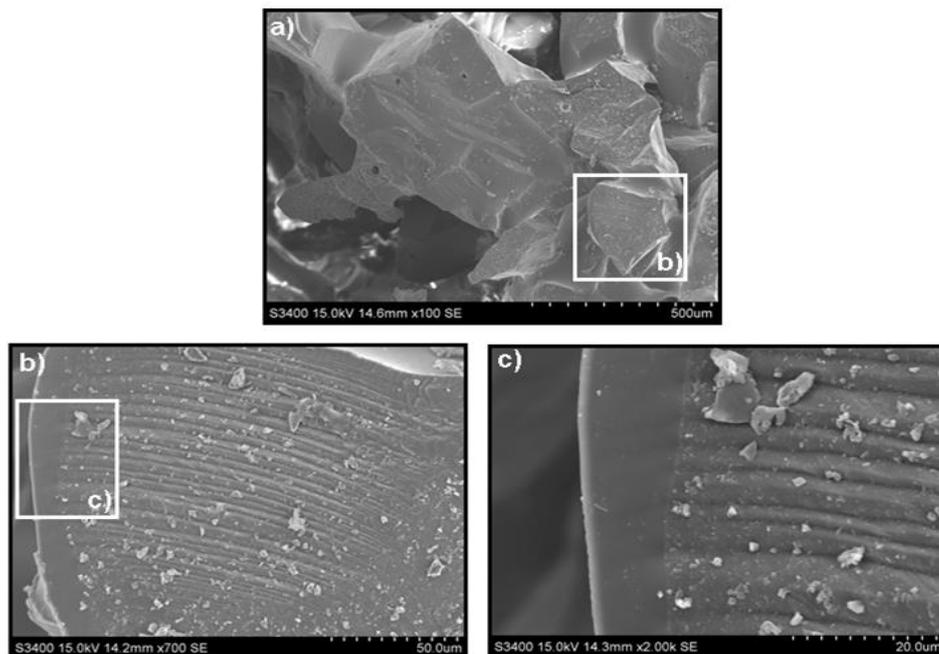


Figura 46: Imagen SEM de la fractura de las probetas del bloque experimental 1 (5MBA).

Se ha realizado un análisis EDAX en la misma zona en la que se han tomado las imágenes SEM. Con el objeto de identificar al abrasivo y aglomerante, se muestran en rojo las zonas en las que la energía del espectro del aluminio es mayor (presencia de alúmina) y en verde para el Silicio (presencia de aglomerante vítreo). En la Figura 47 se aprecian distintos fenómenos de fractura, tanto del grano abrasivo como del aglomerante. Los granos abrasivos presentan las marcas propias de clivaje en la cara de fractura.

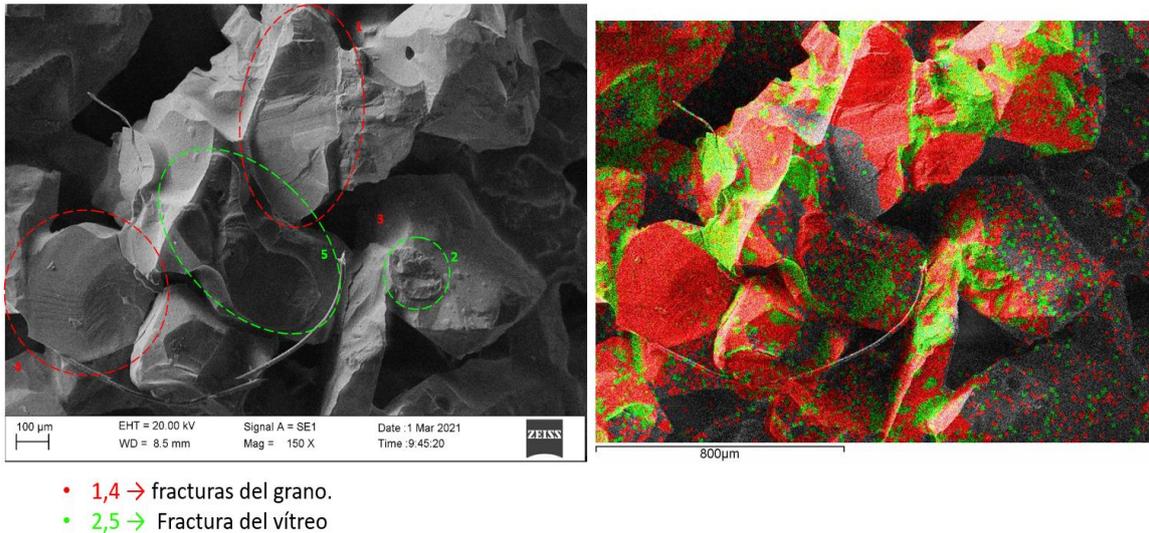


Figura 47: Imagen SEM y análisis EDAX de la fractura de probeta de 5MBA.

En la Figura 48 se muestran las imágenes tomadas de la zona sometida a tracción. En este caso se pueden observar fracturas de distinta naturaleza. Entre ellas se pueden ver fracturas del grano desemejantes (3 y 5). Para la fractura 1 se vuelve a ver un claro ejemplo de la rotura del aglomerante vítreo, que rompe en la zona próxima al grano que conecta, pero no se produce un desconchamiento en la intercara.

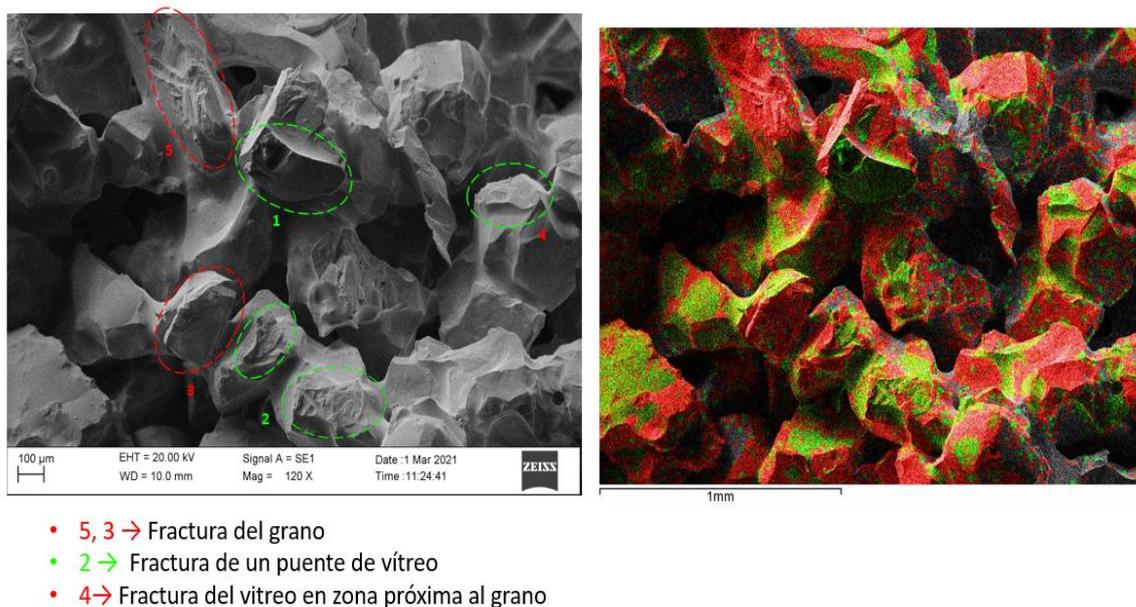
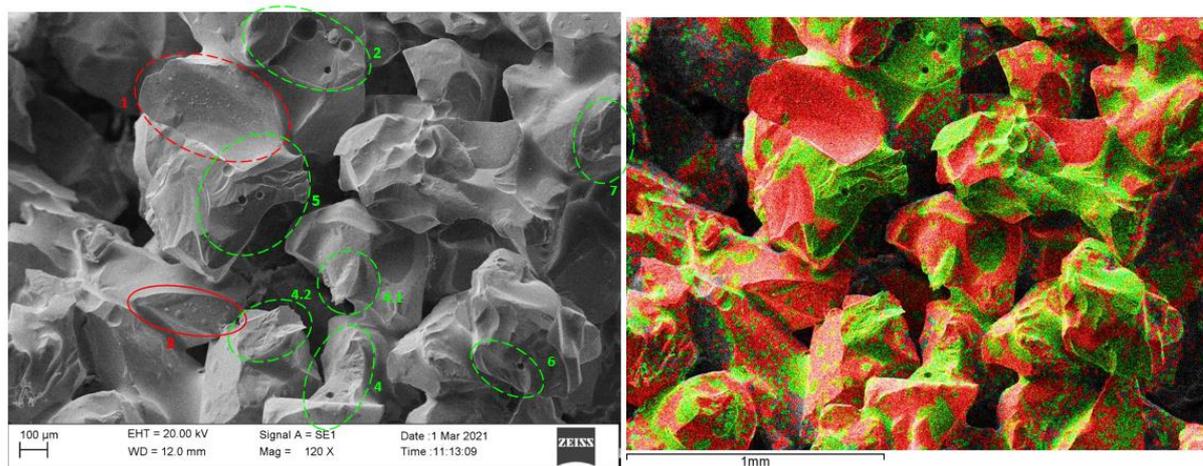


Figura 48: Imagen SEM y análisis EDAX de la fractura de probeta de 5MBA (tracción).

Aunque si se llegan a apreciar en varias zonas los posibles desconchamientos de conjuntos de puentes de vítreo por la continuidad de la fractura (Figura 49), no se detectan marcas de cráteres que puedan sugerir que se da una fractura en la intercara grano-aglomerante. El fenómeno de fractura predominante que se identifica es el fallo del propio aglomerante. Aun así, se ve cómo parte de los granos de alúmina se han fracturado. Estas primeras probetas del primer lote contienen una mezcla a partes iguales de alúmina monocristal y alúmina convencional. Es por ello por lo que no se puede identificar la naturaleza del grano fracturado o no fracturado y lo que promueve la realización de los ensayos experimentales con un nuevo lote de probetas con el 100% de cada tipología de estructura cristalográfica de alúmina.



- 1 → Posible fractura de grano
- 3 → Filo de grano expuesto.
- 2,5 → Fractura de puente de aglomerante
- 4, 4,1, 4,2 → Desconchamiento de aglomerante

Figura 49: Imagen SEM y análisis EDAX de la fractura de probeta de 5MBA (tracción).

Al analizar el polvo extraído de los ensayos de flexión a 3 puntos en el que está mezclados los dos componentes de la muela, se ven fragmentos de múltiple dispersión de tamaños (Figura 50). Se pueden ver fragmentos de mayor tamaño (de hasta 300µm) que únicamente pueden ser granos de alúmina envueltos en parte de aglomerante. Además, para en estos fragmentos mayores se ven marcas de porosidad, que solo pueden pertenecer al aglomerante vítreo. La mayor parte de los fragmentos tienen un tamaño de entre 100 y 200 µm. Estos pequeños fragmentos pueden ser tanto fragmentos de grano convencional que se han fracturado como de aglomerante vítreo. De nuevo en este caso la mezcla de alúmina convencional y monocristal impide la identificación del elemento fracturado. En el caso de que el polvo contuviera únicamente alúmina de estructura monocristal, que en base a la teoría de rectificado no se puede fracturar intragranularmente, se podría deducir que todo lo que tenga un tamaño inferior al radio mínimo de grano (330µm) es aglomerante.

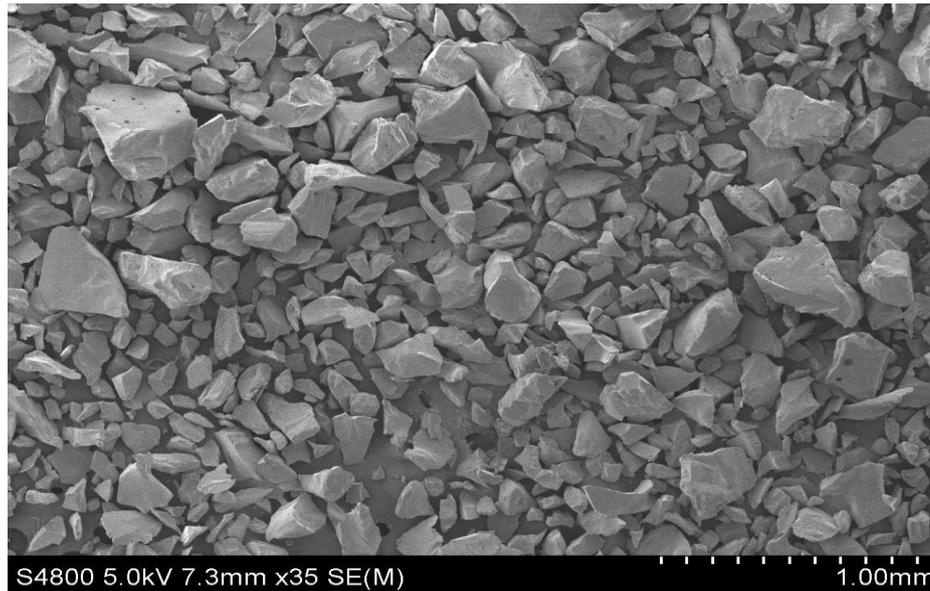


Figura 50: Polvo desprendido del ensayo de flexión a 3 puntos del bloque 1 (5MBA).

En la Figura 51 se muestra una imagen tomada de un grano desprendido durante la operación de rectificado. No se puede apreciar si ha sido por rotura intergranular, por adhesión o por rotura de puente, aunque el tamaño del grano de unas 400 μ m apunta a que no se ha desprendido por su propia fractura, sino que se trata de un grano envuelto, en algunas zonas, de aglomerante vítreo. Se observan diferentes rugosidades, las de apariencia más fluida pertenecen a partes de aglomerante que sigue adherido. Se aprecian, además, varios filos definidos del propio grano de la alúmina.

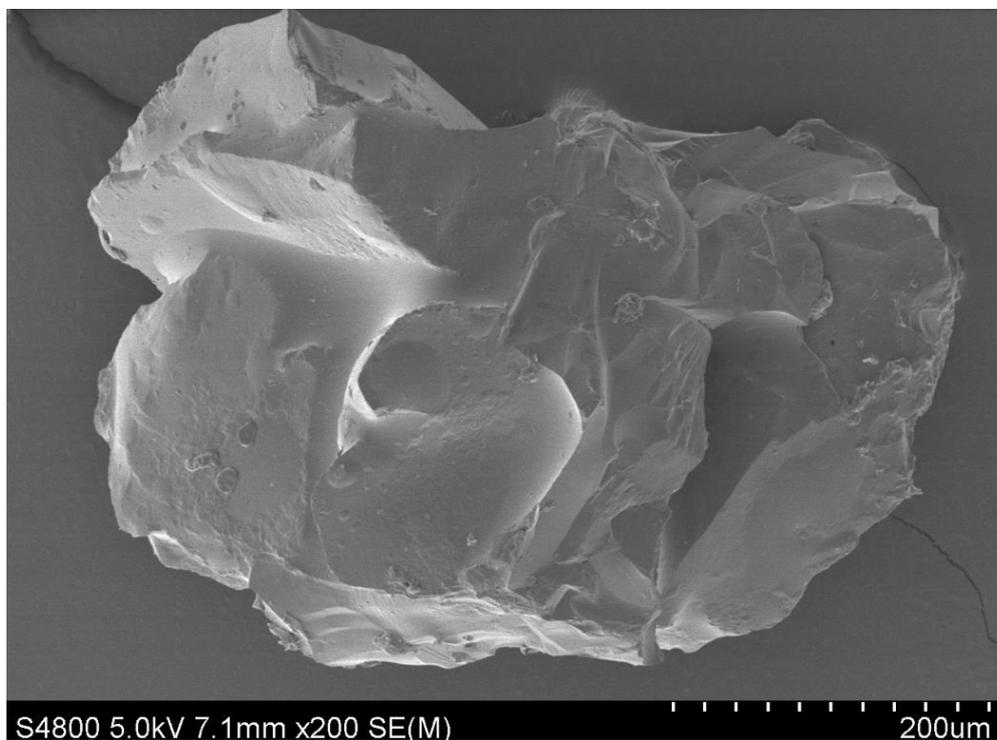


Figura 51: Grano de alúmina desprendido de una operación de rectificado.

En la Figura 52 se muestra otro grano tomado de la misma muestra. Se puede identificar la unión de dos cuerpos. Por su tamaño de unas 300 μm , el cuerpo de la elipse azul es un grano de alúmina, que se ha desprendido por rotura de puente (elipse roja). La parte superior tiene la apariencia fluida propia del aglomerante.

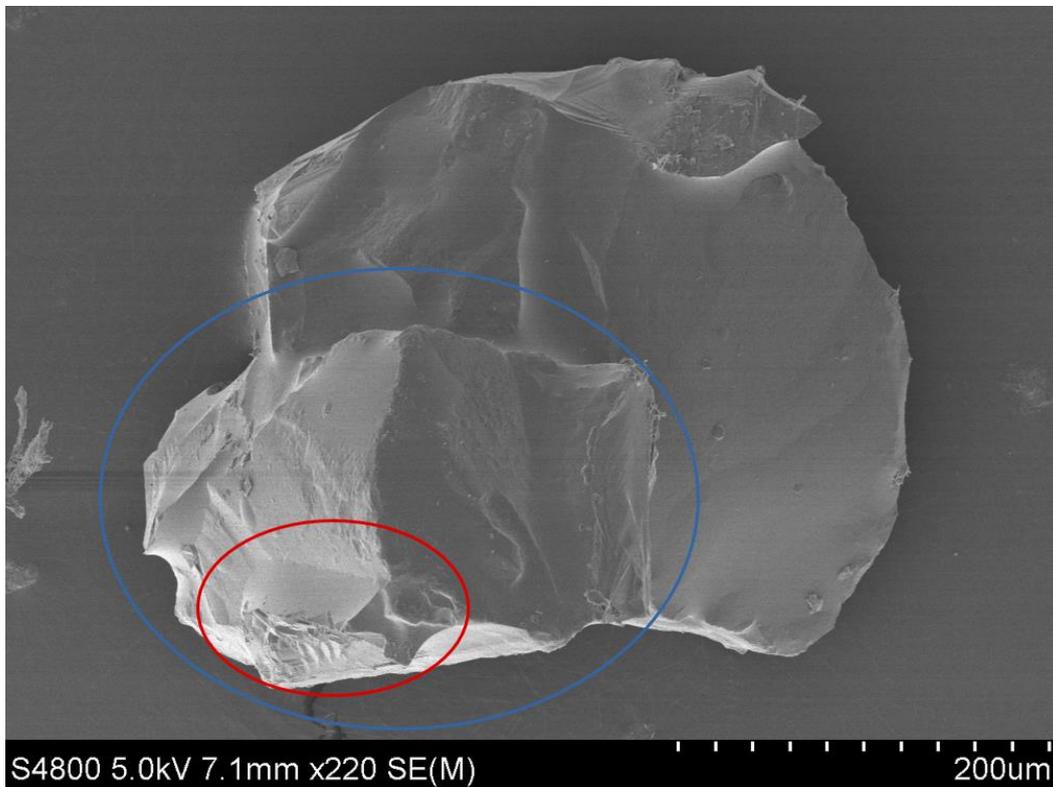


Figura 52: Grano de alúmina desprendido de una operación de rectificado.

De este primer examen visual a escala micrométrica de las muestras que se han descrito se sacan las siguientes conclusiones:

- Se ven fracturas de ambos componentes. Predomina la fractura de los puentes de aglomerante vítreo.
- No se identifican marcas que sugieran la falla por falta de adhesión.
- No se puede identificar el tipo de estructura cristalográfica de los granos de alúmina no fracturados. Supone esto que no se puede identificar la propensión a la fractura del grano convencional.
- Se aprecian más fracturas de grano en la zona sometida a tracción.

En base a estas observaciones se cambia el enfoque del proyecto que estaba inicialmente centrado en la fractura del aglomerante vítreo. Se descarta el fallo por adhesión grano-vítreo del modelo computacional que se desarrolla en el capítulo 7 y se introduce en el estudio la influencia del tipo de estructura cristalográfica en el comportamiento mecánico de la muela de alúmina vitrificada. Se realiza además el encargo de un nuevo lote de probetas en las que se varíe el tipo de estructura cristalográfica para realizar una repetición de los ensayos experimentales.

6.4.2 Segundo análisis SEM-EDX

Tras la realización del segundo bloque de ensayos de flexión a 3 puntos sobre el segundo lote de probetas se procede a llevar las siguientes muestras para realizar toma de imágenes SEM y análisis EDAX:

- Muestra 1: 2 porciones de 2x2x1,5cm extraídas (cortada por un disco A80J-B) de las probetas de 50 % grano convencional, 50% grano monocristal (5MBA) usadas en el ensayo de tracción a 3 puntos.
- Muestra 1: 2 porciones de 2x2x1,5cm extraídas (cortada por un disco A80J-B) de las probetas de 100% grano monocristal (MA) usadas en el ensayo de tracción a 3 puntos.
- Muestra 1: 2 porciones de 2x2x1,5cm extraídas (cortada por un disco A80J-B) de las probetas de grano 100% convencional (CBL) usadas en el ensayo de tracción a 3 puntos.

Al igual que en el análisis anterior se extraen dos muestras por cada probeta ensayada (zona de compresión y zona de tracción) y se les da un recubrimiento de Au en el equipo de metalizado por sputtering.

6.4.2.1 Objetivos

De este segundo análisis visual se busca estudiar los siguientes puntos:

- Identificar fenómeno de fractura predominante en cada muestra.
- Estudiar la influencia de la estructura cristalográfica en la progresión de la grieta que origina la fractura de la probeta.
- Verificar que no se dan fracturas intergranulares del grano monocristalino de acuerdo con la teoría básica del rectificado.
- Estudiar cómo afecta el tipo de grano en cuanto a su geometría (tamaño y filos) y superficie (rugosidad) a la forma en la que el aglomerante los envuelve y conecta.
- Discernir entre la fractura de aglomerante vítreo y grano abrasivo.
- Discernir entre los fenómenos de desgaste predominantes en la cara de la fractura sometida a tracción y compresión.

6.4.2.2 Resultados de la observación

La primera apreciación que se realiza sobre los análisis EDAX de las imágenes SEM tomadas es que existe una mayor proporción de material aglomerante (en verde) en las muestras de alúmina monocristal. Es decir, tras la fractura en la probeta de monocristal quedan menos zonas de grano expuestas (en rojo), al contrario que en el caso de la probeta de convencional donde el aglomerante se rompe por la zona cercana al grano. Esto nos puede indicar dos cosas; que la adherencia entre grano monocristal y material vítreo es alta y el grano monocristal frena la propagación de la grieta que se inicia en el aglomerante, que se ve obligada a ramificarse, al contrario que en el caso del convencional que la “obstaculiza” en menor grado.

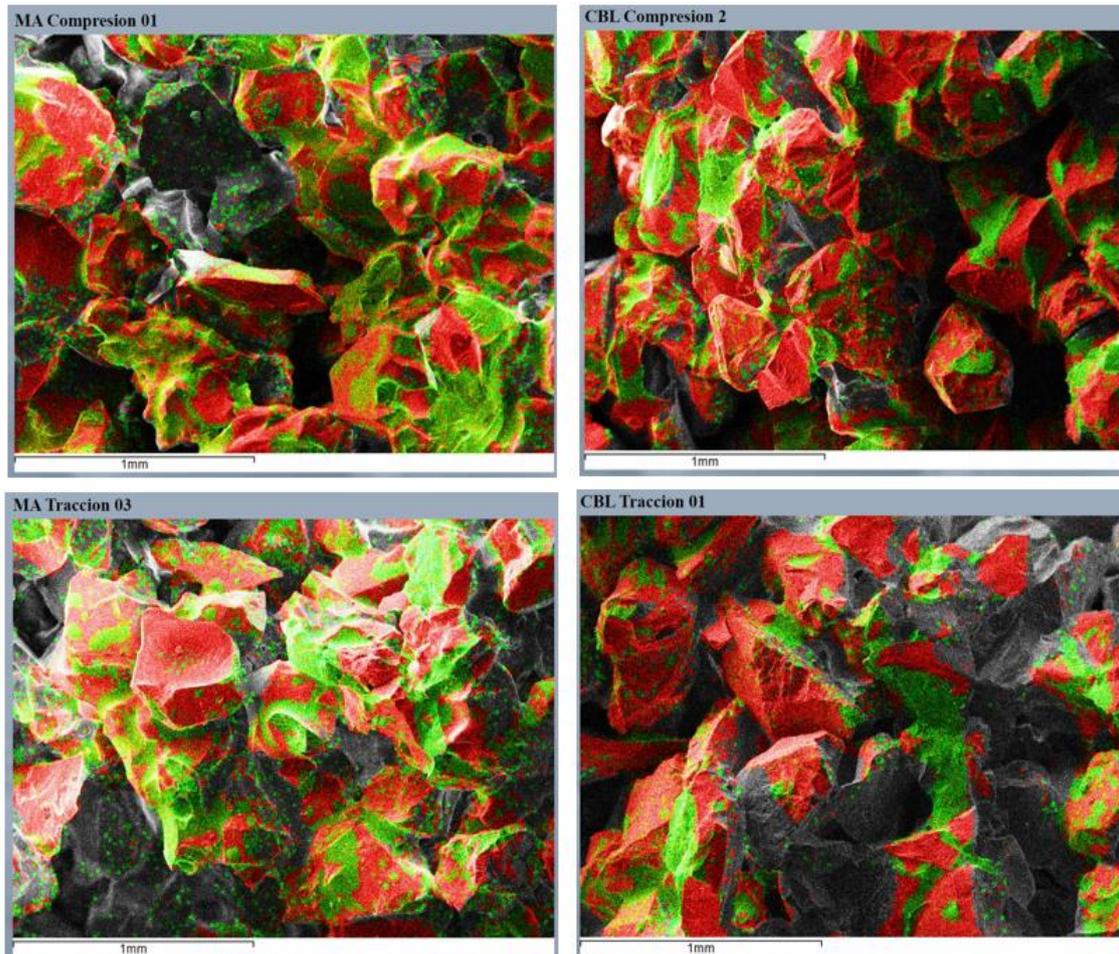


Figura 53: Análisis EDAX sobre probetas de alúmina monocristal (izqda) y convencional (dcha).

En general, ha sido más dificultoso conseguir imágenes de la muestra alúmina monocristal en las que se consiguiera enfocar el conjunto tomado en un mismo plano. Esto refuerza la idea de que el grano monocristal ayuda a frenar la propagación de la grieta, que se ve obligada a buscar distintos planos en busca del eslabón más débil.

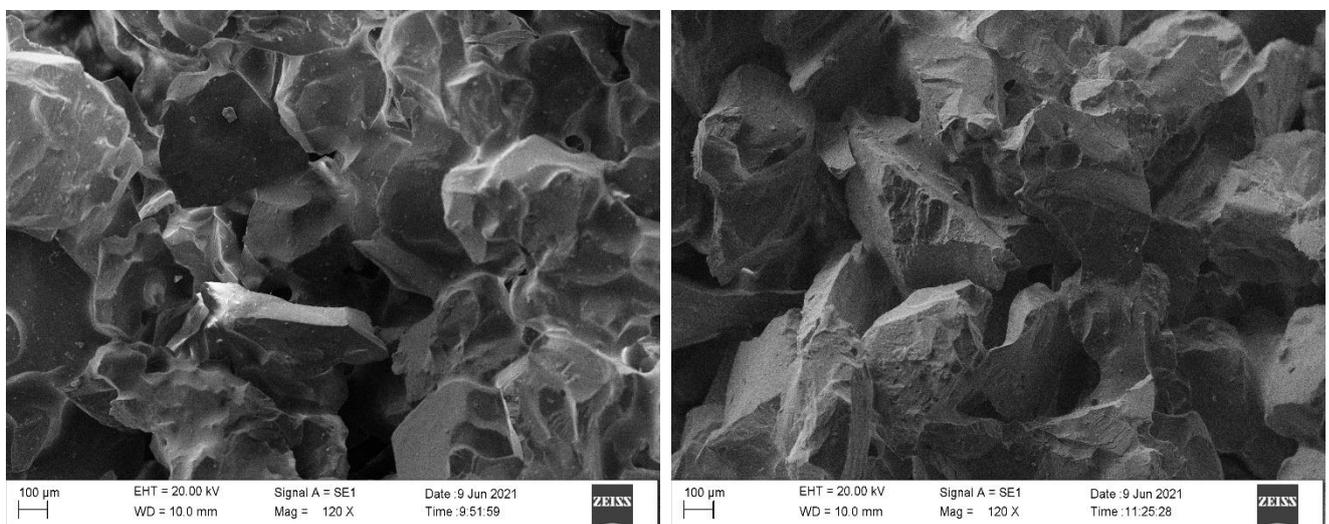


Figura 54: Fractura de probeta con MA en distintos planos (izqda), fractura en probeta de CBN en un mismo plano (dcha)

Se constata, a través de los análisis EDAX realizados en las mismas zonas de las imágenes SEM, los signos que permiten identificar las fracturas de los puentes de aglomerantes, (poros, marca perimetral en la cara de la fractura, superficie fluida). En la Figura 55 y Figura 56 se muestran imágenes tomadas de zonas de las probetas de alúmina monocristal y convencional sometidas a tracción. Se pueden identificar en ambos casos varias fracturas de puentes de alúmina. En la Figura 56 se pueden identificar además varios granos de alúmina convencional fracturados por las marcas de clivaje propias de los materiales cristalinos. La fractura por clivaje se puede definir como una propagación extraordinariamente rápida de una grieta, por la simple separación de los enlaces atómicos, a lo largo de un plano cristalográfico determinado [1]. En las probetas de monocristal no se observan granos fracturados ni marcas de clivaje.

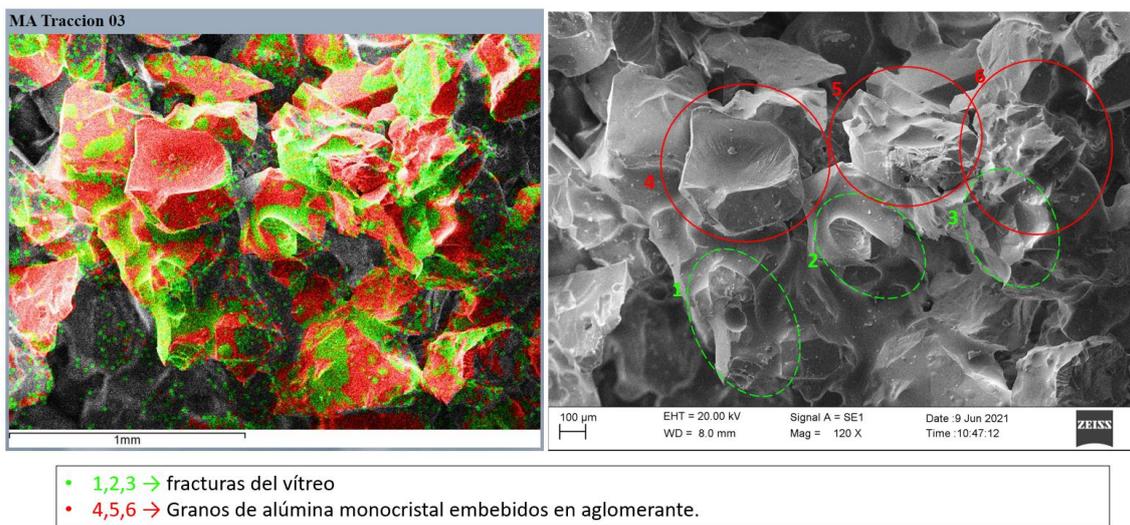


Figura 55: Análisis EDAX e imagen SEM de EDAX de la fractura de probeta de MA (tracción).

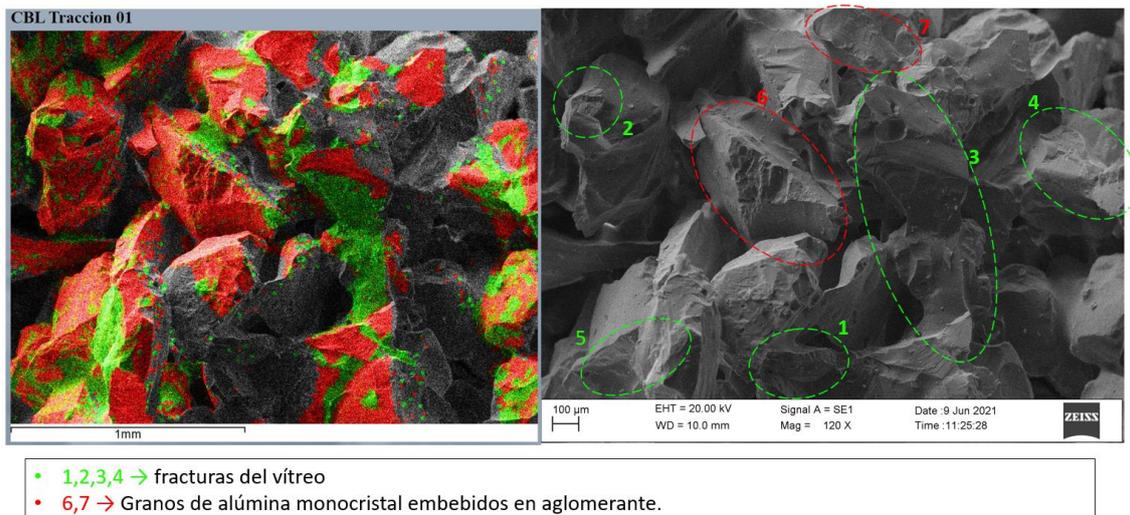


Figura 56: Análisis EDAX e imagen SEM de EDAX de la fractura de probeta de CBL (tracción).

Para el caso de las probetas de alúmina convencional se reconoce un mayor número de granos fracturados en las zonas sometidas a tracción (ver figuras 3 y 4). En todas las imágenes tomadas prevalece siempre la fractura del aglomerante vítreo.

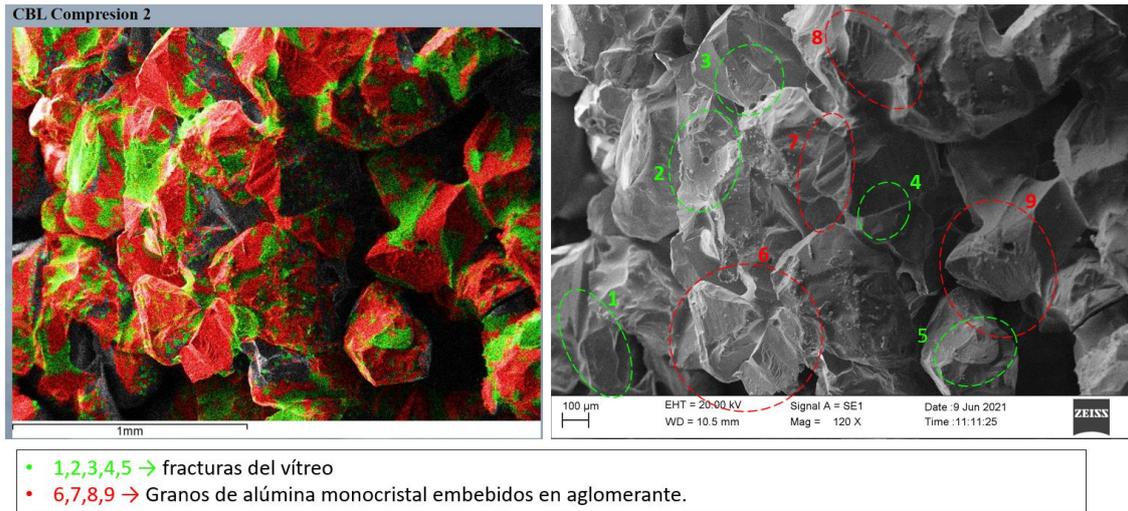


Figura 57: Análisis EDAX e imagen SEM de EDAX de la fractura de probeta de CBL (compresión)

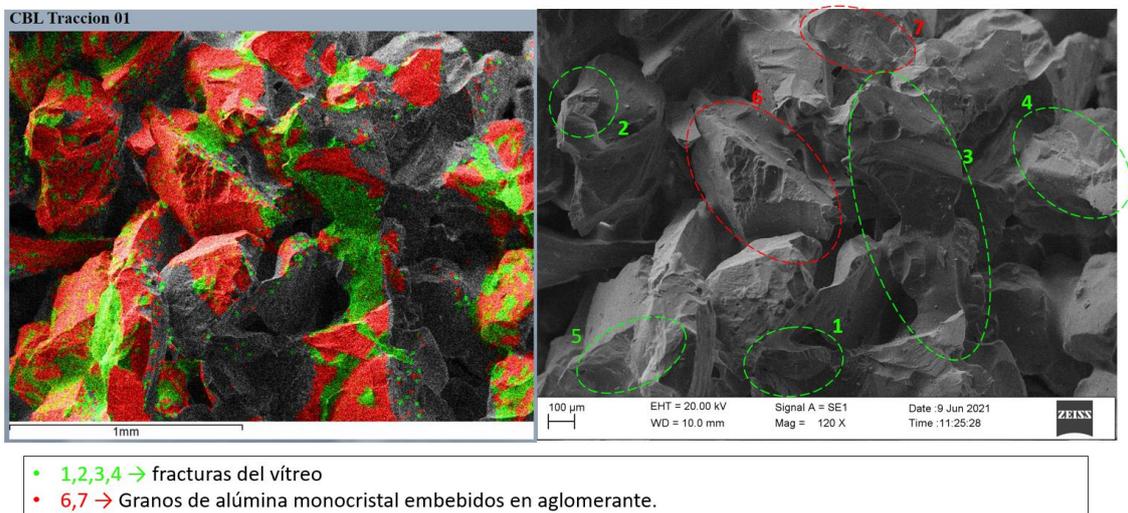


Figura 58: Análisis EDAX e imagen SEM de EDAX de la fractura de probeta de CBL (tracción)

De este segundo examen visual a escala micrométrica de las muestras que se han descrito se sacan las siguientes conclusiones:

- No se identifican granos de alúmina monocristal fracturados.
- La estructura cristalina de la alúmina influye en la propagación de la grieta. En las probetas de alúmina convencional se da la fractura en un mismo plano ya que el grano no frena la propagación de la grieta como en el caso del monocristal.
- No se identifican, de nuevo, marcas que puedan sugerir el fallo por adhesión en la intercara grano-aglomerante.
- El fenómeno de predominante es la fractura del aglomerante.
- Se observa un mayor número de granos convencionales fracturados en la zona sometida a tracción.

En el anexo del capítulo 10 se muestran todas las imágenes SEM y análisis EDAX realizados.

7. Simulación numérica de los ensayos de flexión a 3 puntos

7.1 Objeto del modelo

De la simulación del ensayo de flexión a 3 puntos sobre un modelo que represente el comportamiento mecánico de un stick de muela abrasiva como los que se han realizado experimentalmente se pretende obtener los siguientes aspectos:

- Predecir el comportamiento de la muela abrasiva frente a un esfuerzo estático en base al comportamiento de los elementos que la conforman.
- Estudiar la tendencia a la fractura predominante entre la fractura del aglomerante y la fractura del grano abrasivo de una tipología de muela en particular.
- Estudiar la forma en la que se transmiten los esfuerzos entre los materiales que constituyen la muela abrasiva.
- Estudiar la influencia que tiene el tipo de estructura cristalográfica de los granos de alúmina en el comportamiento mecánico de la muela frente a un esfuerzo estático.

Estos puntos que se desean estudiar tienen un objeto común, avanzar en la comprensión del fenómeno del desgaste volumétrico de las muelas de alúmina vitrificada. Para cada tipología de muela se debe realizar un modelo específico por la alta variación en cuanto a composición y estructura que existe dentro del mercado, siendo la metodología de diseño del modelo válida para cualquier tipología de muela abrasiva porosa.

7.2 Software empleado

Para el desarrollo de la metodología implementada en este trabajo y para la construcción del modelo se han empleado los programas informáticos:

- **Matlab.** Su nombre viene de la abreviación de MATrix LABoratory, es una herramienta de software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado con un lenguaje de programación propio, que está basado en matrices. Se ha utilizado para la generación de los comandos o macros que se emplean posteriormente en ANSYS APDL para la creación de la geometría del modelo. Se emplean además aplicaciones del propio programa como Distribution fitter para realizar el ajuste de distintas funciones de distribución a histogramas de dispersión.
- **ANSYS.** Ansys es un conjunto de programas CAE enfocados al diseño, análisis y simulación de piezas o componentes empleando el método de elementos finitos (FEM). Permite predecir cómo funcionará y reaccionará un determinado componente bajo un entorno real. Consta de varias plataformas, de las que se

han empleado Ansys APDL y Ansys Workbench. En concreto se ha utilizado la licencia de Ansys Student disponible en los equipos del campus.

- **Ansys Mechanical APDL.** APDL es el acrónimo de Ansys Parametric Design Language. Su manejo es menos intuitivo y más complejo que el del Workbench, pero permite la creación de la geometría del modelo mediante programación o implementación de macros. Se emplea dado que el alto número de cuerpos individuales que conforman el modelo y que imposibilita su creación de forma manual.
- **Ansys Workbench.** ANSYS Workbench es una plataforma de software de Ansys desde donde se pueden crear distintos proyectos a través de sus múltiples módulos. La simulación del modelo se realiza a través de este software debido a que su manejo es más intuitivo que el del APDL y permite el auto reconocimiento de los contactos, que no podría realizarse de forma manual dado el alto número de cuerpos. En concreto, se ha empleado el módulo de Análisis Estructurales. Permite simular el comportamiento tensional frente a un esfuerzo estático de las probetas ensayadas en el bloque experimental.
- **ImageJ.** Es un software estadístico de código abierto para el análisis y procesamiento de imágenes basado en lenguaje de programación Java. Permite calcular el área y las estadísticas de regiones de interés definidas por el usuario, medir distancias y ángulos y crear histogramas de densidad. Se emplea en el procesamiento de diferentes imágenes para definir las condiciones de la construcción del modelo 2D.

7.3 Propuestas para la modelización de las muelas abrasivas como materiales compuestos porosos.

Se realizan dos hipótesis que se desarrollan en los siguientes apartados. La realización del modelo está definida por el objeto de la simulación, la metodología numérica empleada, las condiciones de contacto y contorno de los elementos y las propiedades mecánicas de los componentes.

Para la construcción de la geometría del modelo, se han realizado diferentes diseños, que se han ido descartando en relación con la adaptación al comportamiento real, la compatibilidad computacional de los medios utilizados y el costo computacional que supone la modelización de cientos de miles de granos abrasivos de tan reducido tamaño ($\varnothing_{med}=330\mu m$). A continuación, se exponen las diferentes estrategias en las que se ha trabajado para alcanzar un modelo que se ajuste al fenómeno que se pretende estudiar y que tenga sentido computacional.

En todos los modelos planteados, se ha considerado la modelización de esferas para la representación tanto de los granos abrasivos, como de las porosidades de la muela. Como se comenta en el capítulo 4, esto reduce la complejidad del proceso de modelización al depender únicamente de un parámetro, el radio, y no influir la orientación. Esta simplificación se justifica teniendo en cuenta que los granos abrasivos presentan ángulos de inclinación muy negativos con respecto a la superficie de trabajo.

7.3.1 Hipótesis 1. Rotura de aglomerante y fallo por adhesión

La primera hipótesis de la que se parte para la realización del modelo se centra en estudiar la pérdida de granos útiles debido al fallo del aglomerante vítreo convencional. Esto puede deberse a dos fenómenos; la fractura del propio aglomerante y el fallo de adhesión entre grano y aglomerante. Con el modelo se busca analizar la tendencia predominante de entre estos dos fenómenos de desgaste.

Esta hipótesis se centra, por tanto, en la fractura del material aglomerante. Estudiar su comportamiento mecánico permite estudiar si el desgaste volumétrico de la muela por fallo del vítreo se debe en mayor grado a unas propiedades mecánicas del aglomerante demasiado bajas o a una mala adhesión entre los dos componentes. La tipología de muela ensayada se diseña de forma que permita aislar estos dos fenómenos frente a otros que puedan perturbar su identificación:

- Alúmina monocristalina. De acuerdo a la teoría clásica de rectificado, no se puede fracturar debido a la ausencia de fronteras intergranulares por las que se propague la grieta. Esto asegura que la única fractura durante el ensayo de flexión se debe al aglomerante o al fallo por adhesión grano-aglomerante.
- Muela blanda de estructura abierta. Supone que los puentes de aglomerante que conectan los granos sean más esbeltos y débiles. Con ello se busca favorecer la fractura del aglomerante para que el efecto sea más acusado.

El método numérico planteado para la realización de la simulación es el método de elementos discretos (DEM). Este método se suele emplear para modelar el fallo en materiales quasi-frágiles ya que permite representar la continua creación de microfisuras que se van generando y que se convierten finalmente en fracturas macroscópicas al fusionarse unas con otras. El método de los elementos discretos permite simular el comportamiento mecánico de un medio continuo, discretizándolo a través de un conjunto de partículas, normalmente de geometría esférica, las cuales interactúan entre sí a través de sus puntos de contacto. Las partículas, dispuestas de forma aleatoria, se consideran cuerpos rígidos. Estas se desplazan e interactúan entre sí en función de los elementos viga que crean sus contactos. En concreto se plantea la utilización de GranOO, un software desarrollado por la ENSAM (Francia).

7.3.1.1 Modelo 1. DEM siendo el aglomerante una matriz continua

La geometría del modelo inicial del proyecto se basa en las similitudes de la muela con un material compuesto. Se entiende el aglomerante como la matriz que recubre y sostiene los granos abrasivos y da forma a la pieza. En base a ello, el modelo se asemeja a un “queso gruyere” que se obtiene a partir de operaciones booleanas de sustracción de los cuerpos que representan los poros y granos de alúmina a un elemento cubo, que representaría el aglomerante.

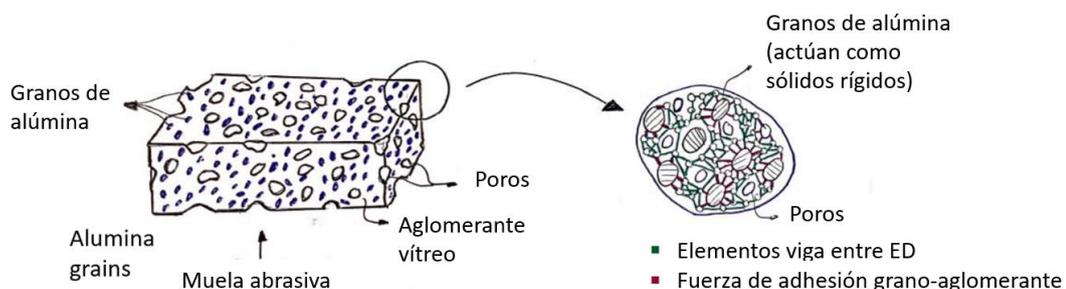


Figura 59: esquema representativo del modelo inicial con ED.

De acuerdo con la primera hipótesis, el medio a discretizar es el aglomerante, mientras que los granos abrasivos actúan como sólidos rígidos de geometría esférica, al no considerarse su fractura (alúmina monocristal):

- Material vítreo: Material discretizado. Representado por elementos discretos (esferas pequeñas) que definen las propiedades másicas (ρ) del material y vigas que unen dichos elementos y que definen el comportamiento mecánico del material.
- Material abrasivo: Representado por esferas de mayor tamaño que se comportan como sólidos rígidos y que están en contacto con el material discretizado.

El comportamiento mecánico de las vigas y la condición de fractura que se les impone depende de los tipos de elementos que enlacen. Como se refleja en la Figura 59, para las vigas que unen elementos discretos (ED) ED-ED se aplican las propiedades mecánicas del propio material vítreo, mientras que para las vigas ED-grano se define una fuerza de adhesión que representa la unión entre los dos elementos.

Este modelo es rechazado en un primer momento por la discontinuidad de los poros, lo que implica que el modelo no permite representar la capacidad de una muela de ser penetrada por un fluido. En la operación de rectificado el fluido refrigerante es un componente fundamental con el que se evita el quemado de las piezas y la aparición de tensiones residuales que esto puede suponer.

7.3.1.2 Segundo Modelo. DEM siendo el aglomerante un “elemento trompeta”
En el segundo modelo se plantea una geometría formada por unos “elementos trompeta” que representan el material vítreo que unen y recubren los granos de alúmina representados por elementos esféricos que tienen un comportamiento de sólido rígido (alúmina monocristal). La porosidad de la muela está representada por los espacios libres que no están ocupados por ninguno de estos elementos.

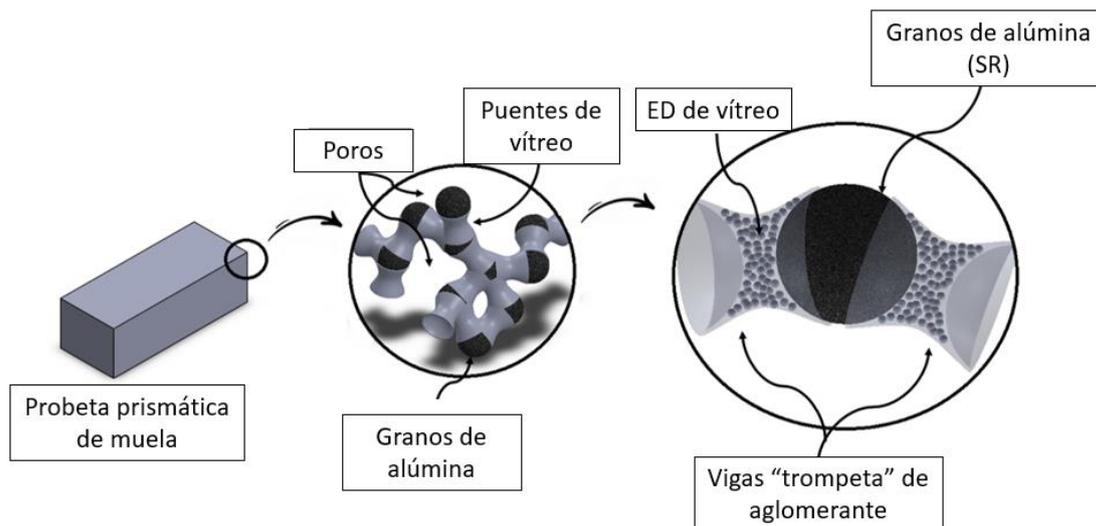


Figura 60: Esquema representativo del segundo modelo con ED.

Las condiciones de este segundo modelo son similares a las del anterior. De acuerdo con la hipótesis sólo se discretiza el material aglomerante. La estabilidad de los

elementos viga en contacto con los granos de alúmina está sujeta a la fuerza de adhesión entre grano-aglomerante (Figura 61).

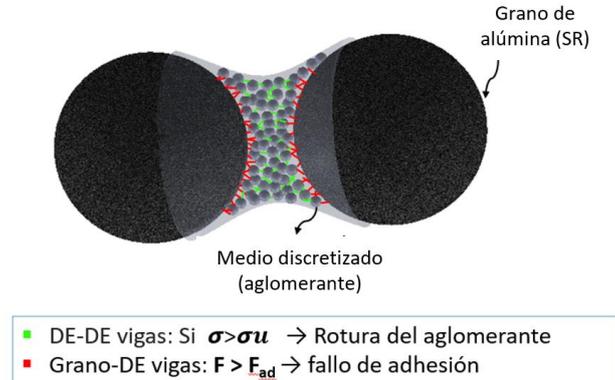


Figura 61: Condiciones de fractura para las vigas de unión de los ED.

Este segundo modelo se descarta por el alto costo computacional que supone la simulación mediante los métodos de elementos discretos, además de por problemas surgidos en la importación de geometrías externas al software de elementos discretos GranOO, que aún se encuentra en fase de desarrollo. Se plantea por ello la realización del modelo mediante un software de elementos finitos más accesible como Ansys.

Se descarta además la hipótesis tras la primera inspección visual en SEM de las probetas del bloque 1 en la que no se observan signos de fallo por adhesión en la intercara grano-aglomerante.

7.3.2 Hipótesis 2. Rotura de aglomerante y granos abrasivos

La segunda hipótesis del modelo se centra en identificar el fallo predominante por fractura de los dos elementos: el material vítreo y el grano abrasivo. No se considera el fallo por adhesión durante la simulación del ensayo de flexión a 3 puntos. La fractura del abrasivo se incluye en esta hipótesis con el objeto de estudiar cómo afecta su tipo de estructura cristalográfica en el comportamiento mecánico de la muela, al igual que en los ensayos experimentales. Por tanto, se plantea realizar dos simulaciones; con alúmina monocristalina y con alúmina convencional o policristalina.

El método numérico planteado para la realización de la simulación es el método de elementos finitos (FEM), empleando en concreto el software Ansys. En esta hipótesis se discretiza tanto el aglomerante como la alúmina, asignado a cada material sus propiedades mecánicas.

Se considera por tanto que el desgaste volumétrico o la rotura de la muela puede deberse a dos fenómenos; la fractura del vítreo y la fractura del grano abrasivo. Con el modelo se busca analizar la tendencia predominante de entre estos dos fenómenos de desgaste.

7.3.2.1 Tercer modelo. FEM usando elementos viga para el vítreo

El tercer modelo se enfoca de acuerdo a la hipótesis 2 en la que descarta el fallo por adhesión vítreo-alúmina y se pretende discretizar los dos componentes para estudiar la fractura predominante. La geometría se basa en la idea del modelo anterior en la que el material aglomerante está representado por elementos que mantiene unidos a los

granos abrasivos simulando una “network” en la que la porosidad está representada por los huecos vacíos de material.

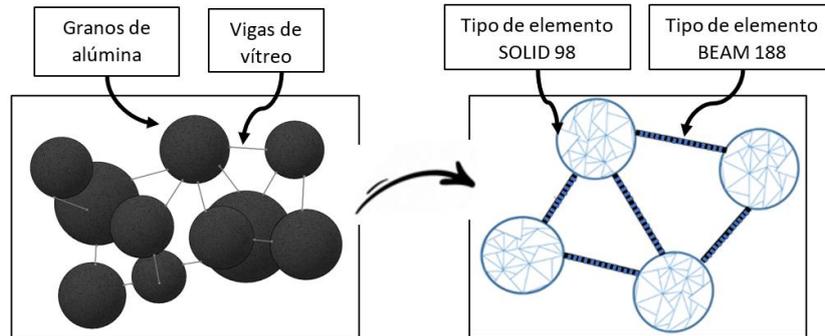


Figura 62: Esquema representativo del tercer modelo con ED.

Como se comenta en el apartado anterior, la simulación de este modelo se pretende realizar a través del Software Ansys, que se basa en la discretización del medio a través de la teoría de elementos finitos. Para la reducción del costo computacional se propone realizar el mallado según dos tipos de elementos (Figura 62):

- Granos de alúmina: Son elementos sólidos (SOLID 98 type element) que se mallan a partir de elementos tetraédricos cuyos nodos constan de 3 grados de libertad.
- Vigas de vítreo: Elemento uniaxial de dos nodos con seis grados de libertad en cada uno de ellos, basado en la teoría de flexión de Timoshenko. Se realiza esta simplificación del mallado del vítreo debido a que este tipo de elementos presenta una buena precisión de un único elemento a flexión, tracción/flexión y torsión.

Al no contemplarse el fallo por adhesión, el contacto entre los nodos finales de los elementos vigas y los nodos de los granos de este modelo es de tipo empotramiento (desplazamiento y giro nulo). Tanto las esferas granos como las líneas de los elementos viga se crean en Ansys APDL mediante comandos a partir de matrices de coordenadas generadas en un programa desarrollado en Matlab. Con él se controla el choque de los granos, la variación de su tamaño, la aleatoriedad de su posición, el número de elementos viga que los une y sus coordenadas.

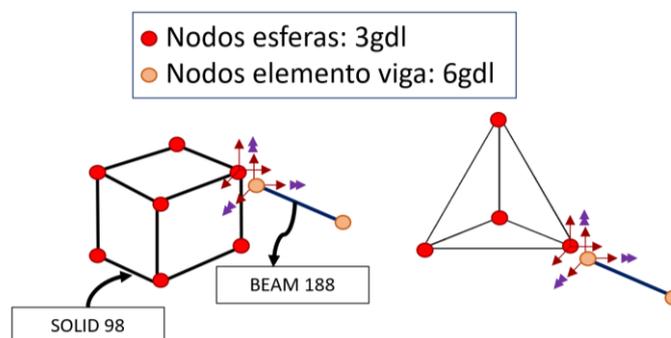


Figura 63: Conexión nodos entre elementos sólido y viga.

Como se ilustra en la Figura 63, el número de gdl que permiten los nodos de los dos tipos de elementos del modelo son diferentes. Esto supone que no se pueden transmitir los momentos generados entre los dos tipos de elementos. Para eliminar este problema

se propone, como se muestra en la Figura 64, la creación de nuevos elementos vigas, que se comportan como elementos infinitamente rígidos y que aseguran la transmisión de momentos.

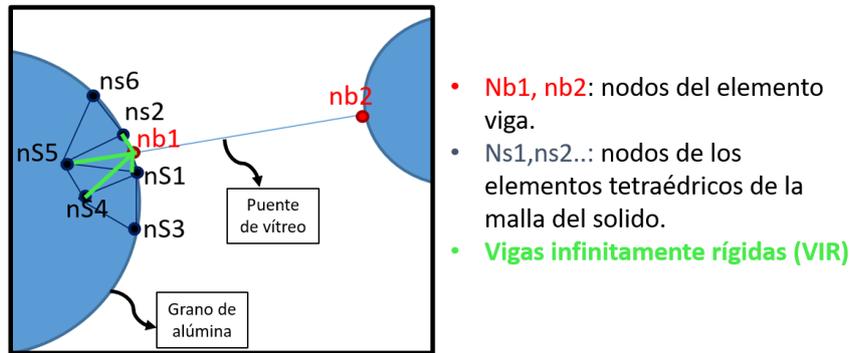


Figura 64: Condiciones de contacto de los elementos del tercer modelo.

Para la creación de estas VIR es necesario realizar un bucle que identifique los nodos de elementos viga cercanos a la esfera grano, recorra los nodos del mallado de cada esfera para identificar los más próximos a dicho nodo viga cercano y cree las VIR que los una. En la creación de este modelo, suponiendo que en el ancho de la rebanada debe haber espacio para dos granos de diámetro máximo se deberían crear un número aproximado de 80000 esferas. Consiguiendo un mallado de calidad media a partir de 3100 nodos por esfera, el bucle debería recorrer 248 millones de nodos. Este modelo queda descartado por la complejidad de conectar los nodos del mallado de los elementos sólidos con 3 gdl y de elementos viga con 6 gdl y el alto coste que supone mallar este modelo 3D.

7.3.2.2 Cuarto modelo. FEM considerando el material vítreo un único sólido.

La geometría del cuarto modelo coincide con la del primero con la diferencia de que la simulación se basa en la hipótesis 2; no existe fallo por adhesión, se discretiza todo el medio mediante FEM y se puede dar fractura del grano. La creación de este modelo se basa en la utilización de operaciones booleanas de sustracción de cuerpos esféricos que representen las porosidades y los granos abrasivos a un prisma cuadrangular que represente una sección del stick de muela ensayada.

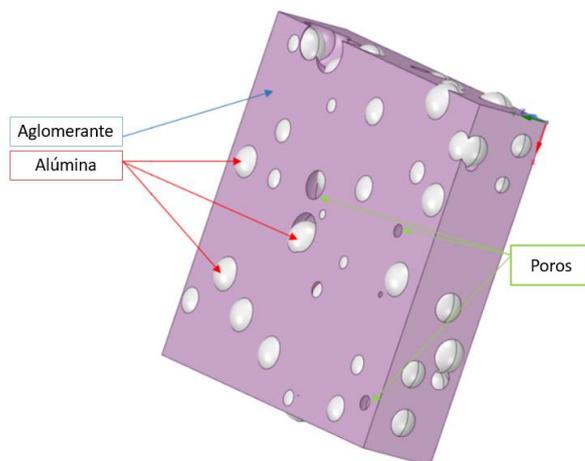


Figura 65: Esquema representativo del quinto modelo con ED.

La simulación de todos los granos abrasivos (cientos de miles) con los que puede contar un stick alúmina vitrificada de las dimensiones ensayadas experimentalmente supone un alto costo computacional. Es por ello que se busca una simplificación del modelo en 2 dimensiones. Por la geometría de las probetas prismáticas ensayadas y la dirección de las fuerzas aplicadas por los rodillos (Figura 66), se puede considerar como un caso de tensión plana al no existir tensiones en la dirección del ancho de las probetas, que consideraremos como la dirección X.

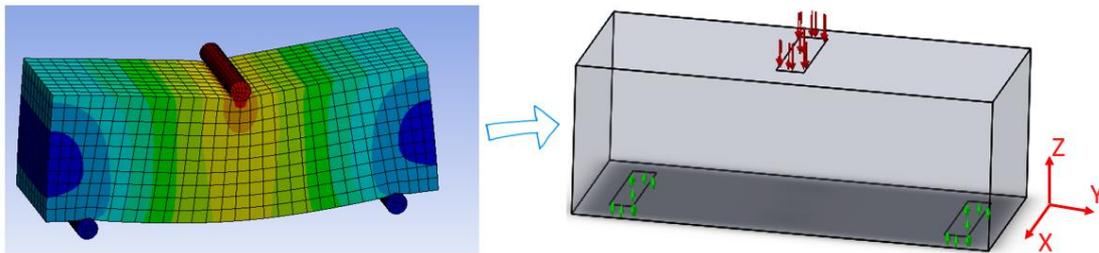


Figura 66: Fuerzas aplicadas por los rodillos durante la simulación del ensayo de flexión a 3 puntos.

Por ello, la distribución de tensiones se mantiene constante en cualquier plano YZ de los sticks como se muestra en la Figura 67. Se puede considerar por tanto el modelo que simula el ensayo de flexión como un caso de elasticidad bidimensional.

Para verificar que se cumple esta teoría, se realizó una simulación del ensayo realizado para una probeta de un material isótropo con las propiedades globales de la muela. Por la naturaleza frágil del material que se pretende estudiar, se tuvo en cuenta la distribución de tensiones según el criterio de Rankine o de tensión principal máxima, que como se muestra en la Figura 67, indica que se mantiene constante para los planos YZ.

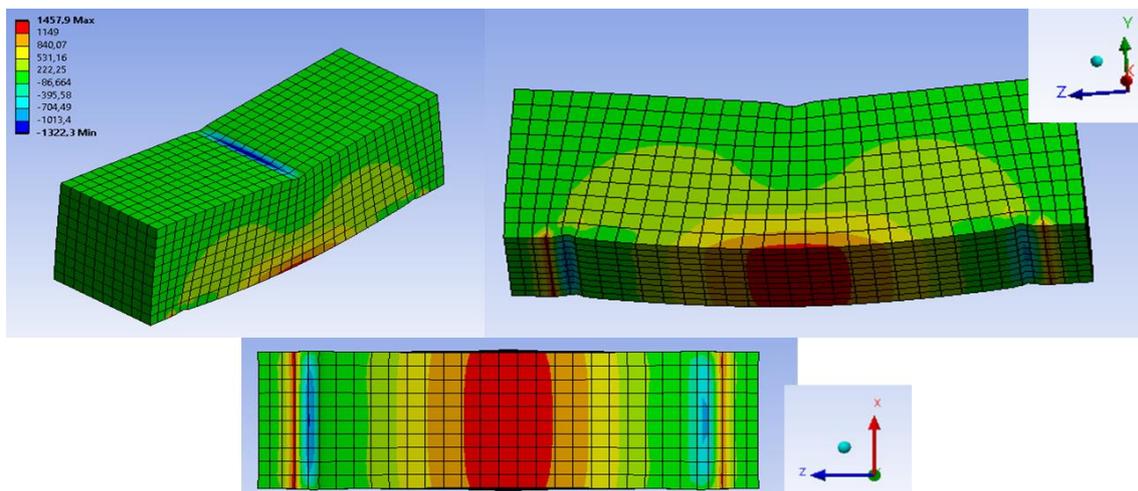


Figura 67: Distribución de tensiones (Rankine) de un stick isótropo.

7.4 Modelo para la simulación de las muelas abrasivas como materiales compuestos porosos.

Durante la elaboración del trabajo se han planteado los modelos descritos en los apartados anteriores, hasta llegar al modelo final que se adapta a los fenómenos que se pretenden estudiar ajustándose a un costo computacional aceptable.

De acuerdo con las conclusiones del análisis microscópico de la fractura de las muelas abrasivas que se detalla en el capítulo 6, no se avistan marcas que sugirieran la pérdida de granos por una insuficiente adhesión en la intercara de la unión con el aglomerante y sí se identificaron diferentes granos de alúmina fracturados. Además, las primeras imágenes SEM se toman de probetas que contienen una mezcla de alúmina monocristalina y convencional, por lo que no se puede identificar la tipología de grano fracturado. Por ello se añade el tipo de estructura cristalográfica de la alúmina como un parámetro a estudiar. La simulación del modelo final sigue, por tanto, las condiciones de la hipótesis 2:

- Para realizar la simulación computacional del ensayo de flexión se emplea el método de elementos finitos (FEM).
- Se discretiza todo el medio; tanto grano como aglomerante.
- No se considera en el modelo el fallo por adhesión entre la intercara grano-aglomerante.
- Se estudia el fenómeno de desgaste predominante entre: fractura de grano y fractura de aglomerante.
- Se realizan dos modelos; con alúmina monocristalina y con alúmina convencional.

Los métodos de elementos discretos son relativamente intensivos en computación, lo que limita la duración de una simulación o el número de partículas consideradas. Se descarta por ello la utilización de este método numérico para la simulación del ensayo experimental, además de por no aportar utilidades destacables frente a un software de elementos finitos más accesible como Ansys.

En cuanto a la geometría del modelo, el primer planteamiento fue rechazado inicialmente por no ser capaz de representar la continuidad de la porosidad de la muela abrasiva y por tanto su capacidad de ser penetrada por el líquido refrigerante empleado durante la operación, fundamental para asegurar la refrigeración de la herramienta. En el modelo final se recupera este primer planteamiento ya que el objetivo de la simulación es la representación del comportamiento mecánico de la muela y no se pretende tener en cuenta en la simulación la transmisión de las temperaturas alcanzadas durante la operación.

Debido a la complejidad que supone realizar el mallado de los agudos vértices que se crean en las operaciones de sustracción, como se muestra en la Figura 65, finalmente se opta por la realización de un modelo en 2 dimensiones basándose en la idea del cuarto modelo; la probeta ensayada es representada por una sección rectangular en 2D. El modelo se realiza teniendo en cuenta los datos aportados por el fabricante acerca de la proporción en volumen de cada componente y el tamaño de grano abrasivo, como se muestra en la Tabla 21. Estos datos son calculados en base al volumen final de la muela y el peso de los materiales empleados en su fabricación.

Tabla 21: Composición de los 2 modelos simulados.

	Tipo de grano abrasivo	Porcentaje de grano abrasivo	Porcentaje de aglomerante vítreo	Porcentaje de porosidad
CBL46G12V489P20P	100 % convencional	41	11,7	47,3
MA46G12V489P20P	100 % monocristal	41	11,7	47,3

En base a los criterios previamente descritos, se realizan dos simulaciones en las que se varían las propiedades mecánicas asignadas a los elementos que representan los granos de alúmina, en función del tipo de estructura cristalina. Ambas simulaciones se realizan sobre el mismo modelo, cuya geometría respeta la proporción de Elementos (vítreo, abrasivo y poro)

Por el alto coste computacional que supone crear el modelo a escala real, finalmente se realiza una simplificación llevando el modelo a una escala 1:4 La creación de este modelo se realiza a través del software Matlab y Ansys APDL tal y como se describe en los siguientes apartados.

7.4.1 Modelización de los granos abrasivos

Los datos de los que se parten para la creación de las esferas que representan los granos abrasivos son el número de tamiz por el que se pasan, que viene indicado en la nomenclatura de muela, y el porcentaje de volumen que ocupan dentro del prisma.

En el modelo se tiene en cuenta la dispersión de tamaños de los granos. A partir del número de tamiz se puede conocer el diámetro medio del grano. Según [42] el tamaño medio de grano se puede obtener según la ecuación 1:

$$d_g = \frac{15.2}{M} = \frac{15.2}{46} = 0,33 \text{ mm} = 330\mu\text{m} \quad \text{Ec. 11}$$

En la Figura 68 se muestran una tabla que relaciona los diámetros mínimo y máximo de grano según la apertura del tamiz.

Grain size #	20	24	30	36	46	54	60
Sieve opening (mm)	0.938	0.762	0.589	0.476	0.354	0.291	0.255
d_{max} (mm)	0.938	0.762	0.589	0.476	0.354	0.291	0.255
d_{min} (mm)	0.762	0.589	0.476	0.354	0.291	0.255	0.211
d_{mean} (mm)	0.850	0.676	0.532	0.415	0.323	0.273	0.233

Figura 68: Tamaño de grano según tamiz empleado.

De acuerdo con [42], la distribución de tamaños de grano se asemeja a una distribución normal en la que el tamaño de grano más frecuente es el medio, mientras que las granulometrías máxima y mínima son raramente encontradas. En base a ello se establece la siguiente proporción:

- 10 % de grano con $\varnothing_{\min}=291\mu\text{m}$.
- 80% de grano con $\varnothing_{\text{med}}=330\mu\text{m}$.
- 10% de grano con $\varnothing_{\max}=354\mu\text{m}$.

Los parámetros que definen la distribución de Weibull que se ajusta a estos valores de acuerdo con la Figura 69 son $A = 334$ y $B = 26,98$.

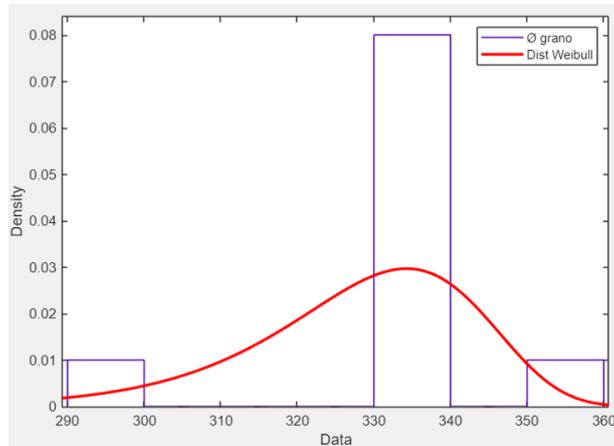


Figura 69: Ajuste por distribución normal del tamaño de grano.

Al realizar el modelo 2D se debe tener en cuenta que hay dos parámetros que cambian: la distribución de tamaños y el porcentaje de grano. Cuando se realiza un corte de sección de cualquier plano de la probeta de muela abrasiva, ocurre que no todos los granos se cortan por su plano ecuatorial, proyectándose en varios casos un área de menor radio con respecto a la esfera original. Además, el porcentaje del volumen de grano que ocupa la probeta no se corresponde al de área de grano (marcada en azul) en un corte de sección, sino que es inferior. En la Figura 70 se representa este fenómeno.

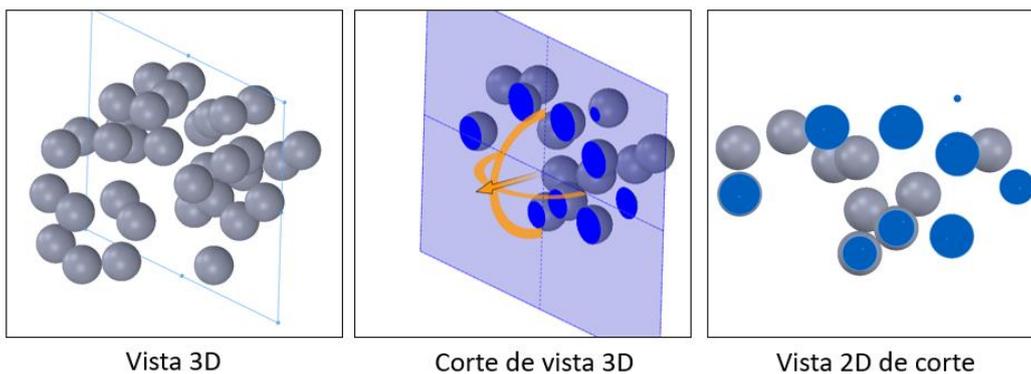


Figura 70: Superficie proyectada de un corte de sección de una distribución aleatoria de esferas.

Para adaptar estos datos al modelo 2D se realiza a través de Matlab un programa que cree un conjunto de esferas concentradas dentro de los límites de un prisma que sigan las siguientes condiciones:

- No existe choque entre las esferas. La distancia entre sus centros debe ser al menos un 10% mayor que la suma de sus radios.
- Su posición es aleatoria.

- Su tamaño sigue una distribución de Weibull ($A=334$, $B=26,98$).
- Pueden sobresalir respecto a los límites del prisma un 50% de su radio.
- El número de esferas creadas es tal que se cumpla la proporción de volumen ocupado en el prisma (41%).

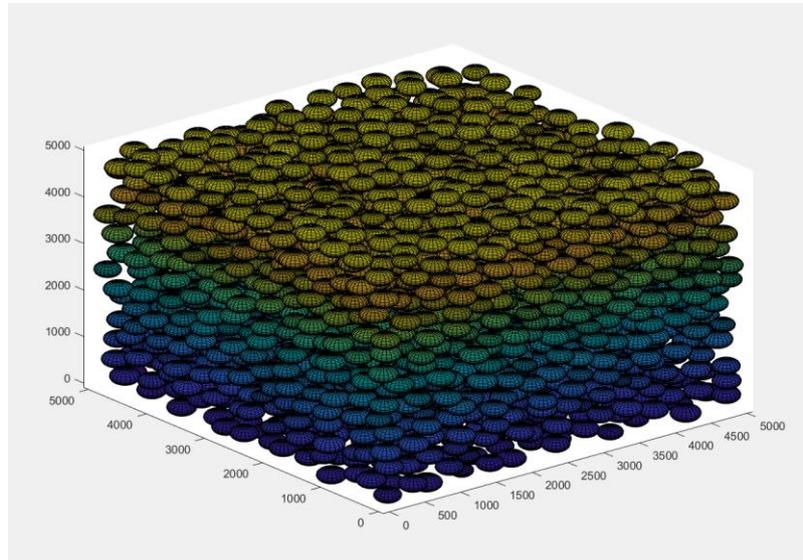


Figura 71: Creación de granos según las condiciones descritas en 5x5x5mm

A partir de esta representación se realizan varios cortes en diferentes direcciones. Tal y como se representa en la Figura 72, estos cortes se pasan por un tratamiento de imagen. Con ello se identifican las esferas que se encuentran dentro de unos límites marcados y el área que ocupan dentro de la sección. A partir de ellos se obtiene el radio de cada esfera identificada.

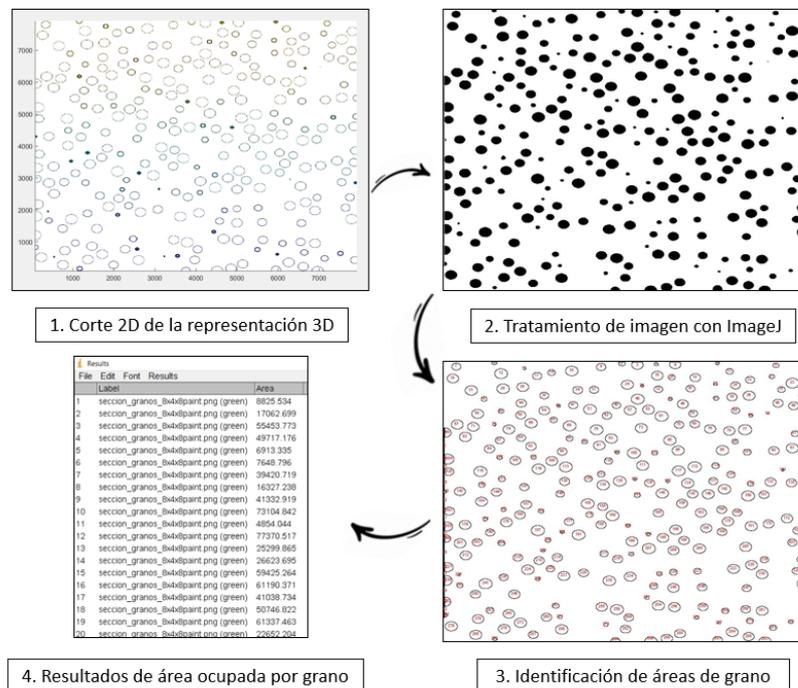


Figura 72: Proceso de ajuste de datos del modelo 3D a 2D.

Del tratamiento de estas imágenes se obtienen los datos que se muestran en la Tabla 22. El porcentaje en área ocupada por grano respecto a la sección de corte es de 34,60% de acuerdo con la media de las secciones analizada. Esto supone que el porcentaje de grano en sección se reduce un 15,60% frente al porcentaje en volumen.

Tabla 22: Tamaño y porcentaje de grano en las secciones de corte.

Dirección de corte	Posición del corte (mm)	Área de la sección(μm^2)	Área ocupada por grano (μm^2)	Porcentaje de grano (%)
X	500	2458960000	791517523.5	32.19
X	3600	2368450000	811151777.5	34.25
Y	1000	2321200000	816710276.8	35.18
Y	3500	22442764	8235914.406	36.70
Z	2000	2434850000	920467663.5	37.80
Z	3600	2537650000	801517523.5	31.59
$\bar{X} =$				34.62

Además de este porcentaje, se actualiza la nueva distribución de tamaños de acuerdo a la de identificación de áreas de los cortes. Se concluye que la distribución de tamaños de grano en un corte 2D se asemeja a una distribución del tipo Generalized Extreme Value (Figura 73) definida por los parámetros $k = -0.72$, $\sigma = 79,57$ y $\mu = 215,76$.

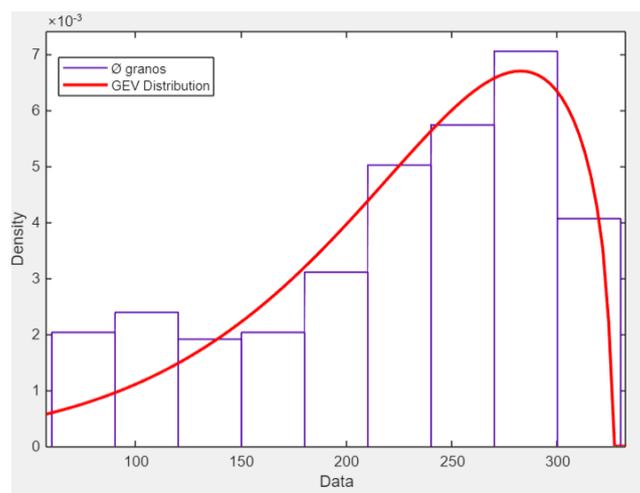


Figura 73: Histograma de ϕ de grano (μm) y ajuste según distribución GEV.

Una vez se han obtenido los datos necesarios para la creación de las esferas del modelo, se crea en Matlab, un nuevo conjunto de esferas concentradas dentro de los límites de un rectángulo de 20x6,25 mm, según las dimensiones de las probetas ensayadas a escala 1:4. Para ello se siguen las siguientes condiciones:

- No existe choque entre las esferas. La distancia mínima que se acepta entre el centro de dos esferas cualesquiera es igual a un 110% de la suma de sus radios. Con esto aseguramos que no existen granos en contacto que compartan fronteras puesto que no se ha identificado esta situación en los análisis SEM realizados del capítulo 6.
- Todas las esferas tienen la misma coordenada z, de forma que su centro se encuentra en el mismo plano XY.
- Su posición en el plano XY es aleatoria.

- Su tamaño sigue una distribución GEV según lo descrito anteriormente.
- Pueden sobresalir respecto a los límites del rectángulo. Se permite que se exceda hasta un 50% del radio medio de grano ($\frac{\varnothing_{med}}{2} \cdot 0,5 = \frac{215,76}{4} = 53,94 \mu m$).
- El número de esferas creadas es tal que, si se realiza un corte por su plano ecuatorial homólogo, el área de grano proyectada es un 34,6% del área del rectángulo que los confina.

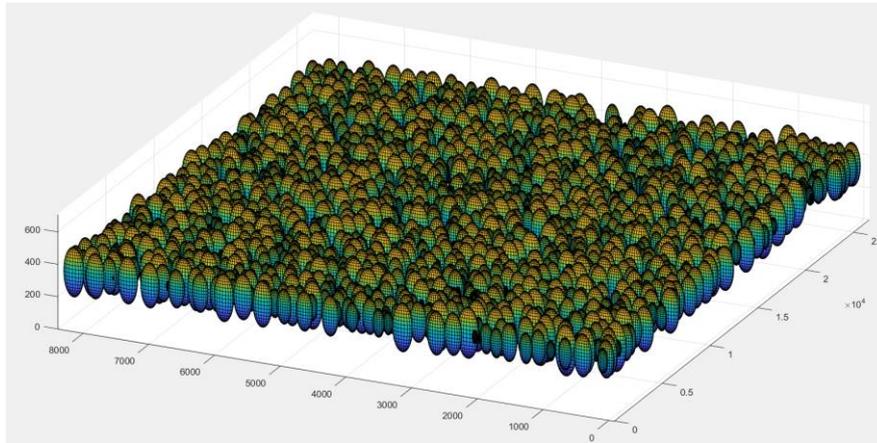


Figura 74: Creación de granos en 20x6.5x0.5mm según las condiciones descritas.

Este programa guarda en una matriz las coordenadas X e Y de cada esfera, en total 2374, y su radio. Esta matriz se guarda como archivo de texto, que se introduce en la ventana de comandos de Ansys APDL para la creación de los círculos que representan los granos de alúmina.

7.4.2 Modelización de los poros

Para la creación de los poros se parte de un único dato, el porcentaje en volumen de porosidad de la muela (47,3%). En la literatura, la influencia de la porosidad en las propiedades de la muela es un aspecto muy estudiado, pero el tamaño de poro es un parámetro de difícil medición. Para poder obtener los parámetros de una distribución de tamaños que se adapte a los de la muela, se ha tomado la imagen a) de la Figura 75. En ella se pueden identificar los poros como las zonas sombreadas. Esta imagen, ha sido tratada en ImageJ para poder identificar los poros, el área que ocupan, y los parámetros de una distribución que represente en la medida más justa la variación de su tamaño.

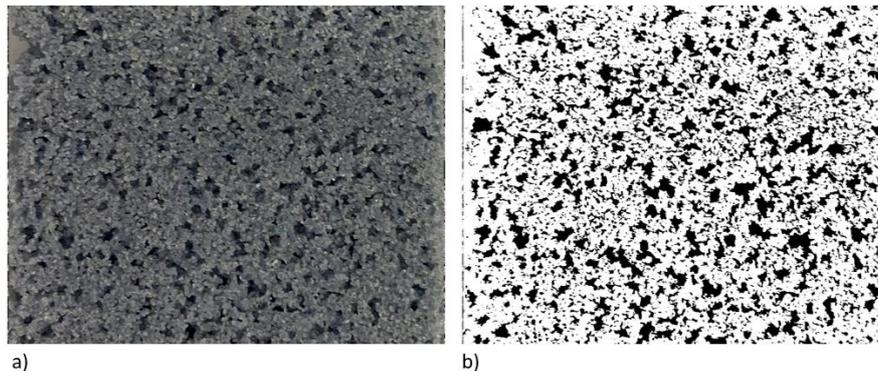


Figura 75: a) imagen tomada de la superficie de la muela; b) revelado de la porosidad con Image J.

Del tratamiento de esta imagen se obtiene que el 32 % de la superficie de la muela corresponde a la porosidad. Como se comenta en el capítulo 4, al igual que ocurre con los granos, la geometría de los poros se supone esférica con el objeto de reducir la complejidad del modelo. En base a cada área independiente que se identifica, se obtiene un diámetro. En la Figura 76 se muestra el histograma de diámetros obtenido, y el ajuste por una distribución del tipo log-logística. Los parámetros que definen esta distribución de tamaños son $\bar{x} = 117,93$ y $\sigma = 3011,53$. Esto supondría una alta reducción del porcentaje de poro en sección frente al porcentaje en volumen (31,9%). Esto se puede deber a que solo se realiza el análisis de una única fotografía de las caras externas de la probeta.

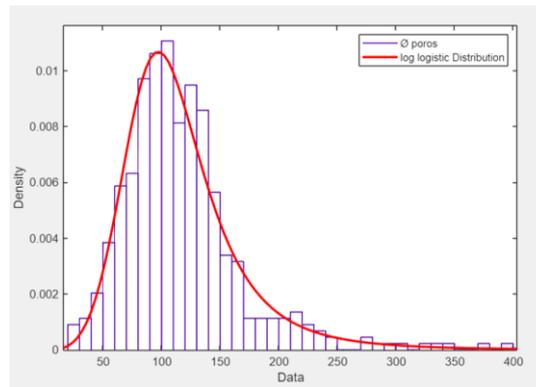


Figura 76: Histograma de \varnothing de poro (μm) y ajuste según distribución log. logistic.

El valor alto de la desviación típica de la muestra indica una alta variación del tamaño de poro. Tiene sentido si se tiene en cuenta que la porosidad se crea en la muela de forma inducida sin ningún procedimiento que controle el tamaño de los poros aleatoriamente creados, al contrario que en el caso del grano que es filtrado por un tamiz con un tamaño normalizado. Además, se observa que el tamaño medio de poro en sección es 2 veces menor que el tamaño medio de grano.

Se realiza un corte 2D de la representación de un conjunto de esferas poro con el valor real del 47% que indica el fabricante siguiendo la distribución de tamaños obtenida en la Figura 76. Al igual que para los granos, se realizan cortes en distintos planos. De ello se obtiene que el porcentaje de área ocupada por el poro en la sección de corte es del 38%. Se reduce por tanto en un 19,14% el porcentaje de poro en sección frente al porcentaje en volumen, un 4% más que en el caso de los granos. Esto se debe a que los granos se encuentran más dispersos en el volumen limitante al imponer la condición de anticollisión entre ellos.

Una vez se han obtenido los datos necesarios para la creación de las esferas del modelo, al igual que se ha hecho con los granos, se crea en Matlab un nuevo conjunto de esferas concentradas dentro de los límites de un rectángulo de 20x6.25 mm, las cuales siguen las siguientes condiciones:

- Se permite choque entre las esferas. Con ello se representa la continuidad de la porosidad. La distancia entre los centros de dos poros no será menor que el 80% de la suma de sus radios.
- Todas las esferas tienen la misma coordenada z, de forma que su centro se encuentra en el mismo plano XY.
- Su posición en el plano XY es aleatoria.
- Su tamaño sigue una distribución log-logística según lo descrito anteriormente.

- Pueden sobresalir respecto a los límites del rectángulo. Se permite que se exceda hasta un 50% del radio medio de poro ($\frac{\varnothing_{med}}{2} \cdot 0,5 = \frac{117,93}{4} = 29,48 \mu m$).
- El número de esferas creadas es tal que, si se realiza un corte por su plano ecuatorial homólogo, el área de poro proyectado es un 38% del área del rectángulo que los confina.
- Se restringe el caso de que un grano quede “flotando” sin contacto con el aglomerante. Como se ilustra en la Figura 77, para la creación de un nuevo poro se tiene en cuentas las coordenadas y tamaño de los granos ya creados. Se limita la distancia entre sus centros, de forma que no puede ser menor de un 105% de la diferencia entre los radios de poro y grano.

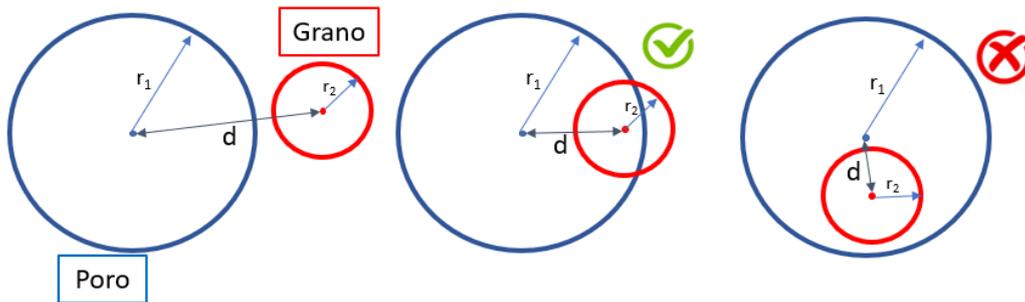


Figura 77: Condición de posición para la creación de nuevas esferas poros

De estas esferas creadas se guardan su radio y las coordenadas de su centro dentro del plano XY. Este archivo se adapta a Ansys APDL de forma que cada fila se interpreta como un comando de creación de un poro-esfera en 2D. Se crea un total de 5797 poros.

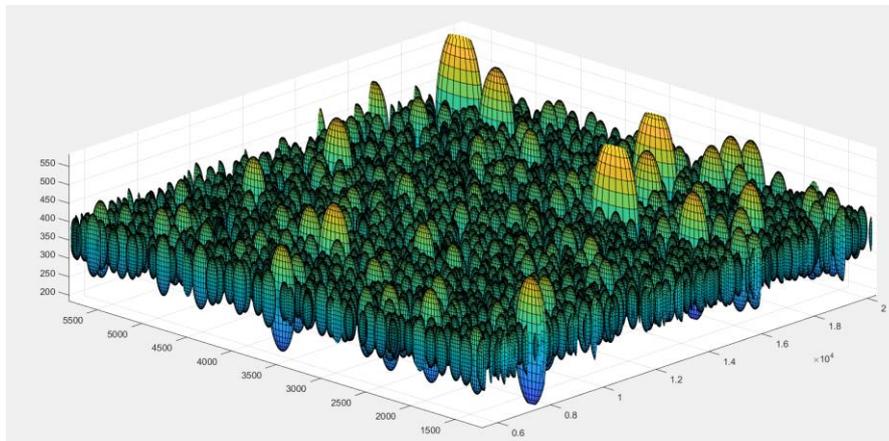


Figura 78: Creación de poros en 20x6.5x0.5mm según las condiciones descritas

7.4.3 Creación del modelo de muela abrasiva

El modelo se crea a través de operaciones booleanas de sustracción y adición. Se parte de una superficie rectangular que representa el material aglomerante que conecta los granos y da forma a la probeta. A esta sección se le sustraen las esferas que representan los poros. Posteriormente se realiza la misma operación con las esferas grano. Finalmente se vuelven a añadir, en la misma posición, las esferas grano para incluirlas en la simulación.

A partir de estas operaciones se consigue obtener la representación geométrica de una sección cualquiera de las probetas que hemos utilizado en los ensayos de flexión a una escala reducida de 1:4.

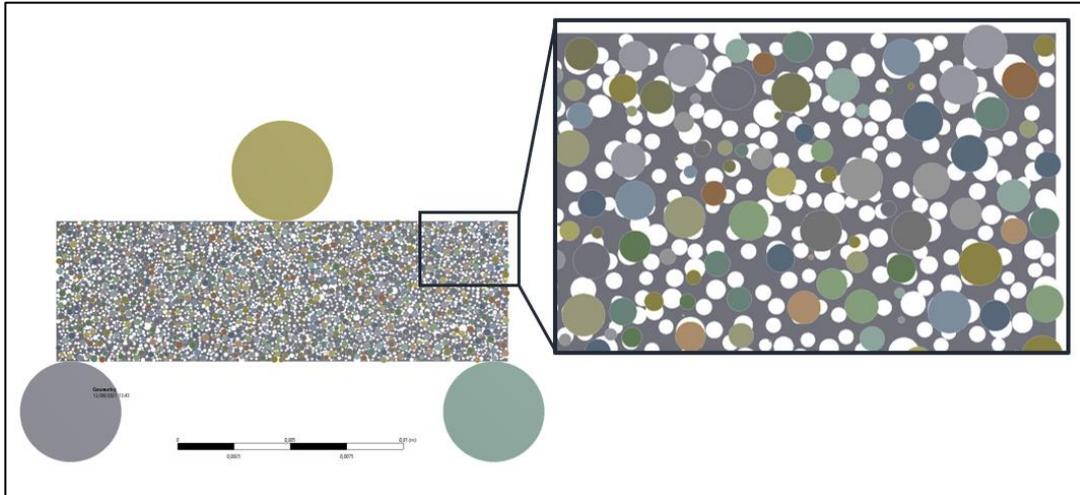


Figura 79: Modelo 2D para la simulación del ensayo de flexión a 3 puntos a escala 1:4.

7.5 Simulación del ensayo de flexión

Puesto que computacionalmente no ha sido posible la realización del modelo a escala real, se han ido realizando simplificaciones hasta llegar al modelo final a escala 1:4. La relación entre el modelo real y el simplificado no se puede considerar lineal por la naturaleza cerámica del material. Por ello, la fuerza aplicada en el modelo a escala reducida no puede ser proporcional a la alcanzada durante el ensayo experimental. En cambio, si debe ser proporcional la tensión a la que se produce la fractura de la probeta, obtenida en los ensayos experimentales. En base a lo anterior, se desea evaluar el comportamiento mecánico del material aplicando una fuerza gradual sobre el rodillo superior para así estudiar la propagación y distribución de las tensiones. A partir de esto, se pretende verificar que, en el momento de la fractura, las tensiones alcanzadas coinciden con las del ensayo estático.

Para identificar el instante en el que se produce el fallo de la probeta durante la aplicación progresiva de la fuerza vertical, se tiene en cuenta el criterio de fallo de Mohr-Coulomb. Esta teoría es usada para el cálculo del fallo estático de materiales frágiles, usualmente para materiales quebradizos, como hormigón, o agregados de partículas. La teoría se aplica a los materiales para los que la resistencia a la compresión es muy superior a la resistencia a la tracción. Explica que el corte de un material se produce para una combinación entre tensión normal y tensión tangencial.

Es importante tener en cuenta que durante la operación de rectificado las condiciones de temperatura que se alcanzan afectan críticamente a las propiedades mecánicas del material. Este proyecto no pretende conocer el comportamiento durante la operación, sino formar una idea, del comportamiento del material y sus constituyentes bajo un esfuerzo progresivo como base que permita ampliar el conocimiento del desgaste de un material complejo. Además, es importante tener en cuenta que los resultados de la simulación no son extrapolables a cualquier tipología de muela en la que se varíe

cualquiera de los parámetros que definen su composición y estructura. Sin embargo, la metodología diseñada para la generación de un cuerpo poroso y compuesto sí.

Se realizarán dos simulaciones del ensayo en las que se varían las propiedades de los granos de alúmina, para así estudiar cómo afecta el tipo de estructura cristalina, convencional (policristalina) y monocristal.

7.5.1 Condiciones de contacto del modelo.

Las condiciones de contacto entre los elementos del modelo son las siguientes:

- Unión rígida entre las superficies grano-aglomerante que están en contacto en base a la hipótesis de que no se da fallo por adhesión. Se crean un total de 1831 contactos. Ansys permite la detección automática de estos contactos, pero se reduce la tolerancia de contacto de $1\mu\text{m}$. Este parámetro establece la distancia máxima entre target y contact a partir de la cual se detecta un contacto. Con esto se asegura que el software no conecte superficies que son próximas pero que no están en contacto.

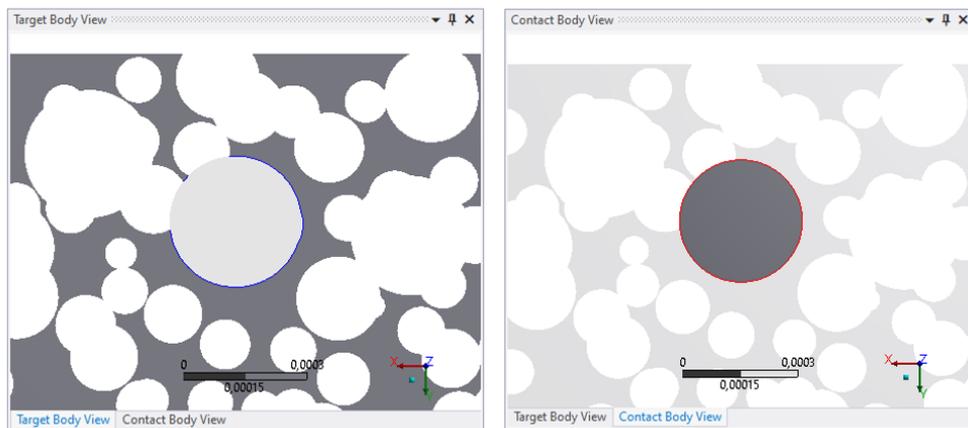


Figura 80: Contacto entre grano (contact body) y aglomerante (target body).

- Contacto “No separation” entre los rodillos del ensayo y la probeta. Con esta condición se impide el desplazamiento en la dirección normal del contacto, pero se permite el deslizamiento de forma que la probeta pueda flexar.

7.5.2 Condiciones de contorno del modelo

Las condiciones de contorno impuestas sobre el modelo son las siguientes:

- Desplazamiento nulo en dirección horizontal de la parte central inferior de la probeta. De esta forma se evita que la probeta se “escurra” o salga del plano horizontal. Esto puede suceder debido a que, al aplicar una fuerza vertical sobre una geometría no simétrica, se genera una fuerza en dirección horizontal cuyo desplazamiento en x no está restringido debido al contacto “no separation”.
- Desplazamiento nulo en dirección horizontal del cilindro superior. Con esto se asegura que el cilindro superior genera una fuerza vertical centrada durante toda la simulación

- Soportes fijos para los rodillos inferiores. De acuerdo con las condiciones del ensayo.
- Fuerza progresiva sobre el cilindro superior. Se le aplica una fuerza progresiva con un incremento de 10N hasta alcanzar 100N.

7.5.3 Mallado del modelo

El mallado del modelo se realiza imponiendo diferentes criterios en función del componente:

- Elementos tetraédricos para el mallado del aglomerante. Por su geometría consta de múltiples puentes de reducido espesor y zonas con vértices con ángulos agudos. Por ello se impone un criterio de refinado, limitando 10 μm el tamaño máximo de elemento.
- Elementos "Hexa Core" para el mallado de los granos. Con esta opción se genera una malla mixta con predominancia de elementos hexaédricos. Su ventaja es que permite reducir el tamaño de malla para así compensar el coste del mallado del aglomerante, además de que mejora la convergencia de la solución. El tamaño máximo de elemento es de 40 μm .
- Elementos hexaédricos para el mallado de los rodillos. Puesto que su comportamiento no se pretende estudiar en la simulación, se impone un tamaño máximo de elemento de 200 μm .

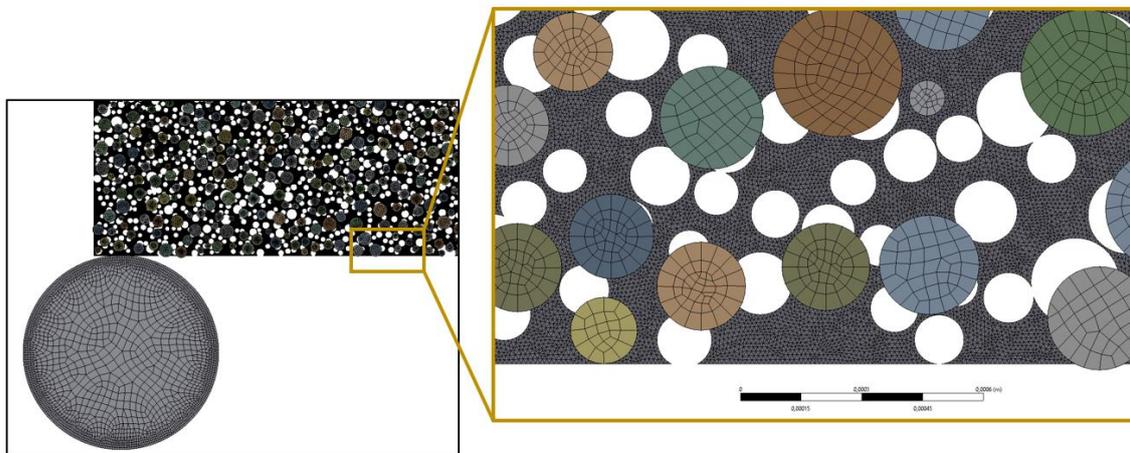


Figura 81: Mallado del modelo.

7.5.4 Propiedades mecánicas de los materiales

Ansys dispone de un directorio con distintos materiales, pero también permite la creación de nuevos materiales. Las propiedades mecánicas de los materiales de esta simulación se han añadido al directorio de Ansys. En las Figura 82 y Figura 83 se muestran las propiedades de la alúmina de estructura monocristalina [40] y alúmina de estructura policristalina o convencional [21] que se han incluido en la simulación:

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Material Field Variables	Table			
3	Density	3930	kg m ⁻³		
4	Isotropic Elasticity				
10	Tensile Yield Strength	422	MPa		
11	Compressive Yield Strength	2098	MPa		
12	Tensile Ultimate Strength	423	MPa		
13	Compressive Ultimate Strength	2100	MPa		

Figura 82: Propiedades mecánicas de la alúmina monocristal introducidas en el modelo de Ansys.

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Material Field Variables	Table			
3	Density	3870	kg m ⁻³		
4	Isotropic Elasticity				
10	Tensile Yield Strength	129	MPa		
11	Compressive Yield Strength	1398	MPa		
12	Tensile Ultimate Strength	130	MPa		
13	Compressive Ultimate Strength	1400	MPa		

Figura 83: Propiedades mecánicas de la alúmina convencional introducidas en el modelo de Ansys.

En el caso del material vítreo se han introducido las propiedades obtenidas en la caracterización de las probetas de material vítreo fabricadas como se muestra en la Figura 84. De acuerdo con lo desarrollado en el capítulo 4, los materiales frágiles muestran una deformación plástica insignificante por lo que los valores de los puntos de resistencia elásticos consiguen con los de resistencia últimos.

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Material Field Variables	Table			
3	Density	1867	kg m ⁻³		
4	Isotropic Elasticity				
10	Tensile Yield Strength	24	MPa		
11	Compressive Yield Strength	408	MPa		
12	Tensile Ultimate Strength	24,26	MPa		
13	Compressive Ultimate Strength	409	MPa		

Figura 84: Propiedades mecánicas del material vítreo introducidas en el modelo de Ansys.

7.6 Resultados de la simulación

7.6.1 Tensión de rotura

La fractura de la probeta, por su carácter de material compuesto, se da de forma progresiva, al confluir en una fisura o macrogrieta el conjunto de microgrietas que se van generando durante la aplicación de la carga vertical. La grieta busca la progresión a través de las zonas más débiles en cuanto a geometría y propiedades mecánicas de cada material. Como se comenta en el capítulo 4, esta fractura es propia de los materiales cuasifrágiles, grupo en el que entraría la muela abrasiva. Para identificar el instante en el que se produce el fallo de la probeta durante la aplicación progresiva de la fuerza, se tiene en cuenta el criterio de fallo de Mohr-Coulomb. Se representa por la envolvente lineal de los círculos de Mohr que se producen en la rotura. La relación de la envolvente se expresa según la Ec. 12, siendo τ el esfuerzo cortante, σ la tensión normal, ϕ la pendiente del ángulo de rozamiento interno y c el coeficiente de cohesión. A partir del criterio de fallo de Mohr-Coulomb se pretende estudiar el instante, y por tanto la fuerza a la que se produce la fractura de la probeta.

$$\tau = \sigma \cdot \tan(\phi) + c$$

Ec. 12

A partir del criterio de fallo de Mohr-Coulomb se pretende estudiar el instante, y por tanto la fuerza a la que se produce la fractura de la probeta. A partir de esta fuerza se puede calcular la tensión última de fractura de la probeta utilizando la expresión del ensayo de flexión a 3 puntos, si consideramos la probeta como un único material uniforme.

En la Figura 85 se muestra la progresión del factor de seguridad, según el criterio de Mohr-Coulomb, con el incremento de la fuerza aplicada sobre el rodillo vertical. La fractura comienza en la parte inferior central de la probeta, por la zona de mayores esfuerzos de tracción, al igual que sucede en los ensayos experimentales. Cuando se empiezan a formar las microgrietas en la parte inferior de la probeta, los puentes de unión del material vítreo comienzan a fracturarse, haciendo que la sección que soporta el esfuerzo disminuya hasta alcanzar la fractura total de la probeta. Por tanto, la fractura de una fracción de material vítreo no implica la fractura total de la probeta puesto que los granos de alúmina, con mayor resistencia a la fractura, frenan su propagación.

Durante la simulación de la probeta con alúmina monocristal no se observan fracturas del grano antes de que se produzca la fractura total de la probeta (Figura 86). Las tensiones máximas que alcanzan los granos de la zona de tracción, para las dos configuraciones, superan los 130 MPa, por encima de la resistencia última a tracción de los granos de alúmina convencional. Al analizar el factor de seguridad según el criterio de Mohr-Coulomb para varios intervalos de tiempo, en los que va aumentando la fuerza, se puede observar como la fractura de la probeta se da entre los 60 y 70 N de fuerza aplicada al confluir las grietas de la zona de tracción y compresión.

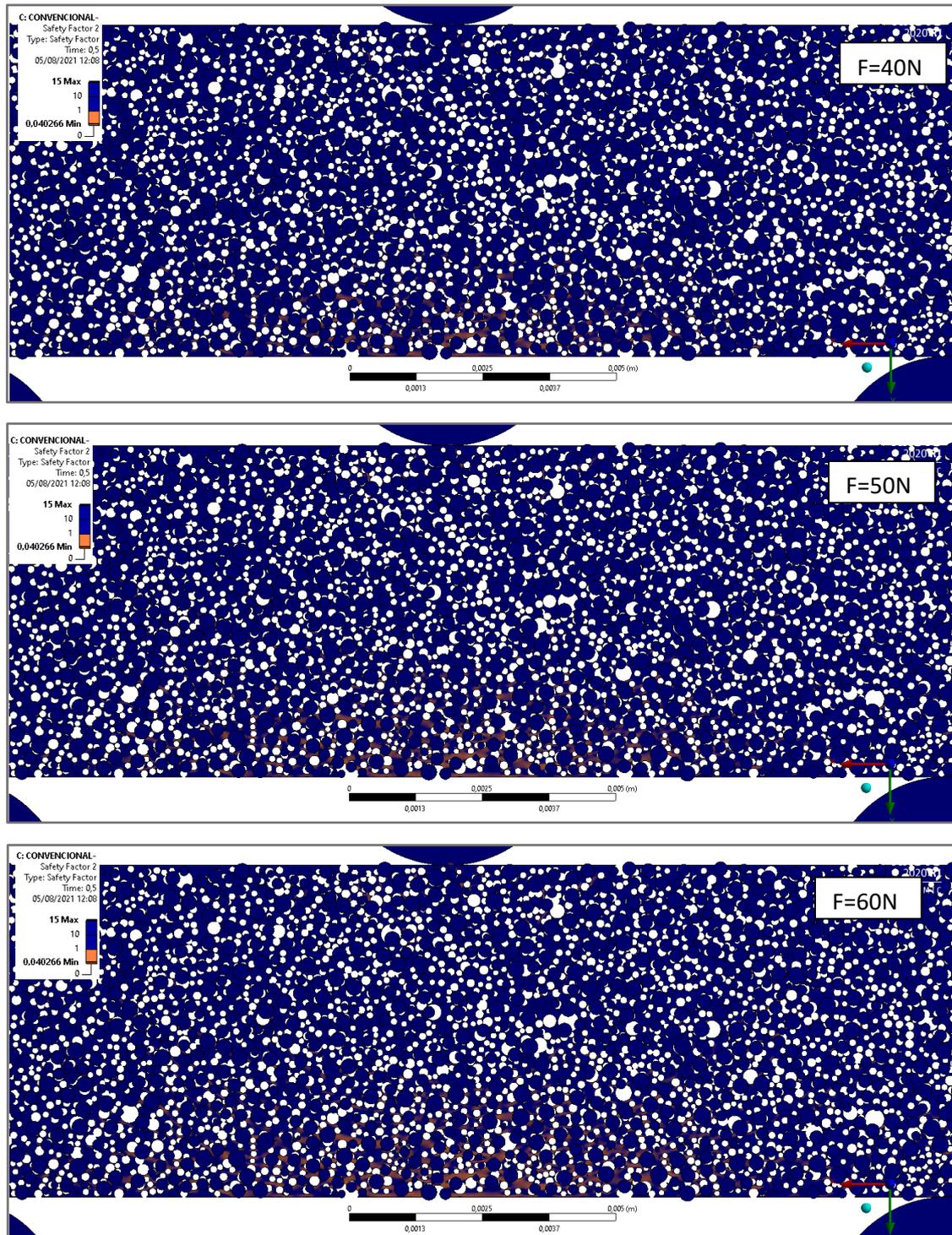


Figura 85: Progresión del FS según Mhor-Coulomb para modelo convencional.

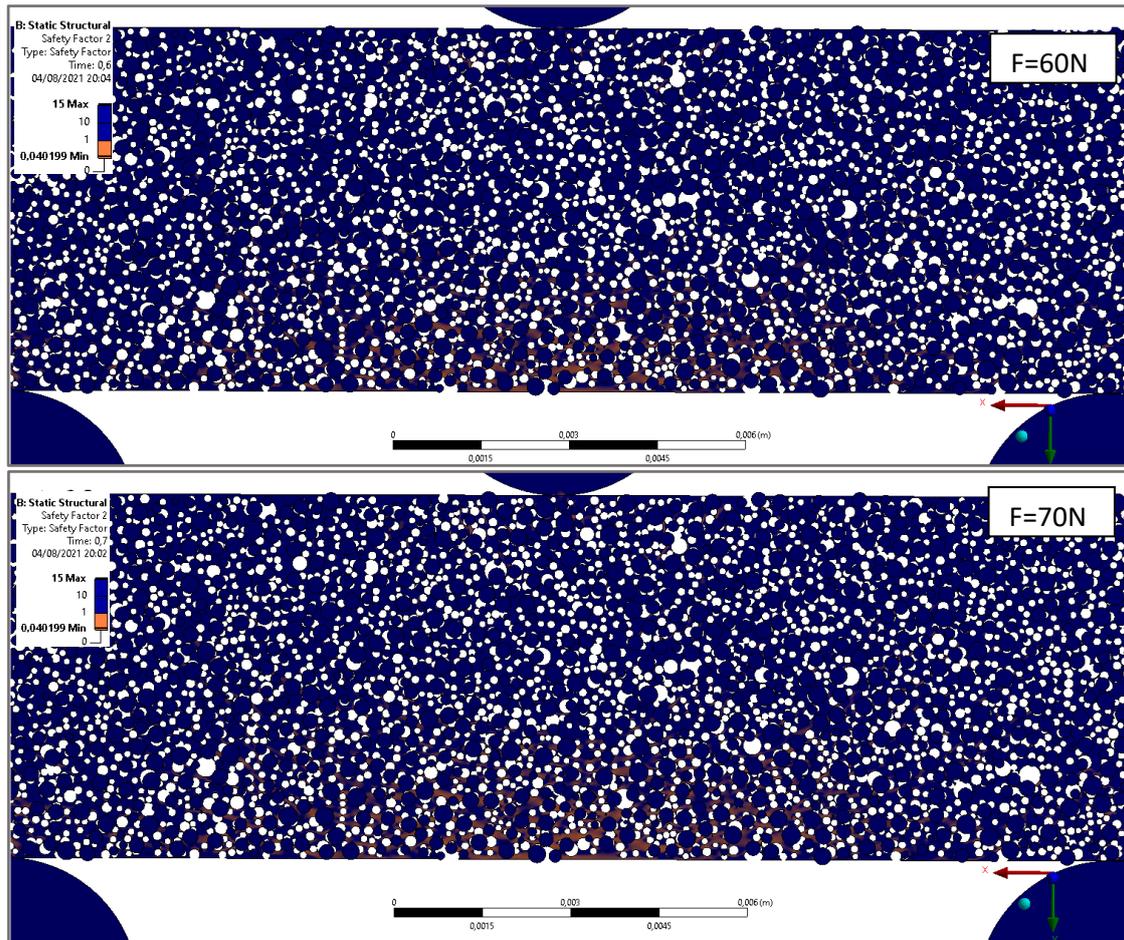


Figura 86: Progresión del FS según Mhor-Coulomb para modelo con monocristal.

Para el modelo de alúmina convencional se puede interpretar como el fallo se produce antes, entre los 50 y 60N. Si se analiza la zona de tracción, se puede ver como en algunos granos han sobrepasado los límites de tensión última a la tracción del material (Figura 88). Aunque la distribución de tensiones en las zonas de material vítreo es igual en los dos modelos, la fractura de los granos de alúmina convencional de la zona sometida a tracción reduce la sección que soporta la tensión del ensayo y se sobrecarga por tanto la parte superior. En el caso del monocristal, los granos resisten y frenan la propagación de las grietas mientras que el total de las fracturas se da en el aglomerante.

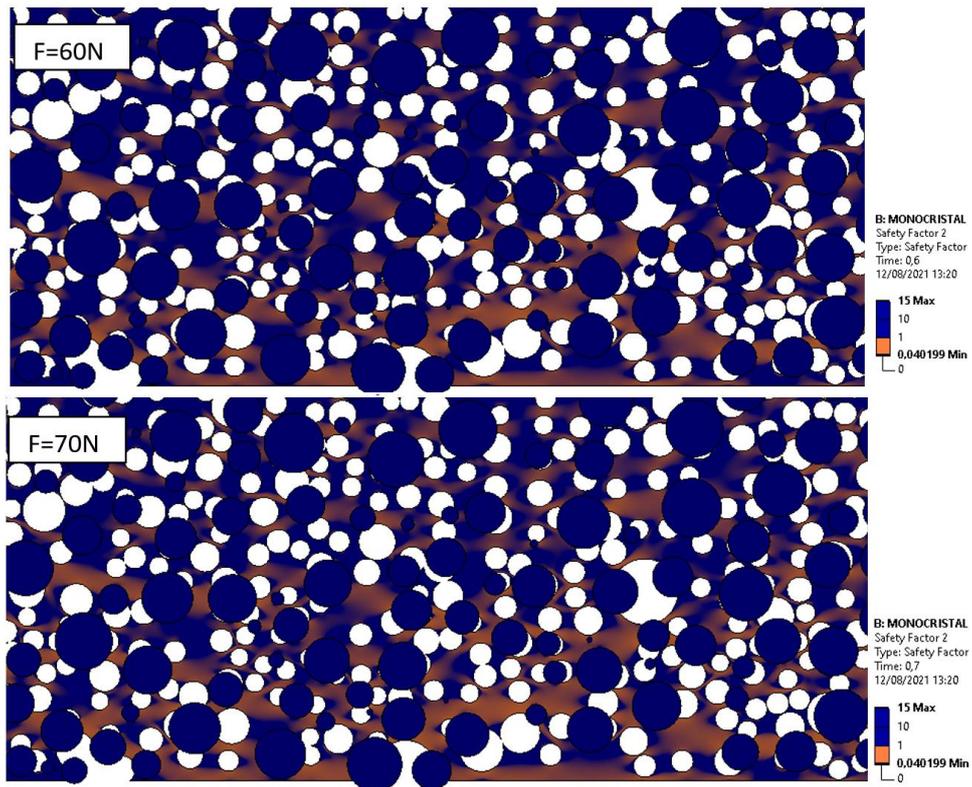


Figura 87: FS según Mhor-Coulomb para modelo monocristal en la zona inferior central.

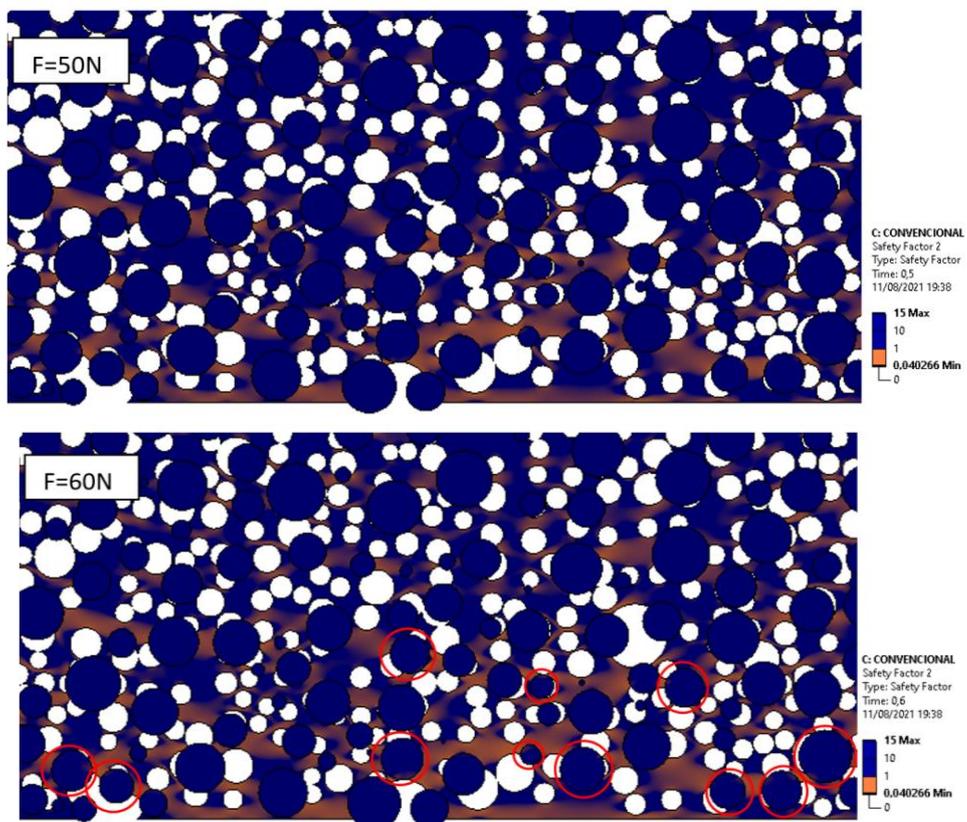


Figura 88: FS según Mhor-Coulomb para modelo convencional en la zona inferior central.

Del mismo modo que en los ensayos experimentales, la cara de fractura es irregular. Esto se debe a que la probeta falla debido a la confluencia de múltiples microfracturas del vítreo que se generan en las zonas más débiles. Estas microfracturas se dan con una gran influencia de la proximidad de porosidades, que reducen el espesor de los puentes de unión entre granos y aumentan los puntos concentradores de tensión.

El fallo de las probetas se ha deducido en relación a la progresión de la fractura y la interpretación de la fracción de material que ha fallado. En base a esto, se obtienen los siguientes resultados:

$$\sigma_{convencional} = \frac{3PL}{2Bh^2} = \frac{3 \cdot 55 \cdot 20}{2 \cdot 6,25 \cdot 6,25^2} = 6,76 \text{ MPa} \quad \text{Ec. 2}$$

$$\sigma_{monocristal} = \frac{3PL}{2Bh^2} = \frac{3 \cdot 65 \cdot 20}{2 \cdot 6,25 \cdot 6,25^2} = 7,98 \text{ MPa} \quad \text{Ec. 3}$$

En la Tabla 23 se realiza una comparación entre la tensión de fractura media obtenida experimentalmente y en la simulación.

Tabla 23: Comparación de la tensión de fractura obtenida en la simulación.

	σ_{grano} (Mpa)	σ_{vitreo} (Mpa)	F_{exp} (N)	F_{sim} (N)	Y_{exp} (mm)	Y_{sim} (mm)	σ_{exp} (GPa)	σ_{sim} (GPa)
Monocristal	2100	22.86	2228.98	65	0.355	0.0214	18.66	7.98
Convencional	1400	22.86	1764.53	55	0.295	0.0103	15.66	6.76

De la simulación se puede interpretar que, para la tipología de muela del estudio, la fractura predominante es la del material vítreo. Los resultados de resistencia última del modelo son inferiores a los obtenidos en los ensayos experimentales (Tabla 23). La simulación del modelo 2D reducido ha mostrado concordancias cualitativas con las observaciones SEM y los ensayos experimentales, aunque discrepan cuantitativamente en los resultados obtenidos. Se deduce una fractura del material vítreo predominante frente a la fractura del grano y un aumento de las propiedades mecánicas de las probetas monocristalinas frente a las convencionales. Al comparar la relación entre los valores de tensión última de las dos tipologías de muela obtenidos experimental y numéricamente se puede ver que se mantiene la misma relación:

$$\sigma_{MA_{exp}} / \sigma_{CBL_{exp}} = \left(1 - \frac{15.66}{18.66}\right) \cdot 100 = 16.07\%$$

$$\sigma_{MA_{sim}} / \sigma_{CBL_{sim}} = \left(1 - \frac{6.76}{7.98}\right) \cdot 100 = 15.28\%$$

La variación entre estos valores se puede atribuir a la fabricación de las probetas de material vítreo. Los valores de fuerza aplicada a los que se produce la fractura de la probeta en los ensayos experimentales y en la simulación no coinciden en orden de magnitud. Esto se debe en gran parte a la reducción de escala del modelo. Si que se encuentra una correlación cualitativa entre la relación de fuerza y flecha alcanzada para las dos probetas:

$$F_{MA_{exp}}/F_{MA_{simu}} = \left(1 - \frac{65}{2228.98}\right) \cdot 100 = 97.08\%$$

$$F_{CBL_{exp}}/F_{CBL_{simu}} = \left(1 - \frac{55}{1764.53}\right) \cdot 100 = 96.88\%$$

$$y_{MA_{exp}}/y_{MA_{simu}} = \left(1 - \frac{0.0214}{0.355}\right) \cdot 100 = 93.97\%$$

$$y_{CBL_{exp}}/y_{CBL_{simu}} = \left(1 - \frac{0.0103}{0.295}\right) \cdot 100 = 96.51\%$$

Al igual que en los ensayos experimentales, las probetas con alúmina monocristalina alcanzan una resistencia frente a la fractura superior (un 15% superior). Si se tiene en cuenta la diferencia significativa que existe entre las propiedades mecánicas de las dos tipologías de grano ($\sigma_{mon}=422$ MPa, $\sigma_{CBL}=422$ MPa) y la alta proporción de grano que contiene la muela (41%) se puede concluir que el tipo de estructura cristalina del grano de alúmina no es un parámetro que supone una gran influencia en el comportamiento mecánico de la muela. Al igual que se comenta en las conclusiones de los resultados experimentales, la resistencia última de las probetas obtenida en la simulación (7.98 Mpa para el monocristal y 6.76 MPa para el convencional) está principalmente definida por la baja resistencia a la fractura del material vítreo (22.86) y la alta porosidad (47%) que define la sección de los puentes de vítreo. Es principalmente la fractura de los puentes de vítreo el fenómeno de desgaste predominante que define la fractura de la probeta durante la simulación.

Por los resultados obtenidos, se puede concluir que el tipo de estructura cristalina de los granos de alúmina tiene una baja influencia en el comportamiento mecánico frente a fuerzas estáticas.

7.6.2 Módulo elástico

Una vez definida la fuerza a la que se produce la fractura de la probeta, se puede obtener, al igual que en los ensayos experimentales, la flecha alcanzada en la parte inferior media. Con esto se puede definir el módulo elástico del material. En la Figura 89 y Figura 90 se muestra la flecha alcanzada en cada simulación en el instante previo a la fractura:

- Flecha en el monocristal: 0,0214 mm.
- Flecha en el convencional: 0,0103 mm.

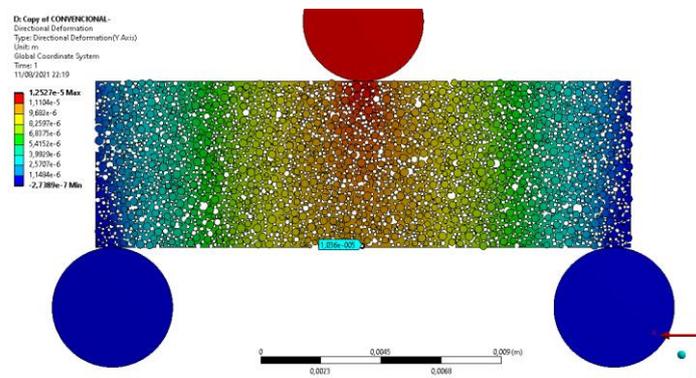


Figura 89: Medición de la flecha para el modelo de grano convencional.

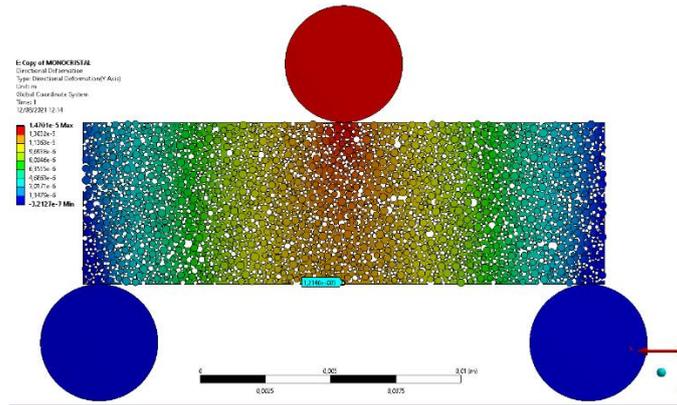


Figura 90: Medición de la flecha para el modelo de grano monocristal.

En base a la flecha alcanzada durante la simulación, se obtienen los resultados del módulo de Young que se muestran en la Tabla 24, de acuerdo a la Ec. 13:

$$E = \frac{PL^3}{4bh^3f} + \frac{PL}{4kGA} \quad \text{Ec. 13}$$

Siendo G el módulo de rigidez, que se define como el coeficiente de elasticidad para una fuerza de corte y se obtiene según la Ec. 14:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad \text{Ec. 14}$$

Como se refleja en la Tabla 24, los valores obtenidos en la simulación coinciden en orden de magnitud con los obtenidos experimentalmente. Ambos se encuentran por debajo del rango común para las muelas de alúmina vitrificada de entre 10 y 80 GPa. [41]La flecha alcanzada durante el ensayo es una variable que presenta dificultades a la hora de cuantificarla. La alta porosidad de la muela y a su naturaleza blanda suponen que sea inevitable la indentación de los rodillos. Posiblemente las flechas alcanzadas son inferiores que las medidas, lo que aumentaría el valor del módulo elástico.

Según [41] se puede obtener el módulo elástico teórico de una muela según la Ec. 15:

$$E_t = \left\{ \frac{1}{V_g^{1/3} E_g} + \frac{3(1 - V_g^{1/3})^2}{V_b E_b} \right\}^{-1} \quad \text{Ec. 15}$$

Esta ecuación depende de:

- Proporciones de material: volumen de grano (V_g) y volumen de aglomerante (V_b).
- Módulo elástico del material aglomerante (E_b).
- Módulo elástico del material abrasivo (E_g).

El autor muestra que la ecuación tiene buena correlación sobre los resultados obtenidos sobre el ensayo de flexión a 3 puntos de 50 probetas en las que varían estos parámetros, además del tamaño de grano. Se utiliza la Ec. 15 para obtener el valor teórico del módulo

elástico teórico empleando el valor de E_b obtenido en los ensayos de caracterización del comportamiento mecánico de las probetas de material vítreo fabricadas.

Tabla 24: Comparación del módulo elástico obtenido en la simulación.

	Egrano (GPa)	Evítreo (GPa)	Eexperimental (GPa)	Esimulación (GPa)	Eteórica (GPa)
MA	376	15.63	2.276	6.99	9.25
CBL	289	15.63	2.383	5.83	9.22

El módulo de elasticidad de un material indica la relación entre el esfuerzo al que está sometido el material y su deformación unitaria. Representa el grado de rigidez del material ante una carga impuesta sobre el mismo. Los valores obtenidos indican que la tipología de muela de alúmina vitrificada tiene una baja rigidez. En general los materiales porosos presentan menores valores en sus propiedades mecánicas (resistencia mecánica a la flexión (σ_f), el módulo de Young (E) comparados con los materiales densos correspondientes. Esto se explica por el hecho de que el valor de estas propiedades para los poros, considerándolos como otra fase, es despreciable o nulo en comparación con el valor de la propiedad para la fase sólida. Que una muela porosa tenga menor módulo elástico indica que no es capaz de deformarse frente a un esfuerzo. No es capaz de transformar la tensión a la que está siendo sometida en energía potencial elástica que derive en una deformación reversible. Con ello se llega a una fractura prematura de las zonas más débiles de la muela porosa: los esbeltos puentes de material vítreo.

Tanto los valores del módulo elástico teóricos como los obtenidos en la simulación son superiores a los obtenidos experimentalmente. Esto se debe a que este valor es inversamente proporcional a la flecha alcanzada y en estos casos no existe indentación que pueda afectar en la medición. Tanto los valores de la rigidez de la muela obtenidos experimentalmente como en la simulación coinciden en orden de magnitud. Aunque difiere la relación entre el módulo elástico obtenido según la tipología de grano (prácticamente coinciden en los ensayos experimentales y el cálculo teórico) se vuelve a constatar que tampoco tiene influencia sobre la rigidez de la muela. Si se comparan los valores de E individuales de las dos tipologías de granos ($E_{MA}=376$, $E_{CBL}=289$) con el módulo elástico del vítreo obtenido experimentalmente ($E_{vit}=15,63$) se puede ver como los valores globales de la rigidez obtenidos tanto experimentalmente como en la simulación se acercan el comportamiento del conjunto de la muela al del material vítreo.

A partir de esto se vuelve a ratificar que, en cuanto a la rigidez de la muela, los parámetros que más afectan son las propiedades del aglomerante vítreo y fundamentalmente el nivel de porosidad. Si la porosidad es alta, puede hacer que una muela elaborada a partir de componentes con un módulo elástico moderado baje considerablemente.

7.6.3 Posibles fuentes de error

La simulación del modelo 2D reducido ha mostrado concordancias cualitativas con las observaciones SEM y los ensayos experimentales, aunque discrepan cuantitativamente en los resultados obtenidos. Existen varios aspectos que pueden influir en la

desigualdad obtenida y que se pueden tener en cuenta para afinar la metodología de diseño del modelo y su simulación:

- Realización del modelo a escala tridimensional.
- Simulación de varias secciones de la probeta.
- Simulación del modelo a escala real.
- Re-caracterización del comportamiento mecánico del material vítreo.
- Interpretación del software de EF de la progresión de la fractura.
- Interpretación del software de cálculo del instante en el que se produce la fractura.

8. Conclusiones y posibles trabajos futuros

De la caracterización mecánica experimental del material se determina que, la tipología de muela estudiada con grano 100% monocristalino alcanza una resistencia de rotura de 17.11 MPa con un módulo elástico de 2.47 GPa. Las muelas con un 100% de grano convencional alcanzan una σ_u de 16.47 MPa con un E de 2.38GPa. Las muelas con un 50% de grano monocristal y convencional alcanzan una σ_u de 16.47 MPa y un E de 2.12 GPa. De los ensayos experimentales de caracterización de las probetas fabricadas de aglomerante vítreo se obtiene que alcanzan una resistencia ultima de rotura de 22,86 MPa con un módulo elástico de 15.63 GPa.

Aunque los resultados obtenidos muestran una leve diferencia, se puede concluir que el tipo de estructura cristalina de la alúmina no es un parámetro influyente en las propiedades mecánicas de las muelas de alúmina vitrificada. Si puede tener más influencia ante fuerzas dinámicas e impactos dado la diferencia en la friabilidad de los granos.

Se ha comprobado como la resistencia del aglomerante y el nivel de porosidad definen en gran medida la fractura de la muela, es decir, su grado de dureza y su estructura. La capacidad de adhesión entre los dos componentes es fundamental para que el material vítreo sea capaz de transmitir las tensiones a las que está sometida a los granos, con mejores propiedades mecánicas. Aunque en base a las observaciones SEM se ha determinado que no se dan fallos por adhesión, los puentes de vítreo no son capaces de transmitir estos esfuerzos y fallan prematuramente debido a las tan inferiores propiedades del aglomerante y la alta porosidad que define su espesor. En la operación de rectificado, para esta tipología de muela, esto se podría traducir en un desgaste volumétrico demasiado acelerado y la pérdida de granos útiles que no llegan a desgastarse por la temprana fractura de puentes de material vítreo que los unen.

La simulación del modelo 2D reducido ha mostrado concordancias cualitativas con las observaciones SEM y los ensayos experimentales, aunque discrepan cuantitativamente en los resultados obtenidos. Se deduce, al igual que a través de los ensayos experimentales y los análisis visuales de la fractura, que predomina la fractura del material vítreo frente a la fractura del grano además de una gran influencia de la porosidad en el comportamiento mecánico del material. De la simulación del modelo se obtiene una metodología que puede ser utilizada para la caracterización de otras

tipologías de muelas en las que se varíe la proporción de componentes y sus propiedades.

La elección de la tipología de muela supone un compromiso entre el costo que supone el desgaste de la herramienta y la calidad de la superficie mecanizada. Queda claro que, la clave para controlar el desgaste volumétrico de una muela con un grado de porosidad tan elevado como la que se estudia en este trabajo está en las propiedades mecánicas del material vítreo. Debe ser lo suficientemente resistente como para, dada la reducción de su sección que implica la alta porosidad, sea capaz de transmitir los esfuerzos y deformarse sin alcanzar la fractura.

Para avanzar en la comprensión del comportamiento mecánico de las muelas de alúmina vitrificada y los fenómenos de fractura predominantes que favorecen su desgaste volumétrico se plantean los siguientes puntos a estudiar a en posibles trabajos futuros:

- Re-caracterización del material vítreo. Fabricación de un molde y macho con acabados lapeados y estricto ajuste que aseguren la correcta fabricación de las esbeltas probetas de material vítreo.
- Realización de ensayos experimentales de probetas de alúmina vitrificada en las que se varíe únicamente el grado de porosidad para estudiar la influencia de este factor en el comportamiento mecánico de la muela.
- Realización de ensayos experimentales de probetas de alúmina vitrificada en las que se varíe únicamente el tipo de aglomerante vítreo para estudiar la influencia de este factor en el comportamiento mecánico de la muela.
- Implementación dentro del software de una opción que permita suprimir dentro de la simulación aquellas partes de material que han sobrepasado sus límites resistentes para estudiar de forma más real la progresión de la fractura y las propiedades mecánicas del material compuesto.
- Estudio de probetas con mayor relación de aspecto, tanto para el modelo como para ensayos experimentales. Esto permitiría asegurar que el ensayo sigue la teoría de vigas de Euler-Bernoulli por ser nulo el cortante en su sección y es más viable la simplificación bidimensional.

9. REFERENCIAS

- [1] S. Malkin y C. Guo, *Grinding Technology: Theory and Application of Machining with Abrasives*. Industrial Press Inc., 2008.
- [2] F. Hashimoto *et al.*, «Abrasive fine-finishing technology», *CIRP Annals*, vol. 65, n.º 2, pp. 597-620, ene. 2016, doi: 10.1016/j.cirp.2016.06.003.
- [3] A. M. Souza y E. J. da Silva, «Global strategy of grinding wheel performance evaluation applied to grinding of superalloys», *Precision Engineering*, vol. 57, pp. 113-126, may 2019, doi: 10.1016/j.precisioneng.2019.03.013.
- [4] E. Brinksmeier *et al.*, «Advances in Modeling and Simulation of Grinding Processes», *CIRP Annals*, vol. 55, n.º 2, pp. 667-696, ene. 2006, doi: 10.1016/j.cirp.2006.10.003.
- [5] J. F. G. Oliveira, E. J. Silva, C. Guo, y F. Hashimoto, «Industrial challenges in grinding», *CIRP Annals*, vol. 58, n.º 2, pp. 663-680, ene. 2009, doi: 10.1016/j.cirp.2009.09.006.
- [6] X. Chen y W. B. Rowe, «Analysis and simulation of the grinding process. Part I: Generation of the grinding wheel surface», *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 36, n.º 8, pp. 871-882, ago. 1996, doi: 10.1016/0890-6955(96)00116-2.
- [7] P. Koshy, V. K. Jain, y G. K. Lal, «Stochastic simulation approach to modelling diamond wheel topography», *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 37, n.º 6, pp. 751-761, jun. 1997, doi: 10.1016/S0890-6955(96)00086-7.
- [8] I. D. Marinescu, M. P. Hitchiner, E. Uhlmann, W. B. Rowe, y I. Inasaki, *Handbook of Machining with Grinding Wheels*. Boca Raton, Fla, 2006.
- [9] J. Webster y M. Tricard, «Innovations in Abrasive Products for Precision Grinding», *CIRP Annals*, vol. 53, n.º 2, pp. 597-617, ene. 2004, doi: 10.1016/S0007-8506(07)60031-6.
- [10] W. B. Rowe, *Principles of Modern Grinding Technology*. Norwich, NY, 2009.
- [11] R. and M. Ltd, «Abrasives Market by Raw material (Natural & Synthetic), Product type (Coated, Bonded, and Super), End-use Industry (Automotive, Machinery, Aerospace, Metal fabrication, Electrical & electronics equipment, Others), and Region - Global Forecast to 2025». <https://www.researchandmarkets.com/reports/5014140/abrasives-market-by-raw-material-natural-and> (accedido 6 de mayo de 2021).
- [12] K. Nadolny, «State of the art in production, properties and applications of the microcrystalline sintered corundum abrasive grains», *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 74, pp. 1445-1457, oct. 2014, doi: 10.1007/s00170-014-6090-2.
- [13] R. X. Wang *et al.*, «Effects of abrasive material and hardness of grinding wheel on rail grinding behaviors», *Wear*, vol. 454-455, p. 203332, ago. 2020, doi: 10.1016/j.wear.2020.203332.
- [14] Q. Miao, W. Ding, Y. Gu, y J. Xu, «Comparative investigation on wear behavior of brown alumina and microcrystalline alumina abrasive wheels during creep feed grinding of different nickel-based superalloys», *Wear*, vol. 426-427, pp. 1624-1634, abr. 2019, doi: 10.1016/j.wear.2019.01.080.
- [15] «Tribology of Abrasive Machining Processes - 1st Edition». <https://www.elsevier.com/books/tribology-of-abrasive-machining-processes/marinescu/978-0-8155-1490-9> (accedido 6 de mayo de 2021).
- [16] D. Herman y J. Markul, «Influence of microstructures of binder and abrasive grain on selected operational properties of ceramic grinding wheels made of alumina», *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 44, n.º 5, pp. 511-522, abr. 2004, doi: 10.1016/j.ijmactools.2003.10.026.

- [17] D. Herman y J. Krzos, «Influence of vitrified bond structure on radial wear of cBN grinding wheels», *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 209, n.º 14, pp. 5377-5386, jul. 2009, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2009.03.013.
- [18] L. Godino, I. Pombo, J. Girardot, J. A. Sanchez, y I. Iordanoff, «Modelling the wear evolution of a single alumina abrasive grain: Analyzing the influence of crystalline structure», *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 277, p. 116464, mar. 2020, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2019.116464.
- [19] S. Malkin y N. H. Cook, «The Wear of Grinding Wheels: Part 2—Fracture Wear», *Journal of Engineering for Industry*, vol. 93, n.º 4, pp. 1129-1133, nov. 1971, doi: 10.1115/1.3428052.
- [20] S. Lachance, A. Warkentin, y R. Bauer, «Development of an automated system for measuring grinding wheel wear flats», *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 22, n.º 2, pp. 130-135, ene. 2003, doi: 10.1016/S0278-6125(03)90010-0.
- [21] K. Nadolny, «Wear phenomena of grinding wheels with sol-gel alumina abrasive grains and glass-ceramic vitrified bond during internal cylindrical traverse grinding of 100Cr6 steel», *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, oct. 2014, doi: 10.1007/s00170-014-6432-0.
- [22] W. Ding, Y. Zhu, J.-H. Xu, y Y. Fu, «Finite element investigation on the evolution of wear and stresses in brazed CBN grits during grinding», *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 81, may 2015, doi: 10.1007/s00170-015-7262-4.
- [23] X. Li, G. Zhi, S. Wolf, T. Zhu, y Y. Rong, «Modelling and analysis of the bonding mechanism of CBN grains for electroplated superabrasive tools—part 2: finite element modelling and experimental verification», *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 77, pp. 43-49, mar. 2014, doi: 10.1007/s00170-014-6412-4.
- [24] T. Bergs, M. Ohlert, S. Prinz, y S. Barth, «Modeling of the Fracture Behavior of CBN Grains during Single Grain Dressing using FEM», *Procedia CIRP*, vol. 93, pp. 1514-1519, ene. 2020, doi: 10.1016/j.procir.2020.03.021.
- [25] H. N. Li, T. Yu, L. Zhu, y W. Wang, «Modeling and simulation of grinding wheel by discrete element method and experimental validation», *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 81, may 2015, doi: 10.1007/s00170-015-7205-0.
- [26] 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.
- [27] C. B. Ponton, «The mechanical properties of glass-ceramics in the system cao - mgo - a12 O3 - siO2», Department of Materials, Royal School of Mines, Imperial College of Science and Technology, London, 1987.
- [28] M. Moser, *Microstructures Ceramics: Structure and Properties of Grinding Tools*. Budapest: Akademiai Kiado, 2002.
- [29] «ASTM C1684 - 18 Standard Test Method for Flexural Strength of Advanced Ceramics at Ambient Temperature—Cylindrical Rod Strength». <https://www.astm.org/Standards/C1684.htm> (accedido 6 de mayo de 2021).
- [30] «ASTM C1327-03 Standard Test Method for Vickers Indentation Har...» <https://www.aenor.com/normas-y-libros/buscador-de-normas/astm?c=031767> (accedido 6 de mayo de 2021).
- [31] C14 Committee, «Test Method for Knoop Indentation Hardness of Glass», ASTM International. doi: 10.1520/C0730-98R21.
- [32] B. Seeber, U. Gonzenbach, y L. Gauckler, «Mechanical properties of highly porous alumina foams», *Journal of Materials Research*, vol. 28, sep. 2013, doi: 10.1557/jmr.2013.102.
- [33] H. Frandsen, T. Ramos, A. Faes, M. Pihlatie, y K. Brodersen, «Optimization of the Strength of SOFC Anode Supports», *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 32, pp. 1041-1052, may 2012, doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2011.11.015.

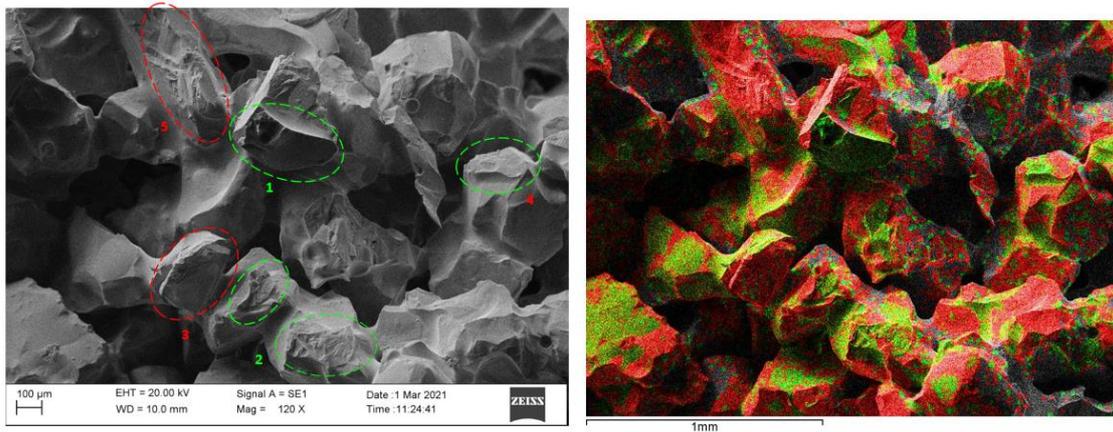
-
- [34] Z. Cui, Y. Huang, y H. Liu, «Predicting the mechanical properties of brittle porous materials with various porosity and pore sizes», *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, vol. 71, pp. 10-22, jul. 2017, doi: 10.1016/j.jmbbm.2017.02.014.
- [35] H. Lee, K. Sadasue, Y. Ito, y T. Wakabayashi, *Static modeling of grinding wheel*.
- [36] T. Yamada y H.-S. Lee, «Estimation of Elastic Deformations and Fracture Peripheral Speeds of Grinding Wheels due to Centrifugal Forces by Means of Grinding Wheels Model», p. 6.
- [37] J. Zhang y Q. Liu, «Determination of concrete fracture parameters from a three-point bending test», *Tsinghua Science and Technology*, vol. 8, n.º 6, pp. 726-733, dic. 2003.
- [38] G. Etse, A. Caggiano, y S. Vrech, *Continuum And Discrete Approaches For Failure Analysis Of Fiber-Reinforced Concrete*. 2010.
- [39] K. Lundgren, «Three point bending and uni-axial tension tests of double hook-end fibers», Accedido: 27 de mayo de 2021. [En línea]. Disponible en:
https://www.academia.edu/48551719/Three_point_bending_and_uni_axial_tension_tests_of_double_hook_end_fibers
- [40] «Properties: Supplier Data - Sapphire Single Crystal (Alumina 99.9%) - (Goodfellow)», *AZoM.com*. <https://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=1721> (accedido 8 de agosto de 2021).
- [41] Y. Matsuno y H. Yamada, «Elastic Moduli of Grinding Wheel Based on a Simplified Model», *Journal of the Ceramic Association, Japan*, vol. 90, n.º 1042, pp. 320-325, 1982, doi: 10.2109/jcersj1950.90.1042_320.

10. ANEXO IMÁGENES SEM

En este documento anexo se incluyen todas las imágenes tomadas durante los análisis SEM-EDAX de las muestras de las probetas de alúmina vitrificada empleadas en los ensayos de flexión a 3 puntos.

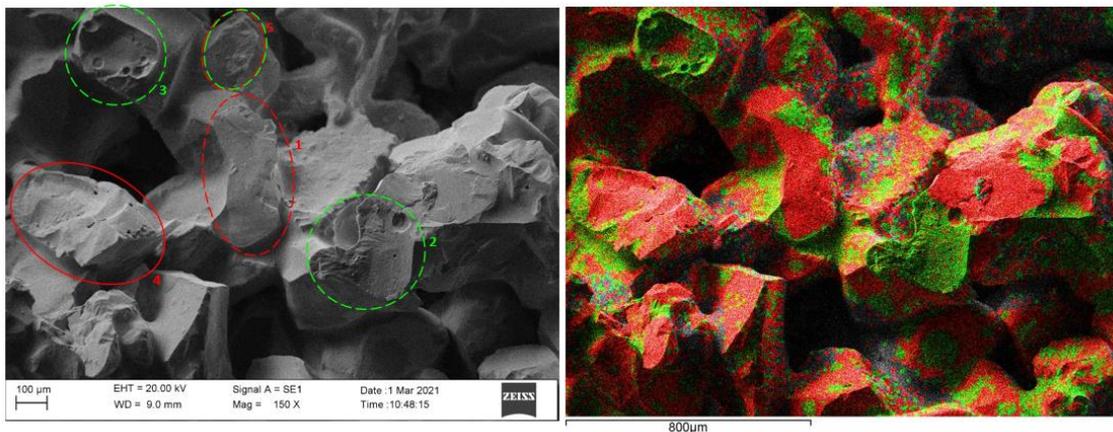
10.1 Primer análisis visual

En este apartado se incluyen las imágenes tomadas en el primer análisis visual de la cara de la fractura de las probetas ensayadas en el primer bloque experimental que se describe en el capítulo 5. Todas las imágenes pertenecen a la misma tipología de muela abrasiva, 5MBA



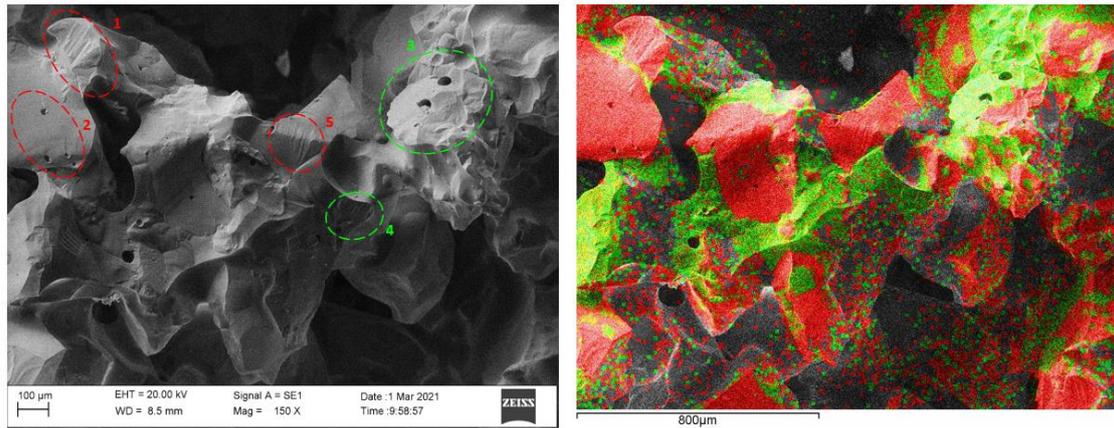
- 1, 2 → Fractura de un puente de vítreo
- 5, 3 → Fractura del grano
- 4 → Fractura del vítreo en zona próxima al grano

Figura 1: Análisis SEM-EDAX de zona de tracción en probeta 5MBA del bloque experimental 1



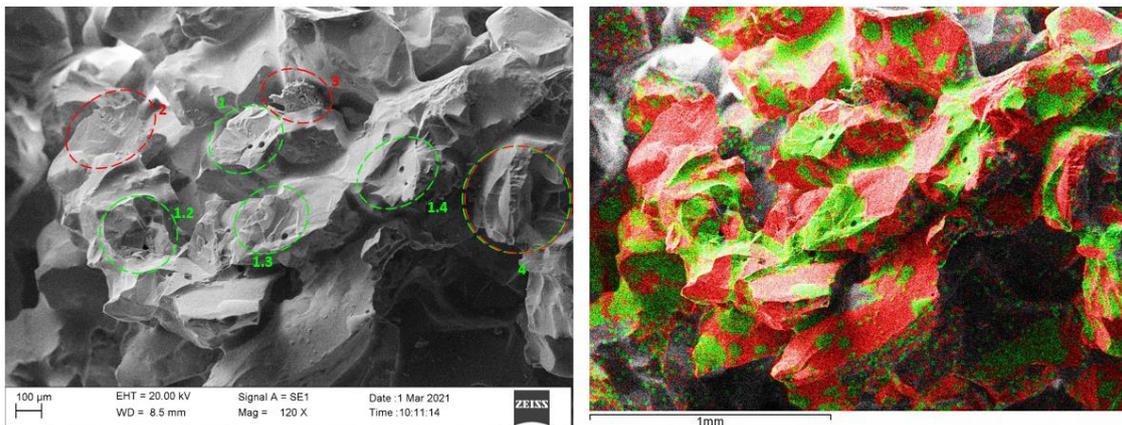
- 1 → Posibles fractura del grano
- 4 → Grano sin fractura
- 2 → Fractura de un puente de vítreo (Alúmina en el centro)
- 4 → Fractura del vítreo. (El poro no está claro a qué pertenece)
- 5 → Posible fallo por adhesión

Figura 2: Análisis SEM-EDAX de zona de tracción en probeta 5MBA del bloque experimental 1



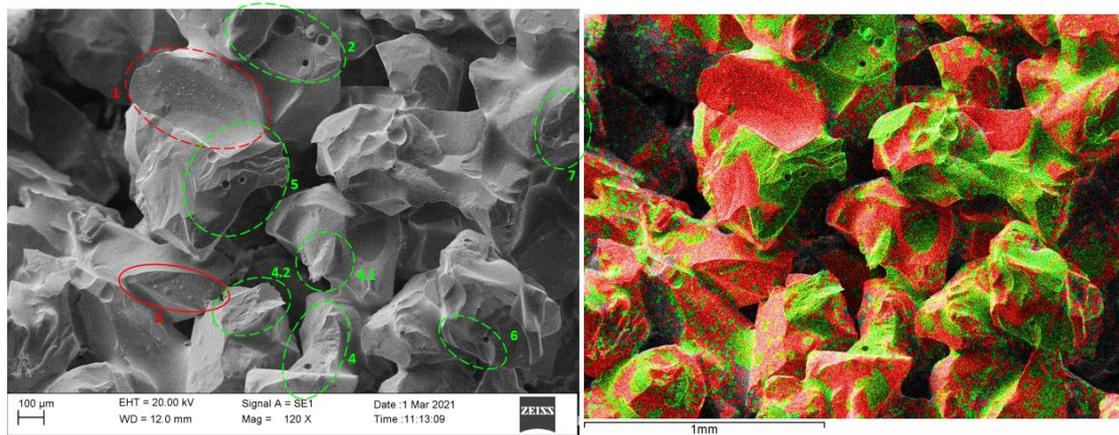
- 1,2,5 → Posibles fractura del grano. Presentan pequeñas porosidades
- 3 → Aglomerante de mayores porosidades
- 4 → Fractura del vítreo.

Figura 3: Análisis SEM-EDAX de zona de compresión en probeta 5MBA del bloque experimental 1.



- 1, 1.2, 1.3, 1.4 → Posibles cráteres por fallo por adhesión
- 2 → Posible fractura de grano
- 4 {
-Fallo del grano (dcha)
-Fractura de aglomerante que recubría el grano

Figura 4: Análisis SEM-EDAX de zona de compresión en probeta 5MBA del bloque experimental 1.



- 1 → Posible fractura de grano
- 3 → Filo de grano expuesto.
- 2,5 → Fractura de puente de aglomerante
- 4, 4,1, 4,2 → Desconchamiento de aglomerante

Figura 5: Análisis SEM-EDAX de zona de tracción en probeta 5MBA del bloque experimental 1

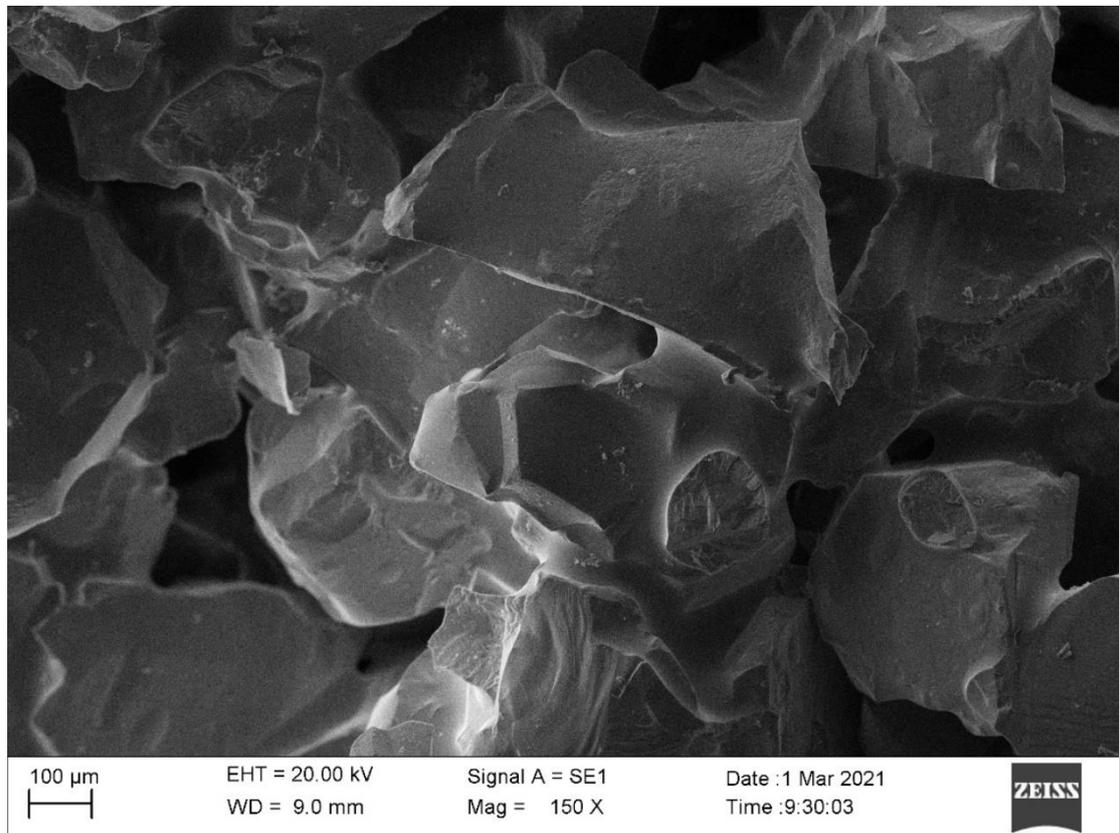


Figura 6: Imagen SEM de zona de compresión en probeta 5MBA del bloque experimental 1

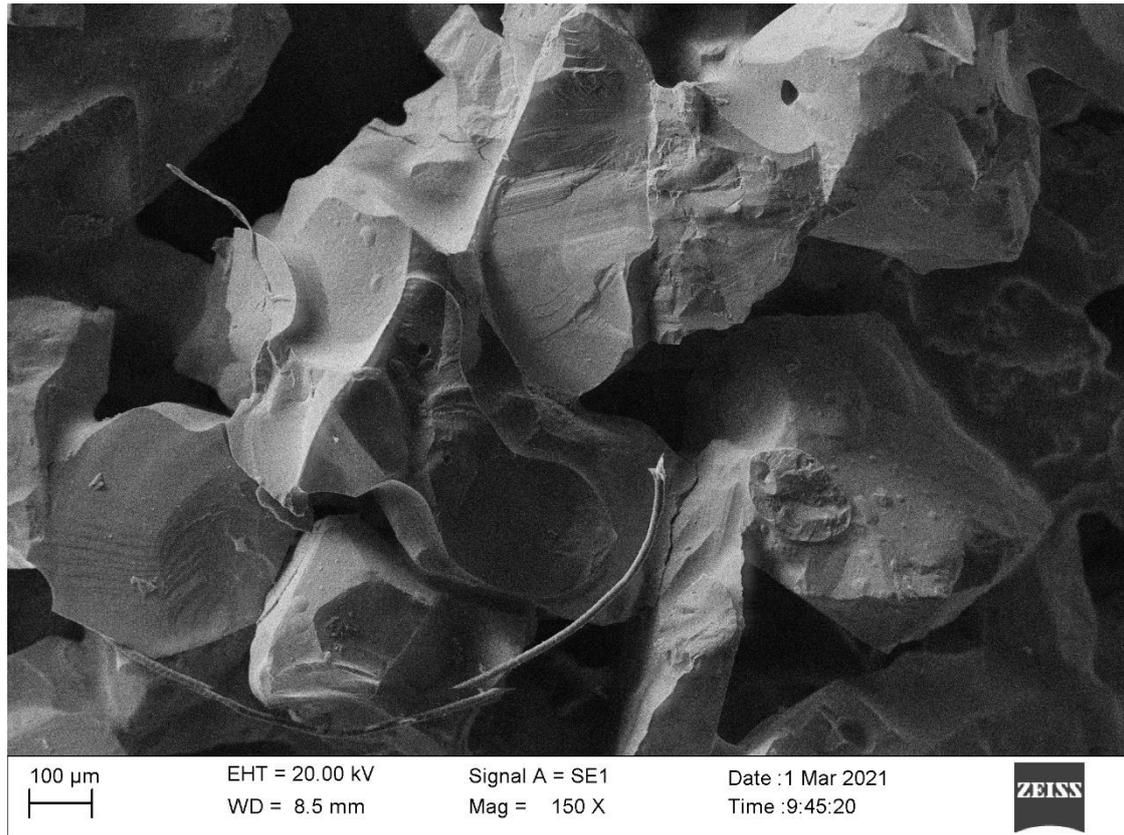


Figura 7: Imagen SEM de zona de compresión en probeta 5MBA del bloque experimental 1

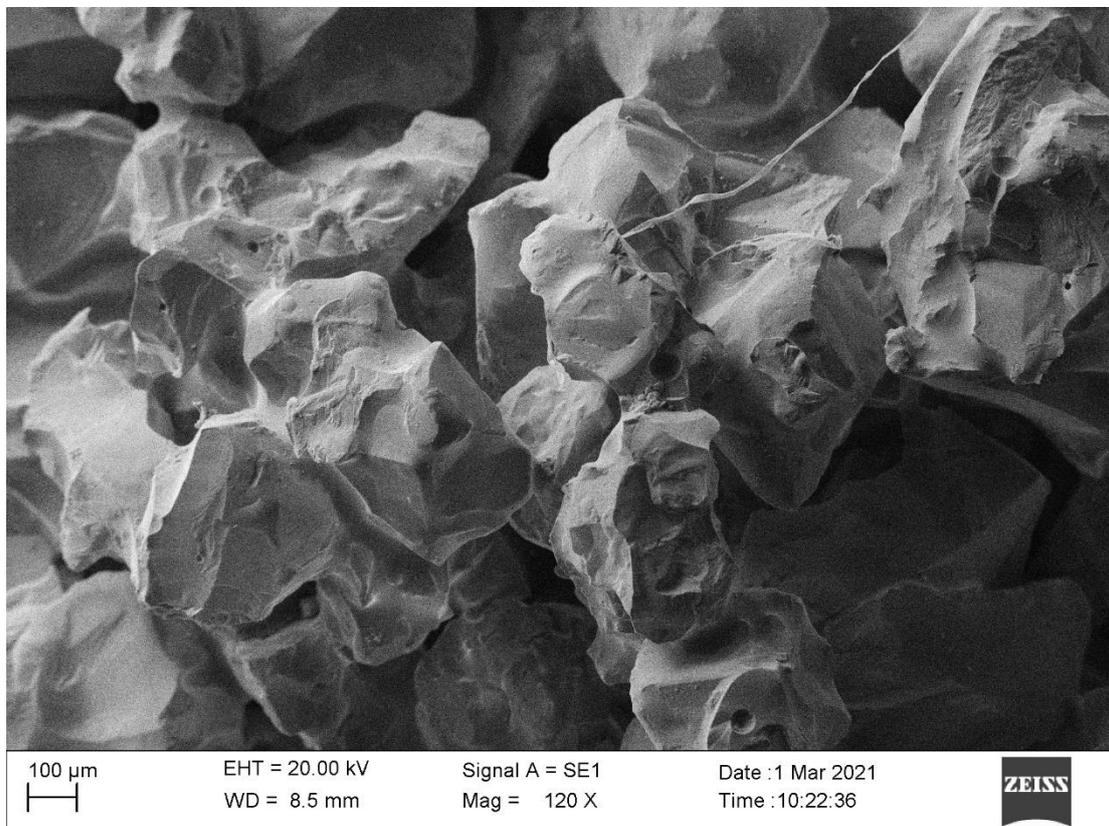


Figura 8: Imagen SEM de zona de compresión en probeta 5MBA del bloque experimental 1.

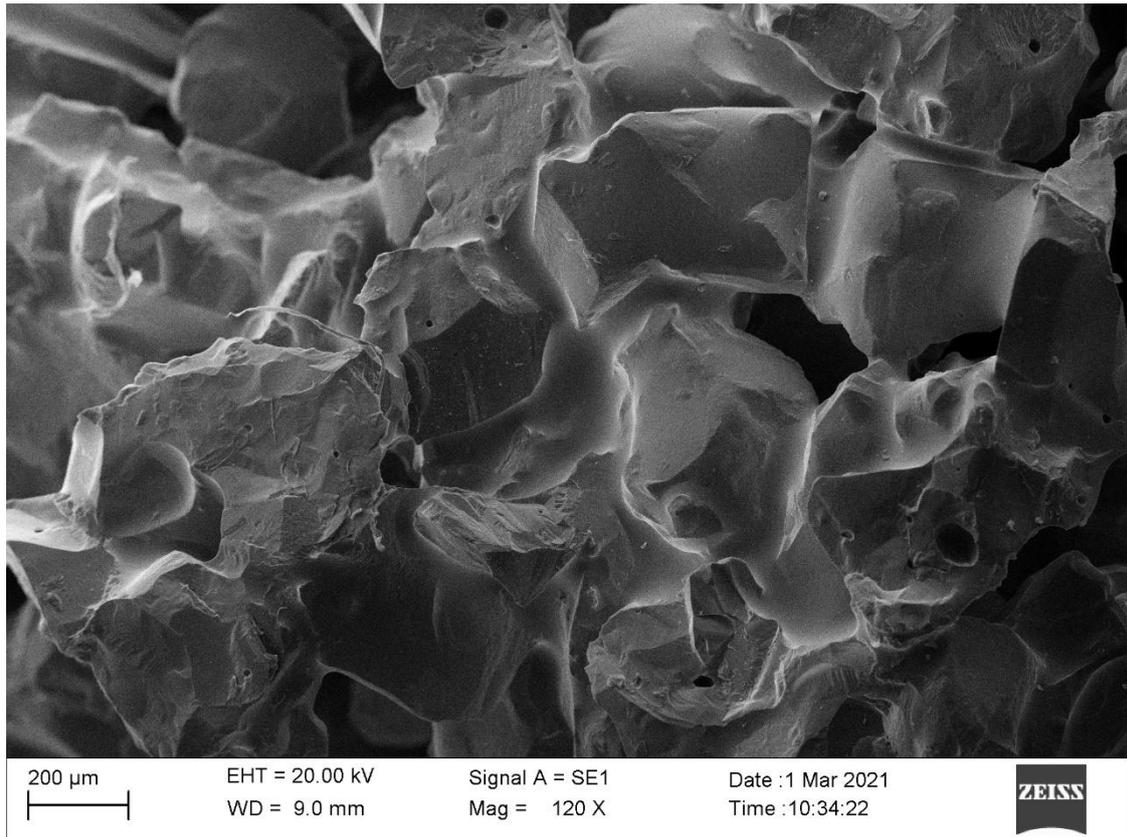


Figura 9: Imagen SEM de zona de tracción en probeta 5MBA del bloque experimental 1.

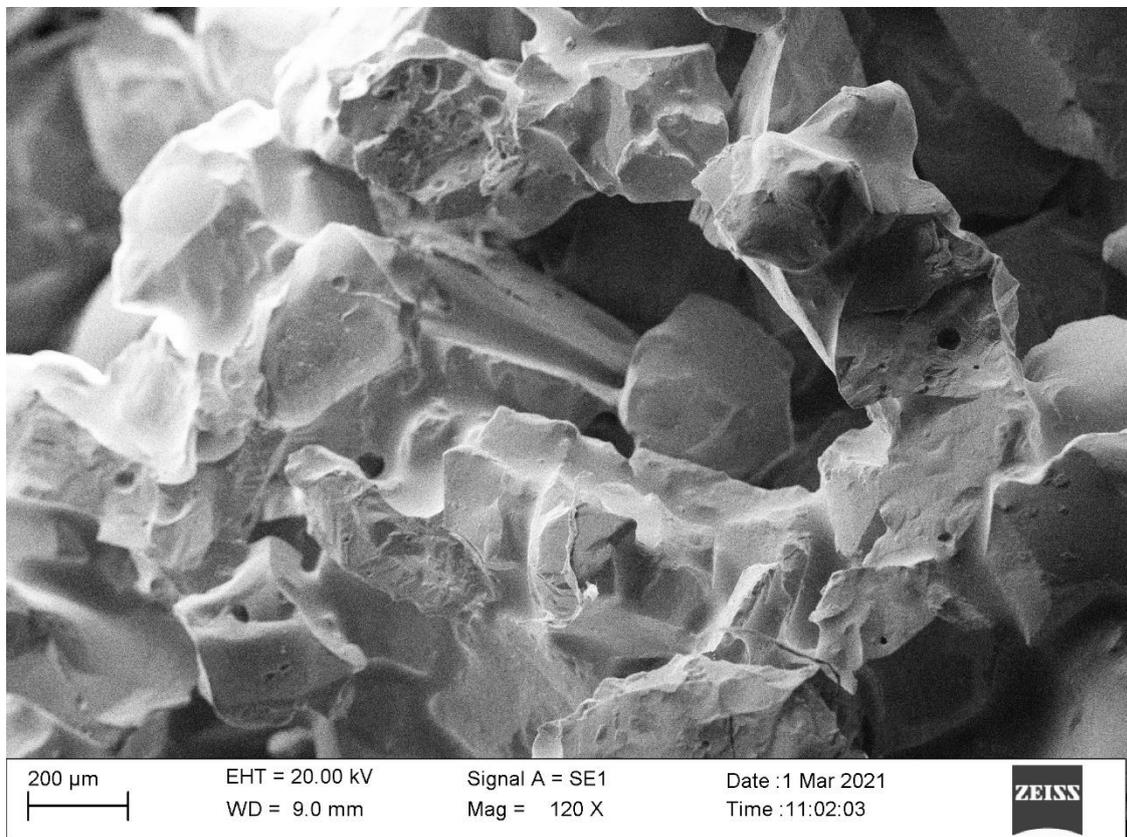


Figura 10: Imagen SEM de zona de tracción en probeta 5MBA del bloque experimental 1.

10.1 Primer análisis visual

En este apartado se incluyen las imágenes tomadas en el segundo análisis visual de la cara de la fractura de las probetas ensayadas en el segundo bloque experimental que se describe en el capítulo 5. Se incluyen imágenes de las tres tipologías de muela; MA, 5MBA, CBL.

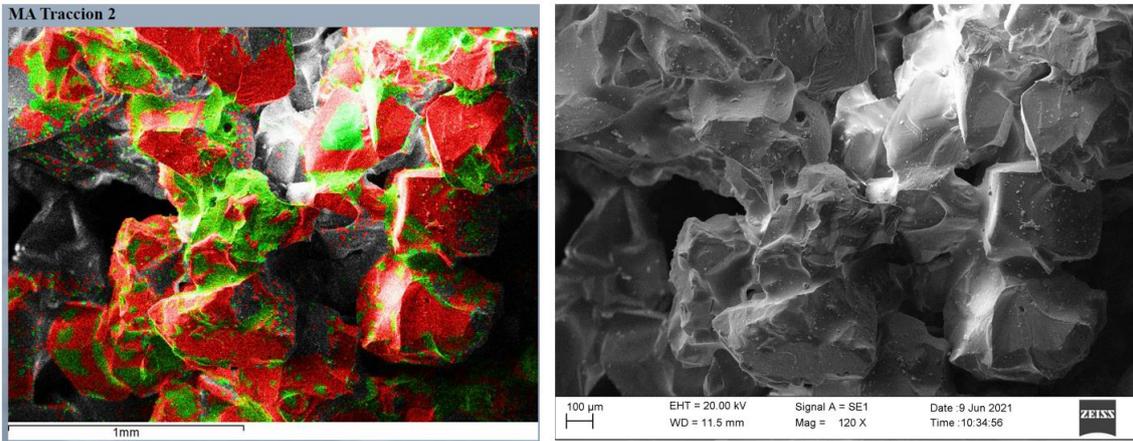


Figura 11: Análisis SEM-EDAX de zona de tracción en probeta MA del bloque experimental 2

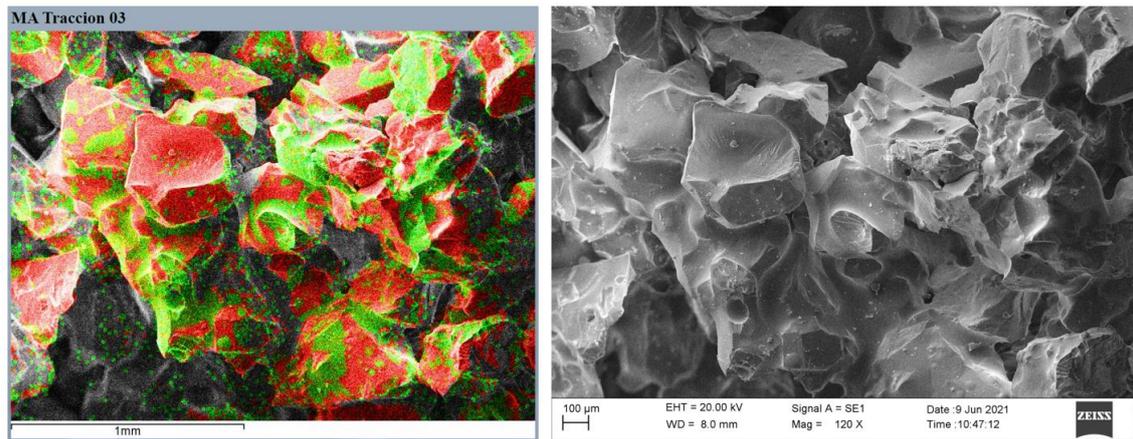


Figura 12: Análisis SEM-EDAX de zona de tracción en probeta MA

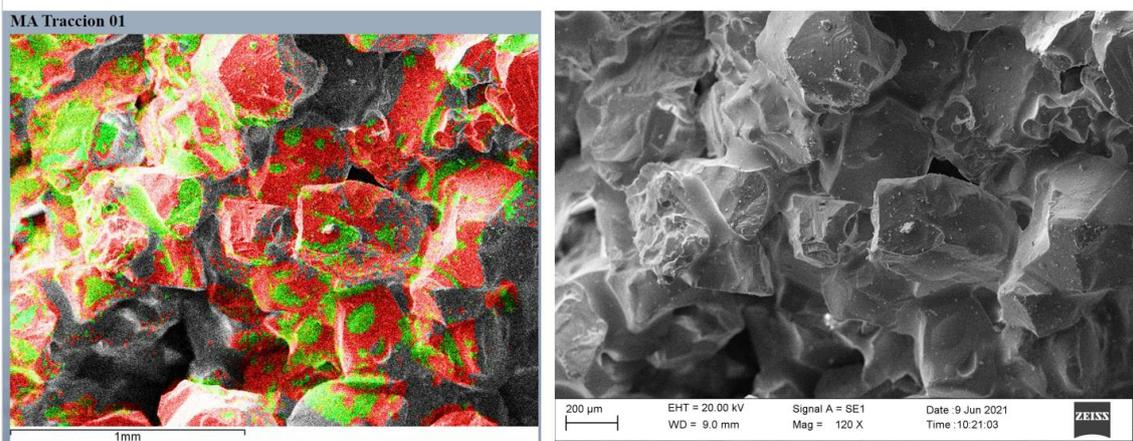


Figura 13: Análisis SEM-EDAX de zona de tracción en probeta MA del bloque experimental

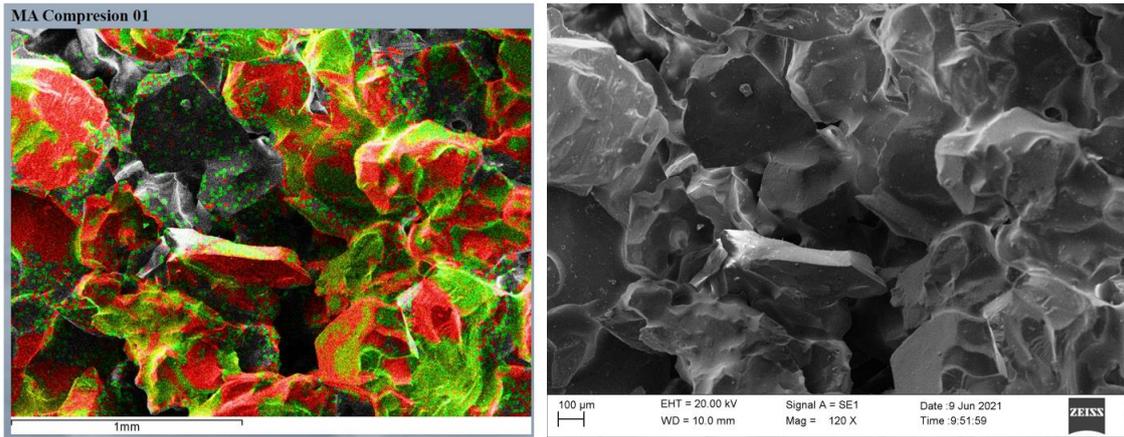


Figura 14: Análisis SEM-EDAX de zona de tracción en probeta MA del bloque experimental 2

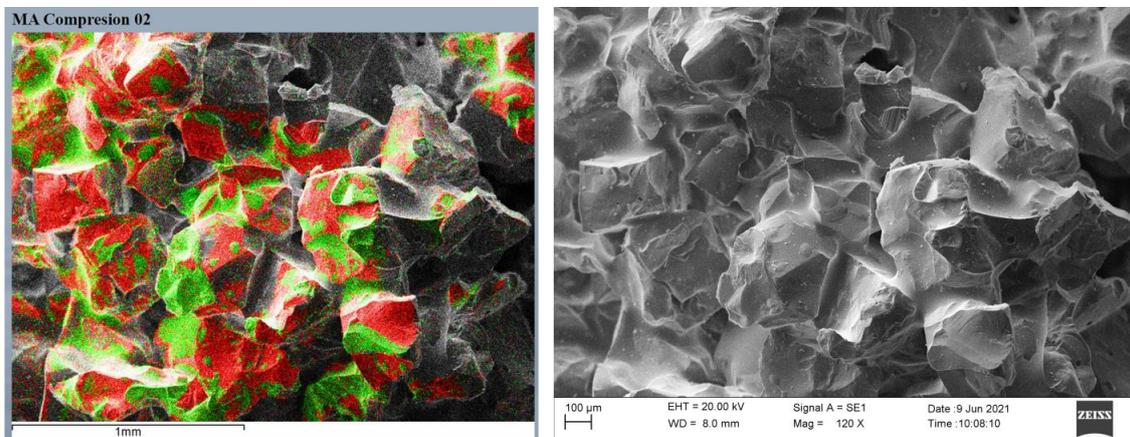


Figura 15: Análisis SEM-EDAX de zona de compresión en probeta MA del bloque experimental 2

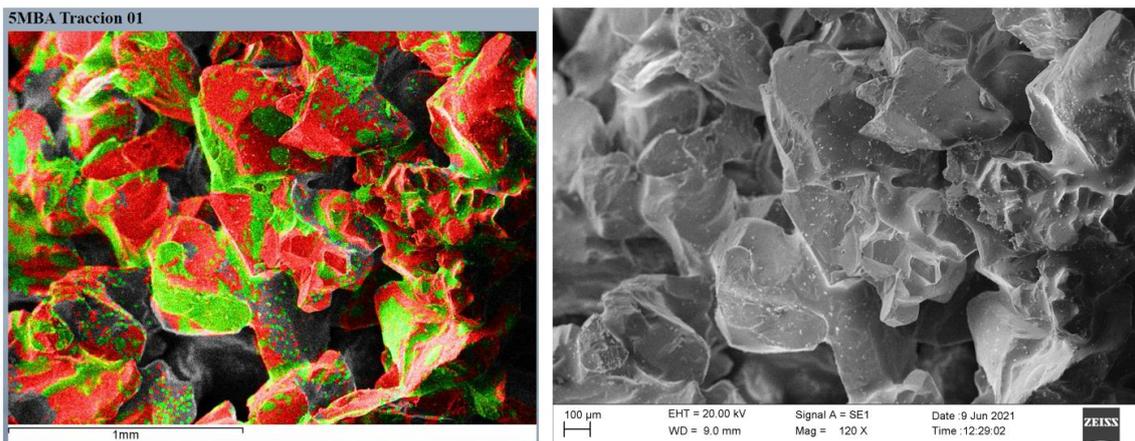


Figura 16: Análisis SEM-EDAX de zona de tracción en probeta 5MBA del bloque experimental 2

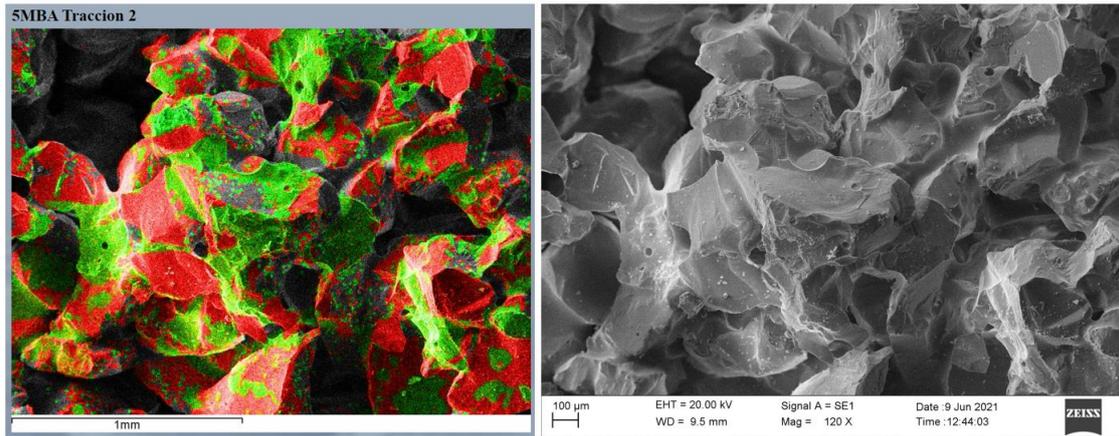


Figura 17: Análisis SEM-EDAX de zona de tracción en probeta 5MBA del bloque experimental 2

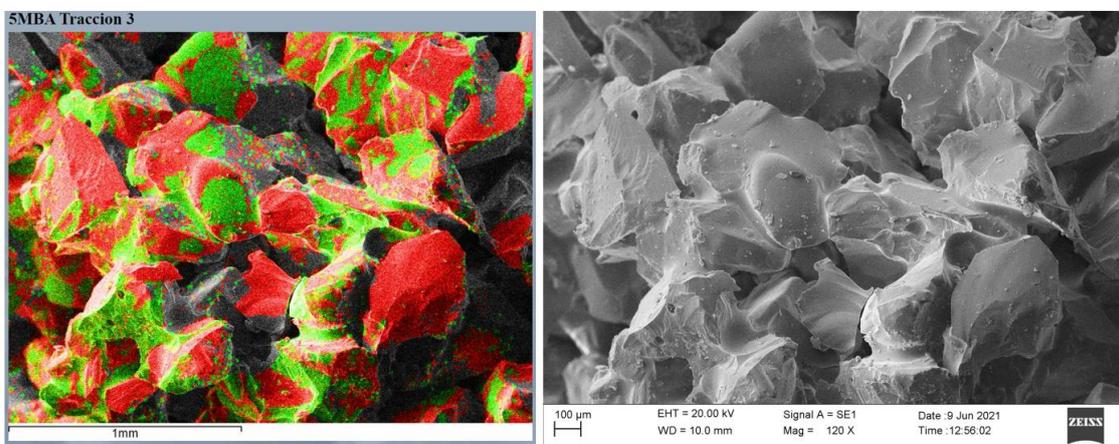


Figura 18: Análisis SEM-EDAX de zona de tracción en probeta 5MBA del bloque experimental 2

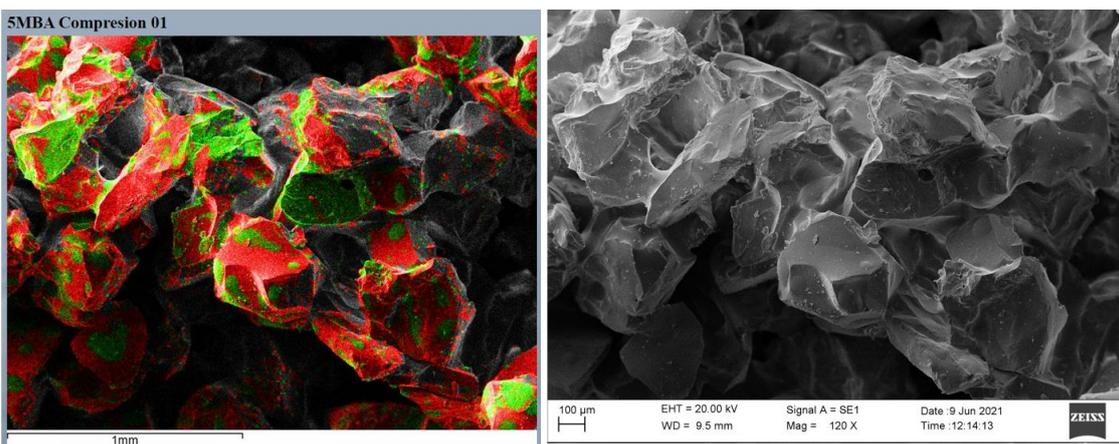


Figura 19: Análisis SEM-EDAX de zona de compresión en probeta 5MBA del bloque experimental 2

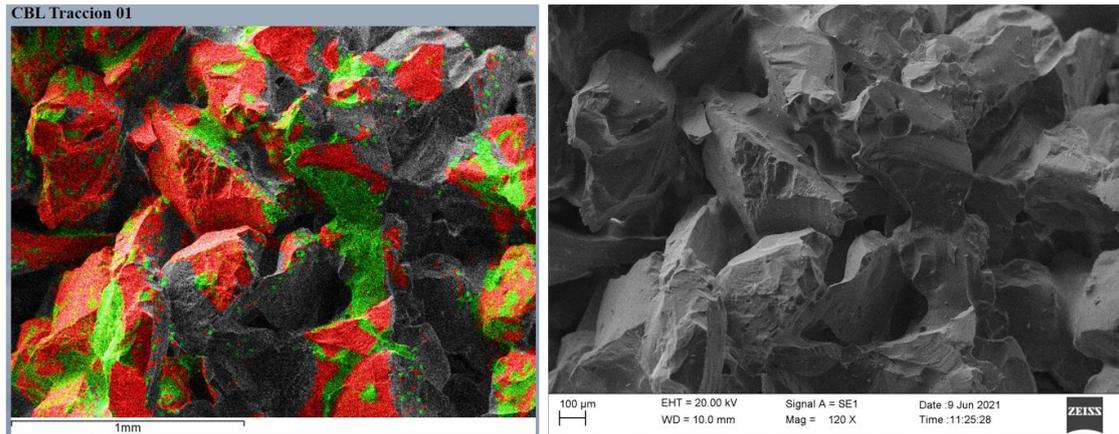


Figura 20: Análisis SEM-EDAX de zona de tracción en probeta CBL del bloque experimental 2.

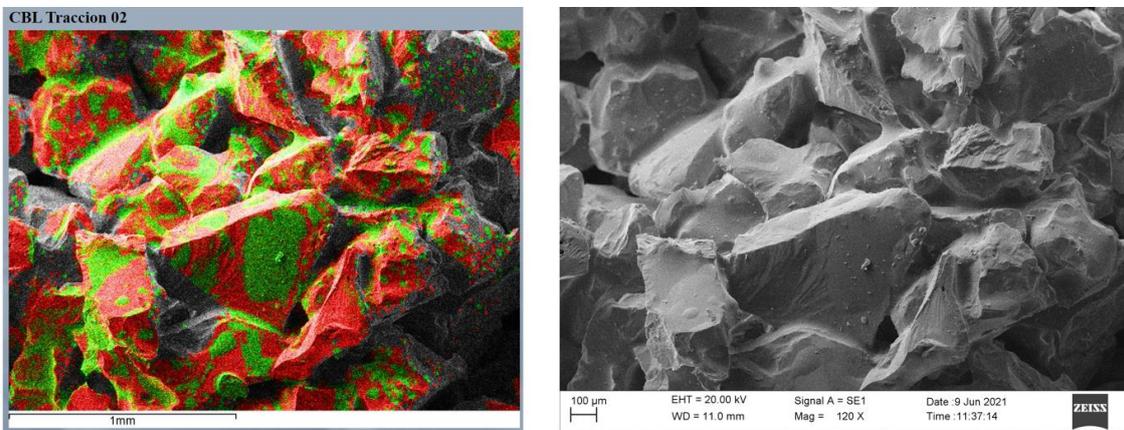


Figura 21: Análisis SEM-EDAX de zona de tracción en probeta CBL del bloque experimental 2

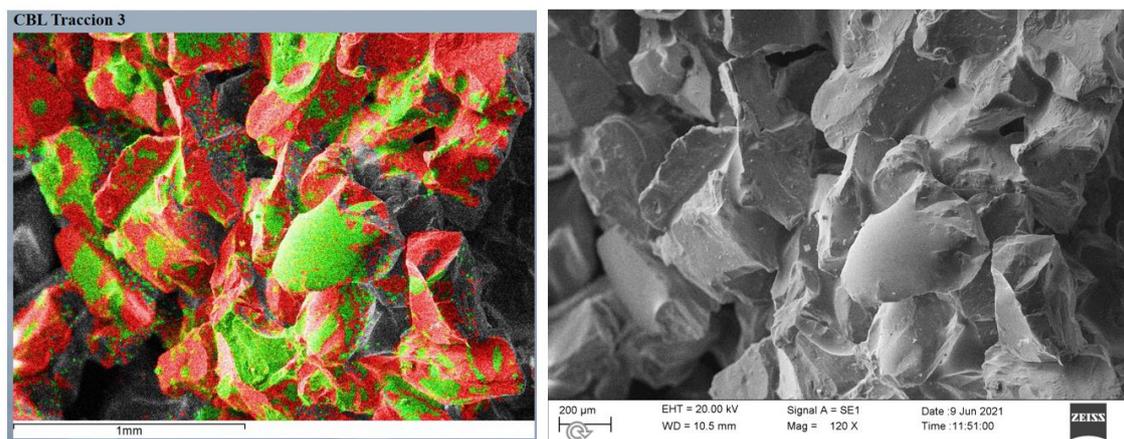


Figura 22: Análisis SEM-EDAX de zona de tracción en probeta CBL del bloque experimental 2.

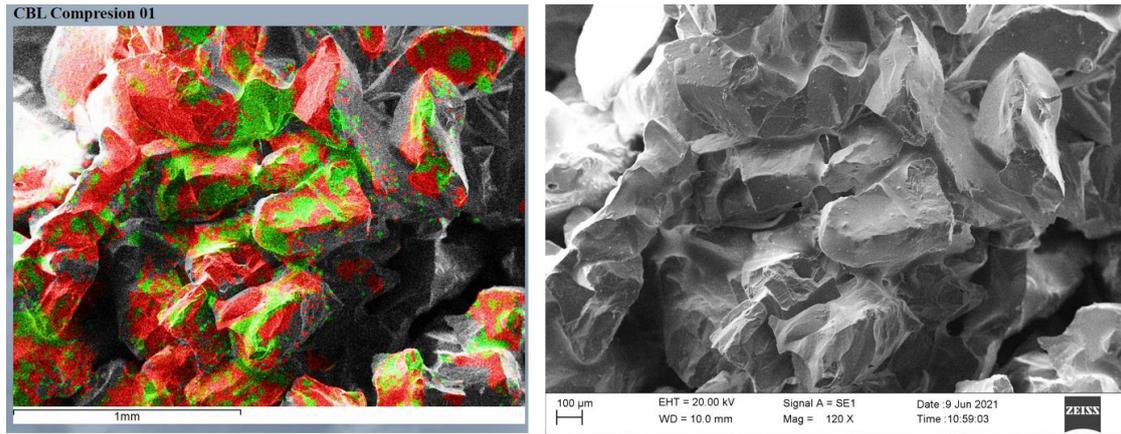


Figura 23: Análisis SEM-EDAX de zona de compresión en probeta CBL del bloque experimental 2