

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN
INGENIERÍA MECÁNICA**

TRABAJO FIN DE MÁSTER

***MECANIZADO ABRASIVO DE MATERIALES
COMPUESTOS DE MATRIZ CERÁMICA***

Estudiante
Director
Departamento
Curso académico

Hidrogo, Mendoza, Luis
Alonso, Unai
Ingeniería Mecánica
2020-2021

Bilbao, 31, agosto, 2021

RESUMEN

A continuación, se presenta el Trabajo de Fin de Máster, que esta fundamentado en el análisis del mecanizado abrasivos de CMC (compuestos de matriz cerámica), desarrollada en el curso 2020-2021.

Los CMC (compuesto de matriz cerámica) son materiales que existen ya muchos años, pero debido al alto precio que tienen no se había incentivado el uso de estos materiales y mucho menos su investigación. Con la necesidad actual que existe de buscar materiales que tengan mejor comportamiento al desgaste, fatiga, resistencia a la temperatura, entre otras propiedades, ya que estas propiedades mecánicas de los materiales son fundamentales para el desarrollo de piezas mas ligeros y sobre todo mas resistente. Todo lo antes mencionado ha hecho que estos materiales entren a la carrera aeroespacial y de la automoción predominantemente. En el campo de la aeronáutica esta en amplio desarrollo el uso de materiales de matiz cerámica primero que todo por el poco peso que aportan al fuselaje y su gran resistencia, como también a partes de la turbina del avión donde existe alta temperatura y presión. Por otro lado, también tenemos la necesidad en el campo de la automoción entre sus grandes aportaciones en la carrocería como también en el sistema de frenado de los automóviles.

Viendo el grande crecimiento que esta teniendo este material y la poca información que existe de este es la razón fundamental de esta investigación, la cual se forma de dos etapas muy importantes la primera parte es una revisión bibliográfica intensa sobre los materiales de matriz cerámica como se fabrican, sus aplicaciones y sobre todo el génesis de nuestra investigación que es el mecanizado de estos materiales, pero sobre todo el mecanizado abrasivo y la segunda parte es utilizando toda la información y conocimiento adquirida y partiendo de esos conocimientos creamos una campaña de ensayos, la cual consiste de cambiar diferentes parámetros de mecanizado de tal manera podamos analizar la influencia que existe de cada uno de ellos en el acabado superficial y los posibles daños que pueda existir en la herramienta o pieza. Para el análisis de daños y acabado superficial será analizado por microscopio confocal y una lupa, los cuales nos proporcionaran información en tres y dos dimensiones, que tal manera podamos analizar de mejor el comportamiento de la herramienta abrasiva a distintos parámetros de mecanizado.

Palabras clave: Mecanizado abrasivo; CMC; microscopio confocal; lupa; acabado superficial; automoción; aeroespacial

ABSTRACT

The Master's Final Project is presented below, which is based on the analysis of abrasive machining of CMC (ceramic matrix compounds), developed in the 2020-2021 academic year.

CMC (ceramic matrix composite) are materials that have existed for many years, but due to the high price they have, the use of these materials had not been encouraged, much less their research. With the current need that exists for materials that have better behavior to wear, fatigue, resistance to temperature, among other mechanical properties, since these mechanical properties of the materials are fundamental for the development of lighter pieces and above all more resistant. All the aforementioned has made these materials enter the aerospace and automotive careers predominantly. In the field of aeronautics, the use of ceramic-hued materials is in wide development, first because of the low weight they contribute to the fuselage and their great resistance, as well as to parts of the aircraft turbine where there is high temperature and pressure. On the other hand, we also have the need in the automotive field among its great contributions in the bodywork as well as in the braking system of cars.

Seeing the great growth that this material is having and the little information that exists about it is the fundamental reason for this research, which is made up of two very important stages, the first part is an intense bibliographic review on ceramic matrix materials as: manufacture, their applications and above all the genesis of our research which is the machining of these materials, but above all abrasive machining and the second part is using all the information and knowledge acquired and based on that knowledge we create a test campaign, the which consists of changing different machining parameters in such a way that we can analyze the influence of each of them on the surface finish and the possible damage that may exist in the tool or part. For the analysis of damage and surface finish, it will be analyzed by a confocal microscope and a magnifying glass, which will provide us with information in three and two dimensions, so that we can better analyze the behavior of the abrasive tool at different machining parameters.

Keywords: Abrasive machining; CMC; confocal microscope; magnifying glass; surface finish; automotive; aerospace

LABURPENA

Ondoren, Master amaierako Proiektua aurkezten da, 2020-2021 ikasturtean garatutako CMC (zeramika matrize konposatuak) mekanizazio urratzailearen analisisian oinarrituta.

CMC (zeramikazko matrize konposatua) urte asko daramatzaten materialak dira, baina daukaten prezio altuagatik, material horien erabilera ez zen bultzatu eta are gutxiago haien ikerketa. Higaduraren, nekearen eta temperaturarekiko erresistentziaren portaera hobea duten materialak bilatzeko gaur egun dagoen beharrarekin, materialen ezaugarri mekaniko horiek oinarritzkoak baitira pieza arinagoak garatzeko eta batez ere erresistenteagoak. Aipatutako guztiak material horiek aeroespazial eta automobilgintzako karreretan sartu dira nagusiki. Aeronautika arloan, zeramika koloreko materialen erabilera garapen handian dago, lehenik eta behin fuselajeari eta erresistentzia handiari laguntzen dieten pisu txikiarengatik, baita temperatura altua duten hegazkinetako turbina zatietan ere. eta presioa. Bestalde, automobilgintzan ere beharra dugu karrozerian egindako ekarpen handien artean, baita autoen balaztatze sisteman ere.

Material honek izaten ari den hazkunde handia eta horri buruz dagoen informazio eskasa ikustea oso garrantzitsua den bi etapek osatzen duten ikerketa honen funtsezko arrazoa da, lehenengo zatia zeramikazko matrize materialen gaineko berrikuspen bibliografiko bizia da. fabrikazioa, haien aplikazioak eta batez ere gure ikerketaren sorrera, hau da, material horien mekanizazioa, baina batez ere urratze mekanizazioa eta bigarren zatia eskuratutako informazio eta ezagutza guztia erabiliz eta ezagutza horretan oinarrituta test kanpaina bat sortzen dugu. Mekanizazio parametro desberdinak aldatzean datza, bakoitzak azaleko akaberan duen eragina eta erremintan edo piezan izan daitezkeen kalteak aztertu ahal izateko. Kalteak eta gainazalaren akabera aztertzeke, mikroskopia konfokalaren eta lupa baten bidez aztertuko da. Horrek hiru dimentsiotako eta bi dimentsiotako informazioa emango digu, tresna urratzaileak mekanizazio parametro desberdinetan duen portaera hobeto aztertzeke.

Hitz gakoak: Urratze mekanizazioa; CMC; mikroskopia konfokala; lupa; gainazalaren akabera; automobilgintza; aeroespaziala

CONTENIDO

RESUMEN	2
ABSTRACT	3
LABURPENA	4
ÍNDICE DE FIGURA	7
ÍNDICE DE TABLAS	10
ÍNDICE DE GRÁFICOS	12
1. INTRODUCCIÓN	14
2. CONTEXTO	16
3. OBJETIVOS Y ORGANIZACIÓN DEL PROYECTO	19
3.1 Objetivos	19
3.2 Diagrama de Gantt	22
4. ESTADO DEL ARTE	23
4.1. Materiales compuestos de matriz cerámica: Cf/C, Cf/SiC, SiCf/SiC	23
4.2. Fibra de carbono y matriz de carbono	24
4.2.1. Arquitecturas fibrosas (conocidas como "texturas")	25
4.2.2. Los procesos de desarrollo de la matriz	26
4.3. Fibra de carbono y matriz de SiC	28
4.4. Fibra de SiC y matriz de SiC	31
4.5. Propiedades mecánicas y físicas	34
4.5.1. Fibra de carbono y matriz de carbono	34
4.5.2. Fibra de carbono y matriz de SiC	35
4.5.3. Fibra de SiC y matriz de SiC	38
4.6. Proveedores y coste	40
4.7. Aplicaciones.....	43
4.8. Mecanizado abrasivo de los CMC	59
4.8.1. Procesos de mecanizado abrasivo utilizados.....	60
4.8.2. Acabado superficial del mecanizado abrasivo	67
4.8.3. Relación de la rugosidad con la Energía Específica de Corte	69
4.8.4. Efecto de Distintos Métodos de Mecanizado sobre la Rugosidad.....	70
4.8.5. Síntesis de las condiciones de corte y máquinas utilizadas	72
4.8.6. Mecanismos de corte	74
4.8.7. Mecanismo de arranque de material basado en corte ortogonal	75
4.8.8. Mecanismo de arranque de material basado en rayado	76
4.8.9. Propiedades del material a nano/microescala y mecanismo de eliminación.	78
4.8.10. Rectificado de CMCs.....	80
4.8.11. Daño al material.....	83
4.9. Herramientas abrasivas, proveedores y coste	85
4.9.1. ETORKI	90
4.9.2. PFERD.....	93

4.10.	Conclusiones sobre el estado del arte.....	93
5.	METODOLOGÍA	96
5.1	Material seleccionado.....	96
5.2	Herramienta seleccionada y condicionada por la limitación de la máquina A6 (15.000 rpm)	96
5.3	Diseño de Experimentos.....	98
5.4	Posicionamiento del material y medidas de fuerzas.....	99
5.5	Metodología de medición del daño.....	100
5.6	Análisis de varianza de los resultados (ANOVA).....	102
5.7	Análisis de la superficie mecanizada y del desgaste de las muelas	104
5.8	Análisis fractal	105
5.8.1	La importancia del desgaste de las herramientas diamantadas para mecanizado de CMCs.....	105
5.8.2	El uso de fractales para el análisis de mecanizado.....	106
5.8.3	Método propuesto para determinar la dimensión fractal.....	108
6.	Resultados	113
6.1	Evolución de las fuerzas de corte	113
6.2	Evolución del daño.....	117
6.3	Relación entre el daño y la fuerza normal.....	126
6.4	Evolución del desgaste de la herramienta.....	130
6.5.	Evolución de la rugosidad de la pieza	134
7.	ASPECTOS ECONÓMICOS	145
8.	CONCLUSIONES	147
8.1	Sobre objetivos.....	147
8.2	La herramienta	148
8.3	El material.....	149
8.4	Esfuerzos de corte.....	150
9	BIBLIOGRAFÍA	153
	<i>ANEXO I: Las propiedades mecánicas del SIGRABOND® Standard y sus precios.</i>	<i>157</i>
	<i>ANEXO II: Ejemplos de herramientas propuestas por ETORKI para este estudio, diagrama de la herramienta y precios.....</i>	<i>160</i>
	<i>ANEXO III: Herramienta de diamantar las herramientas de la empresa PFERD</i>	<i>162</i>

ÍNDICE DE FIGURA

Figura 1.Los CMC ofrecen una capacidad de temperatura más alta en comparación con metales como el titanio y el níquel (gráfico superior) y aleaciones como el Inconel (por ejemplo, IN738, IN939 e IN792 DS en el gráfico inferior) [1].....	17
Figura 2.Crecimiento del mercado de los CMC a nivel mundial (CMC de matriz de óxidos, carburo de silicio, carbono y otro tipo de matriz cerámica).[1].....	18
Figura 3.Ejemplos de arquitecturas fibrosas n-D	26
Figura 4.Cuello de boquilla 4D para aplicaciones de defensa: (izda.) Arquitectura fibrosa; (dcha.) Cuello de boquilla finalizado de los boosters del cohete Ariane V.....	26
Figura 5.Micrografías ópticas de material compuesto de SiC con: (a) uno y (b) tres ciclos de infiltración / carbonización de líquido.....	31
Figura 6. Micrografías ópticas: (a) Cf/SiC composite y (b) Cf/SiC composite por SPS.....	31
Figura 7.Cadena del proceso de fabricación para composites de matriz de SiC reforzados con fibra de SiC. El paso final es la infiltración por fusión (MI) de silicio líquido en la preforma compuesta carbonizada para formar el compuesto cerámico SiCf/SiC densifica.	34
Figura 8.Relación entre la resistencia específica y la temperatura de materiales aeroespaciales alternativos [29].....	39
Figura 9.Tubos y placas de CMC en SiCf/SiC fabricados por el método NITE.	41
Figura 10.(Izda.) Ejemplo de compuesto Cf/ZrC de 2,5” de espesor fabricado por infiltración líquida. (Dcha.) Imagen SEM de la una microestructura representativa de un CMC con refuerzo de tejido de carbono ortogonal bidimensional.	42
Figura 11.Muestras de CMC de Cf/C revestidas con CMC (izda.) y boquilla de Cf/C (dcha., diámetro interior máximo de 13”) para reducir el peso del componente.....	43
Figura 12.Parte divergente desplegable del motor del segundo piso del cohete americano Delta 4.....	45
Figura 13.Discos de freno de avión (rotor y estator) con un diámetro exterior de ≈ 20 pulgadas.....	45
Figura 14.Freno para avión civil A320neo	46
Figura 15.Sistema de frenos de un Ferrari. Notamos que la forma es diferente pero que la pinza también es muy grande en comparación con los coches convencionales.	46
Figura 16.Crisol para la fabricación de monocristales de SiC (diámetro 800 mm).	49
Figura 17.Suelas de soporte de piezas para tratamiento térmico.	49
Figura 18.Pared del tokamak Tore Supra recubierta con briquetas de carbono/carbono. .	49
Figura 19.Diseño de fijación de la tapa nasal X-38 (hecha de compuestos C / C-SiC)	50
Figura 20.Aletas de cuerpo CVI-Cf/SiC para X-38, unidas con tornillos C / SiC. El Body Flap fue desarrollado por MAN-T en el marco del programa alemán TETRA que se llevó a cabo por orden de DLR y patrocinado por la BMBF y el STMWVT de Baviera.	51
Figura 21.Paletas de reacción de C / C-SiC para sistemas de propulsión de cohetes de combustible sólido.....	52
Figura 22.Aleta exterior C / SiC del motor M 88-2 (Sneema)	53

Figura 23. Ejemplos de sistemas de frenado en Cf/SiC (de izda. a dcha.): Porsche GT2, Ferrari 488 GTB, Airbus A320Neo.....	55
Figura 24. Imagen de microscopio óptico de un compuesto SiCf/SiC que muestra haces de fibras tejidas que refuerzan la matriz (SOURCE: Nicholas Simos, intechopen.com)	56
Figura 25. GE Aviation está produciendo en masa piezas de motor de SiC / SiC como estas cubiertas de piso 1 para el motor LEAP. SOURCE: GE Aviation, GE Reports)	56
Figura 26. Thermal management approach for several vehicles as a function of temperature and exposure time.	57
Figura 27. Esquema y fotografía que ilustran un borde de ataque enfriado por tubería de calor.	58
Figura 28. Distribución de temperatura simulada en un monobloque de tungsteno con conducto de refrigerante compuesto SiCf/SiC. La carga de calor que incide en la superficie superior es de 7,6 MW/m ²	59
Figura 29. Diferentes posibilidades de fresado (planeado y recantado) y ejemplo de recantado en concordancia o en oposición [Danglot, 1994].	60
Figura 30. Diferentes tipos de herramienta diamantada y detalle del engarzado del grano de diamante para las muelas de ligante electrolítico [Danglot, 1994].....	62
Figura 31. Detalle de la herramienta utilizada en el trabajo de J. Danglot y F. Girot.	63
Figura 32. Calidad superficial obtenida donde se puede apreciar la porosidad abierta del material Cf/SiC (SEPCARB Inox) [Danglot, 1994]..	64
Figura 33. Morfología superficial 3D de la superficie mecanizada.	68
Figura 34. Efecto de las orientaciones de las fibras sobre la rugosidad de la superficie mecanizada.	68
Figura 35. Correlación entre rugosidad superficial y energía de fresado específica [10].	70
Figura 36. Valores de rugosidad media Ra, para diferentes estrategias de rectificado.	71
Figura 37. Resumen del contenido sobre el mecanismo de eliminación de material, los procesos de mecanizado y la evaluación de la integridad de la superficie de FRCMCs-SiC. 74	
Figura 38. Imágenes de eliminación de material capturadas por una cámara de alta velocidad.....	76
Figura 39. Morfología de scratch.....	77
Figura 40. Curva de carga-desplazamiento y diagrama de propagación de grietas interfaciales de la prueba de expulsión de una sola fibra con penetrador de Berkovich[10].	79
Figura 41. Diagramas esquemáticos de rectificado a lo largo de tres direcciones típicas [10].	79
Figura 42. Mecanismo de eliminación de material de las fibras de carbono en el corte de composites Cf / SiC [10].....	79
Figura 43. Dos direcciones de corte típicas [32]	80
Figura 44. Principales defectos superficiales durante el rectificado de composites Cf/SiC [38].....	82
Figura 43. Daño superficial generado por el recantado en concordancia (izda) o en oposición (dcha).	84

Figura 44. Detalles de las zonas con daño superficial (astillado) [Danglot, 1994].	84
Figura 45. Diferencia entre una herramienta con aglomerante galvánico y aglomerante sintético y metálico.	87
Figura 46. Dinamómetro kistler y montaje utilizado para los ensayos.	99
Figura 47. Esquemático de utillaje donde se realizarán los ensayos.	100
Figura 48. Imagen de la superficie mecanizada del CMC (sup.), la delimitación del daño (centro) y su equivalente binario (inf.) para su medición con ImageJ.	101
Figura 49. Pasos sucesivos del análisis de varianza para obtener un modelo válido.	103
Figura 50. Mapa topográfico de una herramienta recubierta de diamante. El tamaño del mapa es de 1536 puntos en la dirección X (columnas), y 288 en la dirección Y (filas).	108
Figura 51. (a) Anisotropic surface, (b) isotropic surface. On the anisotropic surface, the fractal behaviour is in a defined direction.[56]	109
Figura 52. Perfil de rugosidad de una parte de la sección (Sn), de la superficie de la herramienta como se muestra en la Figura 2. En este caso, el perfil se ha seleccionado de la zona en que la herramienta ha sufrido desgaste por mecanizar CMCs.	110
Figura 53. Cálculo de la pendiente $\beta = -2.7497$ para la estimación de la Densidad Espectral de Potencia del perfil de rugosidad de la Figura 52.	111
Figura 54. Micrografías de las superficies mecanizadas en función de los parámetros de corte ($a_2 = 1 \text{ mm}$; $a_p = 6,5 \text{ mm}$).	144
Figura 55. Propiedades globales del SIGRASIC® y proceso de fabricación.	158
Figura 56. Propiedades globales del SIGRASIC® y proceso de fabricación.	158
Figura 57. Muelas por utilizar.	160
Figura 58. Geometría de las herramientas de Etorki para el mecanizado de CMC.	161
Figura 59. Coste de las herramientas.	161
Figura 60. Muelas diamantadas con granos de diamante y ligante galvánico de la empresa PFERD y dimensiones existentes.	162
Figura 61. Discos de amolar 1A1 con granos de diamante y ligante galvánico de la empresa PFERD y dimensiones existentes.	163
Figura 62. Muelas diamantadas con granos de CBN y ligante galvánico de la empresa PFERD y dimensiones existentes. Muelas diamantadas con granos de CBN y ligante galvánico de la empresa PFERD y dimensiones existentes.	164

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Diagrama de Gantt.....	22
Tabla 2. Ejemplos de propiedades de los CMC Cf/C según el tipo de aplicación.....	35
Tabla 3. Propiedades de los CMC Cf/SiC	37
Tabla 4. Propiedades de matrices híbridas de carbono/carburo de silicio relacionadas con fracciones volumétricas de carbono y carburo de silicio.	37
Tabla 5. Propiedades de CMC de C/SiC de matriz híbrida reforzada con fibra de carbono unidireccional (1D).....	38
Tabla 6. Propiedades de CMC de Cf/SiC de matriz híbrida reforzada con fibra de carbono bidireccional (2D).....	38
Tabla 7. Propiedades de CMC de SiCf/SiC [28].....	39
Tabla 8. Dimensiones de las probetas fabricadas por NITE Corporation	42
Tabla 9. Tabla de denominación del granulado ISO 6106.	86
Tabla 10. Velocidades de corte recomendadas para herramientas de diamante y CBN.....	89
Tabla 11. Rango de revoluciones recomendado para herramientas de diamante y CBN. ...	90
Tabla 12. Concentración del polvo de diamante o de CBN en la capa de ligante metálico..	92
Tabla 13. Características de las herramientas a utilizar.	97
Tabla 14. Esquema de ensayos a realizar.	97
Tabla 15. Parámetros de mecanizado para los ensayos.....	98
Tabla 16. Valores de fuerza normal y tangencial para cada uno de los experimentos del DoE	113
Tabla 17. Resultados del ANOVA del esfuerzo normal.....	116
Tabla 18. Tabla de minimización de la fuerza normal con respecto a los parámetros de corte.....	117
Tabla 19. Valores de área astillada y de astillado máximo para cada uno de los experimentos realizados.	118
Tabla 20. Resultados del ANOVA del área de astillado.	123
Tabla 21. ANOVA del astillado máximo	124
Tabla 22. Minimización del daño.....	125
Tabla 23. Resultados de los parámetros donde se minimiza la fuerza normal.....	126
Tabla 24. Regresión Polinomial del Astillado máximo	129
Tabla 25. Valores de la dimensión fractal de la superficie de la herramienta en función del número del ensayo y de la fuerza normal aplicada a la herramienta.....	131
Tabla 26. Regresión lineal múltiple de la dimensión fractal.	134
Tabla 27. Resultados de la regresión lineal de la dimensión fractal.....	134
Tabla 28. Valores de rugosidad obtenidos en los diferentes ensayos realizados.....	135
Tabla 29. Datos para el desarrollo del ANOVA con respecto al parámetro de rugosidad Sq.	140
Tabla 30. Datos para el desarrollo del ANOVA con respecto al parámetro de rugosidad Sz.	141

Tabla 31. Datos para el desarrollo del ANOVA con respecto al parámetro de rugosidad Sa.	142
.....	142
Tabla 30. Costo de los CMC.	145
Tabla 31. Costo de las herramientas a utilizar.	146
Tabla 32. Costo de la mano de obra.	146
Tabla 33. Costo del uso de los equipamientos para la elaboración del proyecto.	146
Tabla 34. Costo total del proyecto.	146
Tabla 35. Propiedades del SIGRABOND® Standard	157
Tabla 36. Diferentes tipos de SIGRASIC® y propiedades mecánicas y físicas asociadas.	159
Tabla 37. Coste de las herramientas.	164

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1.Evolución del esfuerzo de corte total en función de la velocidad de y de la tasa de arranque de material [Danglot, 1994].....	65
Gráfico 2.Variación en el módulo de Young del CMC en función del esfuerzo de corte total [Danglot, 1994].	85
Gráfico 3.Dureza del diamante comparado a otros materiales de herramienta.	86
Gráfico 4.Evolución de la fuerza normal con la velocidad de corte y comparación con los resultados de Danglot.....	113
Gráfico 5.Evolución de la fuerza normal con la velocidad de avance y comparación con los resultados de Danglot.....	114
Gráfico 6.Evolución de la fuerza normal con la pasada radial y comparación con los resultados de Danglot.....	115
Gráfico 7. Resultado de ANOVA.	117
Gráfico 8.Evolución del área astillada en función de la velocidad de corte para diferentes velocidades de avance.....	119
Gráfico 9.Evolución del área astillada en función de la velocidad de avance para diferentes velocidades de corte.....	119
Gráfico 10.Evolución del astillado máximo en función de la velocidad de corte para diferentes velocidades de avance y comparación con los resultados de Danglot [Danglot, 1994].	120
Gráfico 11.Evolución del astillado máximo en función de la velocidad de avance para diferentes velocidades de corte y comparación con los resultados de Danglot [Danglot, 1994].....	121
Gráfico 12.Evolución del área astillada y del astillado máximo en función de la pasada radial y comparación con los resultados de Danglot [Danglot, 1994]..	122
Gráfico 13. Resultado del ANOVA sobre el área de astillado.....	123
Gráfico 14. Resultado del ANOVA del astillado máximo	125
Gráfico 15.Evolución del área astillada con el esfuerzo normal.	127
Gráfico 16. Resultados de la regresión polinomial.....	127
Gráfico 17. Resultados de la regresión.....	128
Gráfico 18.Evolución del área astillada máximo con el esfuerzo normal.	129
Gráfico 19. Resultados de la regresión del astillado máximo.	130
Gráfico 20.Evolución de la dimensión fractal de la superficie de la herramienta con la fuerza normal sobre la herramienta.	132
Gráfico 21.Evolución de la variación acumulativa de la dimensión fractal con respecto al ensayo anterior con el número de ensayo.	133
Gráfico 27.Evolución de los 3 parámetros de rugosidad en función de la velocidad de corte.....	137
Gráfico 28.Parámetros de rugosidad a diferentes velocidades de rotación en función de la velocidad de avance V_w	139
Gráfico 29. Resultado del análisis de ANOVA al parámetro S_q	140

Gráfico 30. Resultado del análisis de ANOVA al parámetro Sq.	142
Gráfico 31. Resultado del análisis de ANOVA al parámetro Sa.	143
Gráfico 30. Propiedades del SIGRABOND® Standard	157

1. INTRODUCCIÓN

En este documento se presenta el informe del Trabajo Fin de Máster correspondiente al máster de Ingeniería Mecánica cursado en la Escuela de ingeniería de Bilbao, la cual forma parte de la UPV/EHU.

Este TFM se ha dividido en cuatro bloques los cuales consistirán en un bloque común correspondiente al trabajo, la siguiente consistirá en una revisión bibliográfica y siguiente consistirá en una campaña de ensayos y por último se presentará los resultados con sus respectivas conclusiones.

El primer bloque del trabajo está compuesto de los siguientes apartados los cuales son: introducción, objetivos y alcance del trabajo; en la cual como método para organizar las tareas se ha empleado el Diagrama de Gantt, la cual es un método más demostrativo para poder observar semana a semana el trabajo que se ha realizado hasta la entrega de este trabajo.

El segundo, corresponde la revisión bibliográfica del trabajo. En la cual se busca obtener la mayor cantidad de información sobre el material y su respectivo mecanizado con herramientas abrasivas. En la parte de información inquirir lo mas que se puede en investigación previas con materiales CMC (compuestos de matriz cerámica), sus aplicaciones, su posicionamiento en el mercado actual, las ventajas y razones por lo cual se está utilizando y sus propiedades mecánicas. Estos materiales en su gran medida están siendo introducidos de forma muy resiente en el mercado lo cual representa una tarea importante encontrar información de ellos. En la parte de mecanizado abrasivo se utilizará se busca tratar de encontrar parámetros parecidos para rectificado con herramientas de PCD, de tal manera que podamos respetar el proceso a estudiar y así obtener las mejores conclusiones posibles.

Una vez terminada la revisión bibliográfica se presentará la metodología de la parte experimental. En la cual se muestra el equipo utilizado para la realización de la campaña de experimentos, así como las condiciones de mecanizado y la metodología a seguir. La metodología consiste en la puesta a punta de la

herramienta y máquina, un número de ensayos a realizar con sus respectivos parámetros, los equipos para analizar el daño tanto de la pieza como de la herramienta, los métodos matemáticos, analizadores de señales y el análisis de los resultados.

El tercer bloque consistirá en la campaña de ensayos al material de compuesto de matriz cerámica (CMC), el cual es una fibra de carbono reforzada con carburo de silicio, en este caso se utilizará el CMC con fibras largas. La campaña de ensayos consistirá en rectificadas a diferentes V_w y A_c distintos. La herramienta que se usará será una muela de diamante (PCD). Jugando con estos parámetros buscaremos encontrar cuando se presentan daños en la herramienta o la pieza. Para poder observar y analizar las fuerzas presentes en el mecanizado, se utilizará una lupa Leica y un microscopio cofocal Leica, estos instrumentos de metrología lo usaremos para ver cambio o daños en la pieza o herramienta y, por otro lado, utilizaremos una mesa Kistler para obtener las fuerzas en las tres componentes.

El cuarto bloque trata del análisis de los datos. Para el estudio de las componentes de las fuerzas se utiliza el programa que está incluido con la mesa Kistler. En la parte del análisis de los daños se utiliza el programa que proporciona el propio microscopio el cual nos brinda una imagen en 3D de la superficie que estamos analizando. Para el análisis de los datos de forma cuantitativa se utilizará el método ANOVA y para el estudio de señal que nos da la mesa Kistler se empleará MATLAB y Excel, con ello filtrar el ruido y con ello obtener las componentes de las fuerzas en las tres direcciones.

Por último, se incluye un listado de las referencias bibliográficas que se han utilizaron para realizar el TFM y los anexos para culminar el documento. En los anexos se incluyen las propiedades físicas y mecánicas del CMC y los catálogos e las herramientas de mecanizado abrasivas de PCD.

2. CONTEXTO

Este proyecto se realizará bajo la supervisión de los profesores Unai Alonso Pinillos y Frank Girot Mata con asistencia del profesor Borja Izquierdo pertenecientes al departamento de Ingeniería Mecánica de la Escuela de Ingeniería de Bilbao. La redacción del Trabajo Fin de Máster, a su vez, ha sido dirigida por el profesor Unai Alonso.

La parte experimental del proyecto se hará en el taller de la Universidad del País Vasco, donde utilizaremos las máquinas y equipos de metrología presentes en el taller para llevar a cabo la campaña de ensayos. En dicho taller colaboran alumnos en el proceso de doctorando, personal del taller y profesores que asisten con la organización y seguimiento del proyecto.

La razón detrás del proyecto es la necesidad de estudiar el comportamiento del mecanizado abrasivo de CMC, ya que es un material que últimamente ha sido empleado en distintos campos tanto de la aviación y automoción. A continuación, se presentan distintas razones por las cuales se está utilizando.

¿Por qué está creciendo el uso de compuestos de matriz cerámica (CMC) en aplicaciones como motores de aviones a reacción y turbinas industriales?

- Los CMC son 1/3 del peso de las superaleaciones de níquel utilizadas actualmente.
- Los CMC pueden operar a temperaturas de hasta 260°C más altas que las superaleaciones de Ni.
- Las temperaturas de servicio más altas significan que se desvía menos aire de enfriamiento del empuje, lo que permite que los motores funcionen con un empuje más alto y/o de manera más eficiente.
- Los motores también funcionan a más alta temperatura, quemando el combustible completamente, reduciendo el consumo de combustible y las emisiones.

- De manera similar, los CMC en turbinas industriales de generación de energía podrían reducir la contaminación ambiental y el coste de la electricidad.

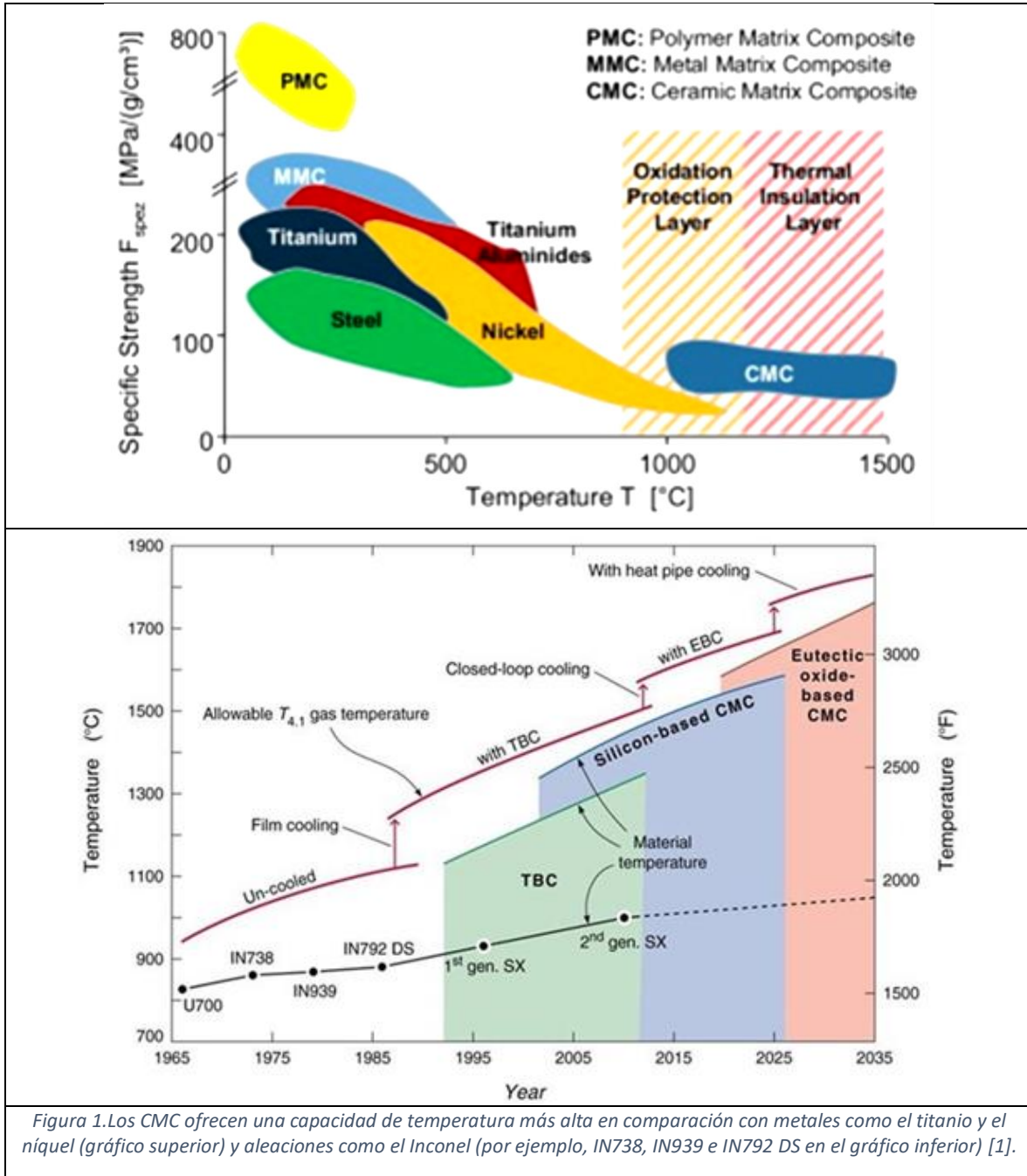


Figura 1. Los CMC ofrecen una capacidad de temperatura más alta en comparación con metales como el titanio y el níquel (gráfico superior) y aleaciones como el Inconel (por ejemplo, IN738, IN939 e IN792 DS en el gráfico inferior) [1].

Se proyecta que los CMC crecerán a una tasa media anual del 10% a partir de 2021 para alcanzar los USD 7,5 mil millones en 2026 como se muestra en la grafica a continuación.

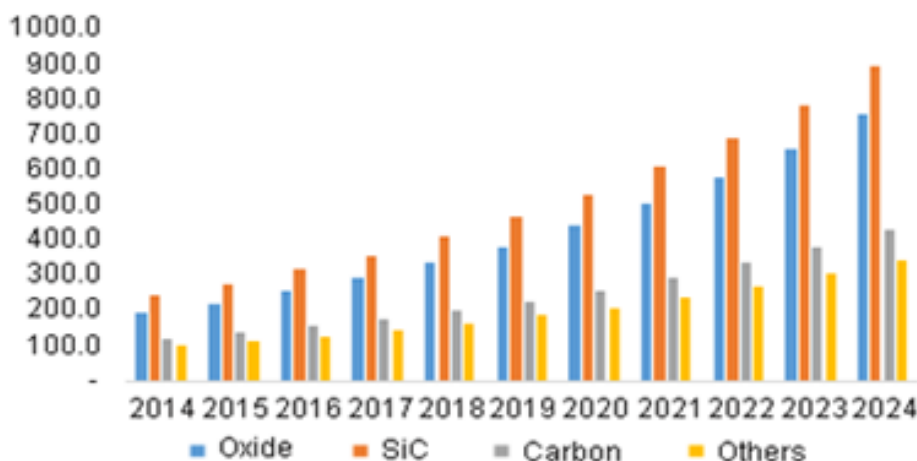


Figura 2. Crecimiento del mercado de los CMC a nivel mundial (CMC de matriz de óxidos, carburo de silicio, carbono y otro tipo de matriz cerámica).[1]

Cabe destacar que a pesar de que los materiales CMC no son nuevos en el mercado tanto de la aviación, automoción u otras aplicaciones que se han abierto últimamente para este tipo de materiales. Debido a lo antes mencionado los estudios para el uso de estos materiales en aplicaciones específicas es muy escaso y saber sus comportamientos todavía es muy incierto y sobre todo con mecanizados abrasivos. Por lo tanto, lo que estamos buscando es crear una campaña de experimentos de tal manera que con la revisión bibliográfica hecha para el estado del arte podamos sentar bases que aporten de manera positiva el hecho del comportamiento de estos materiales ante herramientas con granos de diamante.

3. OBJETIVOS Y ORGANIZACIÓN DEL PROYECTO

3.1 Objetivos

Los objetivos del TFM se detallan a continuación.

Objetivo #1 Revisión del estado del arte.

Tarea #1 Búsqueda de la bibliografía.

Se trata de analizar la información existente sobre los materiales, sus procesos de fabricación, sus aplicaciones, los proveedores de esos CMCs, los procesos de mecanizado utilizados y sus condiciones, las herramientas utilizadas y los proveedores de esas herramientas, el daño generado en el CMC, para poder elegir tanto el tipo de mecanizado que se va a realizar, los proveedores de ese tipo de material, los proveedores de herramientas, y definir un rango de condiciones de mecanizado para el proceso elegido.

Resultado esperado: tener una visión actualizada de lo que se hace en CMC, de sus aplicaciones, del precio y proveedores de esos materiales, de los procesos de mecanizado empleados.

Objetivo #2 Estudio de los procesos de mecanizado abrasivo.

Tarea #2 Búsqueda de infografía y bibliografía sobre procesos previos de mecanizado abrasivo en CMCs.

Debido a lo antes mencionado, en esta parte focalizaremos sobre mecanizado abrasivo, ya que es un proceso que se ha utilizado en el pasado (década de los 90) con muy buenos resultados y que está resurgiendo ahora con el auge de esos materiales y las necesidades de mecanizado que conllevan. Se tratará comprender los mecanismos de corte con herramienta abrasiva, de definir cual han sido las condiciones de corte utilizadas y los resultados obtenidos en términos de esfuerzos, daños al CMC y desgaste de las herramientas.

Resultado esperado: tener una visión actualizada del mecanizado abrasivo de los CMCs, de sus mecanismos de corte y daños producidos.

Objetivo #3 Definir la metodología de ensayos.

Tarea# 3 Establecer la metodología para la campaña de ensayo, en el ámbito de mecanizado, parámetros y materiales.

Para los ensayos previos (a una serie de ensayos más amplios que se realizarán en el marco de un proyecto del Gobierno Vasco y del Ministerio de Ciencia e Innovación) que se quieren realizar, se definirá el marco metodológico del experimento, incluyendo la elección del material y de las herramientas, el suministro de los mismos, las condiciones de mecanizado seleccionadas (a partir de un diseño de experimentos o DoE), las variables que se estudiarán (fuerzas de corte, daño al material, rugosidad, desgaste de la herramienta ...), los equipos necesarios para poder medir esas variables y el post procesado a realizar para tener datos utilizables.

Resultado esperado: definir una metodología robusta, rigurosa y validada para la experimentación sobre recantado abrasivo de CMCs que se aplicará en la campaña más amplia desarrollada a partir del mes de octubre.

Objetivo #4 Realizar campaña de ensayos previos.

Tarea #4 Puesta en punto

En esta parte se pondrá a punto la experimentación incluyendo el sistema de amarre de la pieza sobre la mesa dinamométrica, se calibrará los equipos de medición y se establecerá una lista de operaciones que realizar.

Tarea #5 Ensayos

En esta tarea se realizará la campaña de ensayos según el DoE y la metodología definida anteriormente. Se medirán todas las variables necesarias para un buen análisis de los resultados.

Tarea #6 Post procesado y análisis de los resultados

A partir de las señales obtenidas, procesar esas señales para obtener los datos necesarios al análisis de los resultados. Realizar un análisis de varianza de los resultados para definir los parámetros significativos del proceso para cada variable.

Resultado esperado: Asociar al diseño de experimentos los valores medidos de las diferentes variables para su posterior análisis de varianza (ANOVA). Definir para cada variable los modelos que explican sus variaciones. Optimizar los parámetros de mecanizado para minimizar las variables (minimización de las fuerzas, del daño, de la rugosidad...). Definir tendencias entre variables (daño versus fuerzas, por ejemplo).

Tareas transversales

Tarea #7 Redacción del trabajo

Tarea #8 Defensa del trabajo

3.2 Diagrama de Gantt

Para conseguir esos objetivos, se ha desarrollado la siguiente planificación.

CRONOGRAMA DEL TFM																																							
#	ACTIVIDADES A DESARROLLAR	ABRIL			MAYO				JUNIO				JULIO				AGOSTO				SEPTIEMBRE																		
		2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4															
1	Revisión Bibliografica																																						
2	Redacción del estado de arte, introducción y objetivos																																						
3	Compra de herramientas y materiales.																																						
4	Desarrollo de procedimientos para mecanizado.																																						
5	Resepción de herramientas y materiales.																																						
6	Elaborar los ensayos.																																						
7	Realizar los estudios de daños a los materiales.																																						
8	Análisis de los resultados																																						
9	Redaccion de conclusiones y discusiones.																																						
10	Revisión del trabajo.																																						
11	Presentar solicitud de presentar el TFM																																						
12	Presentar TFM																																						

Tabla 1. Diagrama de Gantt

4. ESTADO DEL ARTE

El trabajo se centra únicamente en los materiales compuestos de matriz de carbono o de carburo de silicio con fibras de los mismos materiales. Se hará una revisión bibliográfica de las tres combinaciones de interés ósea CMC de matriz de carbono con fibra de carbono, de matriz de carburo de silicio con fibra de carbono y de matriz de carburo de silicio con fibra de carburo de silicio.

4.1. Materiales compuestos de matriz cerámica: Cf/C, Cf/SiC, SiCf/SiC

Esta nueva categoría de materiales se denomina "MATERIALES COMPUESTOS TERMOSTRUCTURALES"; y se destacan los materiales siguientes:

- carbono/carbono: refuerzo y matriz de carbono. Material de altas características, pero cuyo punto débil es una vida útil limitada a altas temperaturas en atmósfera no oxidante.
- Materiales compuestos de matriz cerámica (CMC): matriz cerámica reforzada con carbono y/o fibras cerámicas. Tienen características mecánicas más débiles, pero son compatibles con un uso prolongado en el aire. Están formados por dos familias distintas:
 - ✓ Carbono/SiC: compuesto por un refuerzo de carbono y una matriz de carburo de silicio.
 - ✓ SiC / SiC: cuyo refuerzo y matriz son de carburo de silicio. Estos materiales forman parte también de las cerámicas técnicas avanzadas¹.

El proceso de fabricación habitual del material se puede resumir en tres etapas:

1. la creación de una preforma textil apilando tejidos de carbono o de SiC de fibras cortas, 1D ó 2D, fabricado con fibras de alta resistencia. Esta pila se compacta en una herramienta para obtener un contenido volumétrico de fibra.

2. La matriz se obtiene por densificación de la preforma en fase vapor (Chemical Vapor Infiltration o CVI), a partir de un precursor gaseoso. Se realiza una repetición de los ciclos de infiltración hasta obtener la densidad deseada.
3. El último paso consiste en el mecanizado de los espacios en blanco y la aplicación del tratamiento de acabado destinado a mejorar la protección del material en una atmósfera oxidante. De hecho, el mecanizado se realiza varias veces en forma de corte a medida o corte durante el ciclo de producción, luego las formas y precisión de la pieza se realizan al final del ciclo. Estos mecanizados se obtienen retirando material porque no sabemos cómo obtener estas formas por el método de elaboración del material. Deben ser reproducibles y no deben dañar el material. Por lo tanto, es necesario dominar completamente el mecanizado para eliminar estas incertidumbres.

Para limitar el coste de fabricación se han desarrollado alternativas que se detallan a continuación para cada familia de materiales.

4.2. Fibra de carbono y matriz de carbono

En los materiales compuestos reforzados con fibras, la fibra y la matriz aglutinante desempeñan funciones diferentes; deben tener características y propiedades diferentes y, por lo tanto, suelen ser de naturaleza química diferente (ejemplo: matriz de fibra de vidrio / resina epoxi).

Los compuestos de carbono/carbono (C/C) son materiales originales especiales en los que la fibra y la matriz son de la misma naturaleza química. La obtención del efecto compuesto (resistencia mecánica, no fragilidad, resistencia a la fatiga, etc.) se debe a que el elemento carbono puede generar estructuras nanométricas que dan lugar a características macroscópicas muy diferentes.

El material compuesto de carbono/carbono es un material compuesto hecho de la adición de fibras de carbono en una matriz de grafito. Fue desarrollado para los carenados de misiles balísticos intercontinentales, pero es más conocido por ser el

material del que están hechos los carenados y alas de los bordes de ataque de los transbordadores espaciales. Los frenos de disco y las pastillas de freno de polímero reforzado con fibra de carbono han sido componentes estándar del sistema de frenos en los autos de carreras de Fórmula 1 desde 1976, en los aviones y los trenes de alta velocidad.

El compuesto carbono/carbono es altamente resistente al contacto con altas temperaturas, y también, donde se requiere resistencia al choque térmico o un bajo coeficiente de expansión térmica. Aunque es menos frágil que muchas otras cerámicas, carece de resistencia al impacto. Por ejemplo, el transbordador espacial Columbia fue destruido cuando volvió a entrar en la atmósfera después de que una de sus aletas compuestas de carbono/carbono se rompió debido al impacto de una pieza de aislamiento de espuma del tanque exterior del transbordador espacial estadounidense.

4.2.1. Arquitecturas fibrosas (conocidas como "texturas")

Las fibras de carbono deben disponerse según una arquitectura que proporcione a la pieza las propiedades requeridas en determinadas direcciones. Esta arquitectura fibrosa también debe ser alcanzable por medios mecánicos utilizados en la industria textil o al menos derivados de ella.

Estas fibras se pueden organizar en hilos continuos o discontinuos, que se pueden tejer en dos direcciones perpendiculares o en tres direcciones espaciales (tejido n-D, fig. 3). Una arquitectura tridimensional le da al compuesto una notable resistencia al cizallamiento en diferentes planos, así como una buena resistencia al impacto. Además de la técnica de tejido, se pueden utilizar todas las demás técnicas de la industria textil: trenzado 2D o 3D sobre mandril, tejido. También podemos mencionar el devanado del filamento y la existencia de arreglos muy específicos como la textura "4D" (varillas de carbono a lo largo de las cuatro diagonales principales del cubo), muy eficiente en la ablación (figura 4).

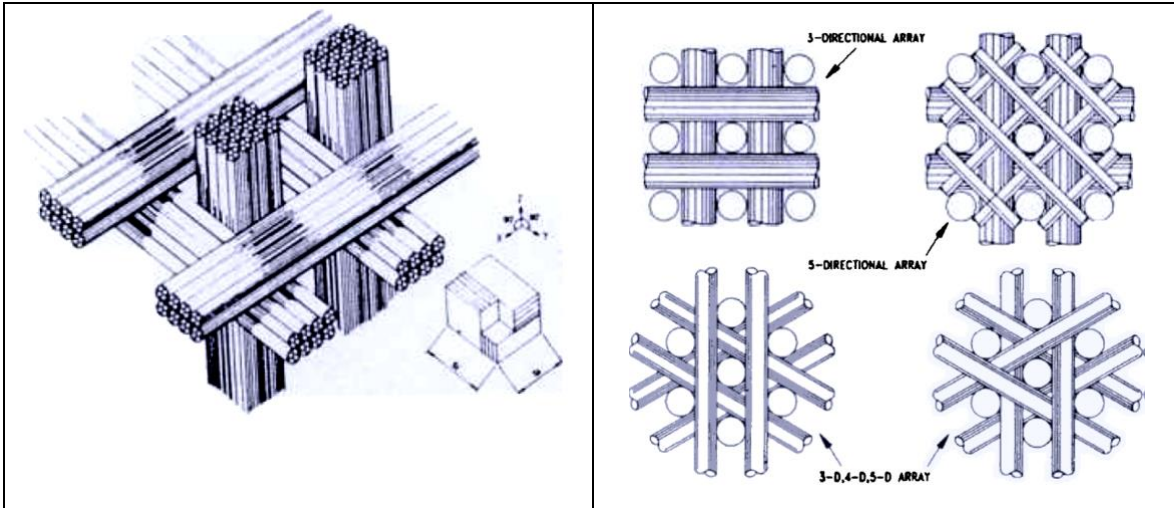


Figura 3. Ejemplos de arquitecturas fibrosas n-D



Figura 4. Cuello de boquilla 4D para aplicaciones de defensa: (izda.) Arquitectura fibrosa; (dcha.) Cuello de boquilla finalizado de los boosters del cohete Ariane V.

4.2.2. Los procesos de desarrollo de la matriz

El propósito de los procesos de desarrollo de la matriz es llenar la porosidad de la arquitectura fibrosa con una red de material carbonoso que sea lo más continua y compacta posible. Hay tres métodos principales de densificación basados en las características fisicoquímicas de los precursores utilizados².

- La "vía líquida"

En este caso, el precursor es una resina orgánica que se hace penetrar en estado líquido en la porosidad; luego se polimeriza y retícula in situ antes de carbonizarse (900°C, atmósfera neutra). Se utilizan resinas termoestables de tipo fenólico y furano, la matriz de carbono obtenida se denomina coque de resina. Se caracteriza por una baja densidad ($\approx 1,5$), una baja conductividad térmica y una baja evolución termoestructural a alta temperatura. Este tipo de matriz se elegirá para producir composites C/C con características orientadas al aislamiento térmico y/o de coste reducido.

- La "vía brea"

En este caso, el precursor es un polímero orgánico termoplástico, siendo los más comunes las breas. Existen diferentes variedades de brea según su origen (carbón, petróleo) y sus características (isotrópicas, anisotrópicas, cf. cristales líquidos mesofásicos). De hecho, es la transposición parcial de los métodos de elaboración de grafitos policristalinos. El carbón así obtenido se denomina brea de coque. En general, esta ruta se utiliza para obtener materiales que sean buenos conductores térmicos y tengan una baja porosidad final.

- La "vía gaseosa"

En este caso, el precursor de hidrocarburo es un gas que se difunde en la porosidad antes de descomponerse en carbono que se deposita en la superficie de las fibras. Este carbono se llama "pirocarbón".

Cuando el proceso se realiza a temperatura moderada ($\approx 1000^\circ\text{C}$) y bajo presión reducida para promover la difusión de especies gaseosas, se denomina infiltración de vapor químico (CVI).

Dependiendo del proceso se pueden obtener diferentes pirocarbonos. Se prefiere este método de preparación para obtener un equilibrio de características termomecánicas.

- Rutas mixtas

En general, no es posible densificar la porosidad de una textura o material en una sola operación. Por tanto, es necesario realizar varias operaciones de densificación sucesivas. En esta ocasión, podemos mezclar los canales y así obtener ensamblajes de matrices y posteriormente composites con características intermedias.

- Tratamiento térmico

Los carbonos de la matriz se obtienen todos por carbonización a aproximadamente 900-1000°C de un precursor de hidrocarburo. En este punto, es un carbono turboestrático mal organizado. Bajo el efecto del tratamiento térmico a una temperatura superior a 2000°C, algunos carbonos pueden evolucionar hacia estructuras más organizadas, parecidas al grafito. Al hacerlo, sus características termomecánicas evolucionan. Dicho tratamiento (a menudo llamado "grafitación") es también un parámetro que usaremos para variar las características de un carbono/carbono.

En conclusión, los métodos de densificación son muy variados, cada uno de los cuales conduce a tipos de "carbonos" con características particulares, lo que permite, al igual que a través de la elección de las fibras de carbono, orientar las características finales en la dirección más favorable a la aplicación prevista. (Tabla 1 del § propiedades mecánicas).

4.3. Fibra de carbono y matriz de SiC

Existen numerosas alternativas relativas a la fabricación de compuestos de carburo de silicio reforzados con fibra de carbono (C/SiC). La infiltración de vapor químico (CVI) descrita anteriormente y la infiltración de silicio líquido (LSI) de preformas de

fibra de carbono porosa son los métodos más universales utilizados para producir compuestos de C-SiC^{3,4,5}.

En la primera se pueden utilizar diferentes fuentes de silicio, como mezclas gaseosas de $(\text{CH}_3)\text{SiCl}_3/\text{H}_2$ o $(\text{C}_2\text{H}_5)\text{SiCl}_3/\text{H}_2$ y el procesamiento demora varias semanas debido a la cantidad de ciclos que es necesario aplicar para al final conseguir materiales de alta densidad. Por lo tanto, se han realizado muchos esfuerzos para reducir el tiempo de fabricación^{6,7}.

El procesamiento por LSI consiste en la infiltración de una preforma de carbono poroso con silicio fundido utilizando un horno convencional. El carbono y el silicio reaccionan para formar SiC a temperaturas en el rango de 1450-1650°C y un tiempo de permanencia entre 1-3 h al vacío⁸. Este proceso conduce al desarrollo de compuestos de C/SiC con menor tiempo de fabricación de componentes y, por lo tanto, costes de componentes reducidos^{9,10}.

El Instituto del Carbon (INCAR-CSIC) y otros equipos de investigación han estudiado nuevos métodos alternativos al desarrollo de composites C/SiC disminuyendo el tiempo de procesamiento. La sinterización por plasma por chispa (SPS) se propone como una técnica fácil y rápida para producir compuestos de C/SiC mediante la infiltración de silicio líquido reactivo combinado con el proceso de infiltración líquida (LI).

El SPS, también conocida como técnica de sinterización asistida por campo (Field Assisted Sintering Technique o FAST), es una técnica de sinterización ampliamente utilizada en el procesamiento de materiales cerámicos que pueden consolidar compactos de polvo aplicando un pulso eléctrico on-off de CC bajo presión

uniaxial¹¹. Esta técnica puede operar a velocidades de calentamiento del orden de cien grados por minuto, alcanzando altas temperaturas en muy poco tiempo y dando lugar a materiales densos después de una duración total del procesamiento del orden de unos pocos minutos¹².

El INCAR-CSIC ha desarrollado por primera vez compuestos de C-SiC fabricados combinando el proceso de infiltración líquida (LI) de una breca mesofásica comercial dopada con nanopartículas de carburo de silicio seguido de la infiltración de silicio líquido reactivo (LSI) utilizando la técnica SPS. El procesamiento de los compuestos de C-SiC se realiza en dos pasos.

El primer paso consiste en una infiltración líquida con una breca de mesofase comercial dopada en una preforma de fibra de carbono. El precursor de la matriz dopada se obtiene previamente mezclando 15% en peso de nanopartículas de SiC (45-50 nm) con la breca mesofásica a 350 °C durante 2h, 300 rpm y presión de nitrógeno de 0.2 MPa¹³. El proceso de infiltración, ampliamente utilizado en el procesamiento de compuestos carbono/carbono, se realiza a 350°C durante 3 h bajo una presión de nitrógeno de 0,5 MPa. Los materiales obtenidos se carbonizan a 1000°C. Se aplican hasta tres ciclos de infiltración/carbonización. Finalmente, los materiales se grafitizan a 2400°C.

El segundo paso consiste en la Infiltración por silicio líquido de los materiales anteriores por SPS. Los materiales se colocan en una matriz de grafito y se cubren con polvo de Si. Luego, se sellan y se introducen en un dispositivo SPS. El tratamiento se realiza al vacío (10-1 mbar) y se aplica una presión uniaxial de 16 MPa desde la temperatura ambiente hasta el final del ciclo. La velocidad de calentamiento es de 50°C/min hasta 1000°C seguido de 25°C/min hasta la

temperatura final (1250-1500 °C). El tiempo de permanencia a temperatura máxima es de 30 min. El tiempo total del proceso SPS es alrededor de 1 hora.

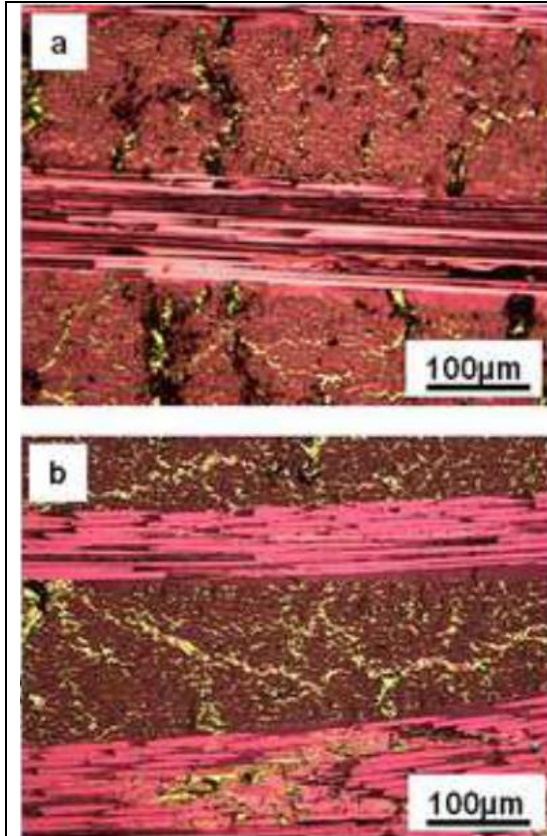


Figura 5. Micrografías ópticas de material compuesto de SiC con: (a) uno y (b) tres ciclos de infiltración / carbonización de líquido.

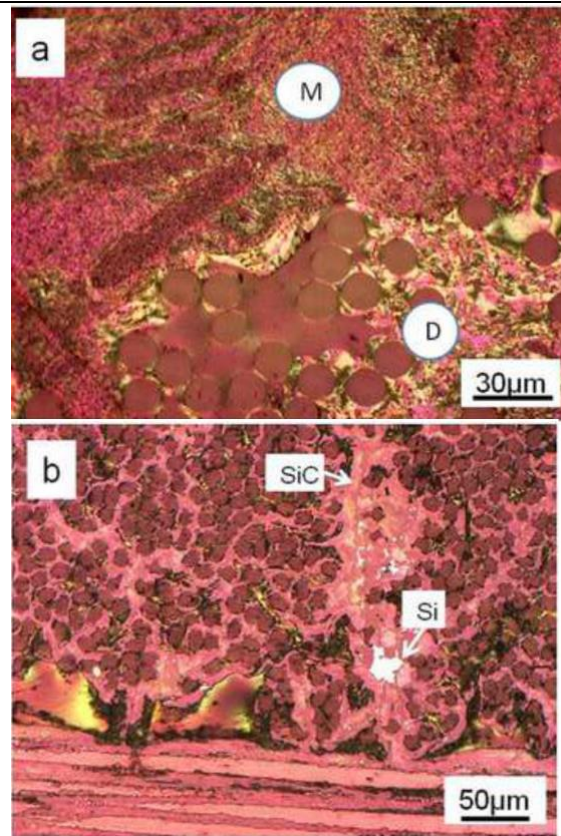


Figura 6. Micrografías ópticas: (a) Cf/SiC composite y (b) Cf/SiC composite por SPS.

4.4. Fibra de SiC y matriz de SiC

Los compuestos de matriz cerámica (CMC) de carburo de silicio (SiC) han sido un campo de investigación importante dentro de la industria aeroespacial en los últimos años. Las matrices de SiC reforzadas con fibras de SiC permiten un mejor comportamiento en servicio, manteniendo su alta resistencia a temperaturas de hasta 1250°C, un aumento de aproximadamente 150°C en comparación con las superaleaciones a base de níquel. Por tanto, se prevé que en aplicaciones estructurales de alta temperatura (por ejemplo, aeroespacial o nuclear) donde la

reutilización es un factor clave, las estructuras de CMC de SiC/SiC son uno de los grupos más prometedores de materiales candidatos¹⁴.

La matriz de SiC puede ser fabricada / procesada por tres vías principales¹⁵: pirólisis de precursores pre-cerámicos de SiC^{16,17}, infiltración de vapor químico (CVI)^{18,19} e infiltración por fusión (MI)²⁰. En términos de fibras de SiC, los tres principales fabricantes que se encuentran en el mercado son Nippon Carbon, COI Ceramics y Ube Ind., produciendo las marcas comerciales Hi-Nicalon (Type-S), Sylramic (iBN) y Tyranno SA3 respectivamente, donde la composición elemental de los precursores y la temperatura máxima de producción varía²¹.

El método de infiltración por fusión en CMC a base de SiC se ha establecido como un método de referencia para la industria aeroespacial, ya que se puede lograr una matriz completamente densa²². En estos materiales, se deposita un recubrimiento de nitruro de boro (BN) o carbono pirolítico (PyC) alrededor de las fibras para producir un comportamiento mecánico mejorado mediante la creación de interfaces débiles que unen las propagaciones de grietas^{23,24}. Además, en aplicaciones aeroespaciales^{25,26}, donde esta interfaz puede estar expuesta a ambientes severos (debido al mecanismo de puenteo fibra-matriz), los recubrimientos BN podrían mejorar la resistencia a la corrosión. Otras mejoras en la fabricación de CMC para la industria aeroespacial tienen como objetivo reducir la porosidad y proteger la integridad de la interfaz con las fibras durante la formación de la matriz. Por estas razones, varios fabricantes de CMC han agregado un paso adicional antes del proceso de infiltración por fusión que consiste en producir un recubrimiento de SiC

o Si₃N₄ por Infiltración de Vapor Químico (CVI)²⁷, dando como resultado un proceso combinado CVI-MI para la fabricación de CMC a base de SiC.

Es el caso de las tecnologías patentadas de la NASA. Dirigidas a aplicaciones estructurales hasta 1480°C, utilizan dos tipos de fibras de SiC de alta resistencia que mejoran significativamente el rendimiento termoestructural de la fibra de SiC de pequeño diámetro “Sylramic” dopada con boro y sinterizada comercialmente disponible. Estos procesos de mejora se pueden realizar en fibras individuales, estopas multifibras o preformas arquitectónicas en forma de componente sin ninguna pérdida en la resistencia de la fibra. Los procesos no solo mejoran cada fibra en las preformas y alivian sus tensiones de tejido, sino que también permiten que las preformas tengan más formas. La resistencia ambiental también se mejora durante el procesamiento mediante la producción de un recubrimiento protector de nitruro de boro (iBN) desarrollado in situ sobre las fibras. Por tanto, los dos tipos de fibras convertidas se denominan “Sylramic-iBN” y “Super Sylramic-iBN”.

Para una alta tenacidad de CMC, se utilizan dos pasos separados de infiltración de vapor químico (CVI), uno para aplicar un recubrimiento de nitruro de boro sobre las fibras de la preforma y el otro para formar la matriz a base de SiC. Luego, las preformas se tratan térmicamente no solo para densificar y encoger el recubrimiento de CVI BN lejos de la matriz de SiC (desunión exterior), sino también para aumentar su resistencia a la fluencia, capacidad de temperatura y conductividad térmica.

Una ventaja crucial de este conjunto de tecnologías radica en su personalización sin precedentes. El CMC de SiC/SiC se puede adaptar a condiciones específicas seleccionando a la baja la fibra, el recubrimiento de fibra, la arquitectura de la fibra y los materiales y procesos de matriz óptimos. Sin embargo, en cualquier formulación, las fibras de SiC procesadas por la NASA muestran una alta resistencia a la tracción y una mejor resistencia a la rotura por fluencia de cualquier fibra de SiC comercial, con una retención de resistencia a más de 1480°C.



4.5. Propiedades mecánicas y físicas

4.5.1. Fibra de carbono y matriz de carbono

Principales características

Compuesto mayoritariamente por átomos de carbono con hibridación sp^2 (tipo grafitico), el Cf/C retiene de ellos su baja densidad ($<2,2$) y su refractariedad ($T_f > 3027^\circ\text{C}$). Además, el efecto compuesto permite combinar la resistencia mecánica proporcionada por las fibras con un comportamiento no frágil proporcionado por la matriz a través del enlace fibra/matriz²⁸.

Estos materiales tienen en última instancia una resistencia excepcional a la fatiga térmica y mecánica (Tabla 1). Por otro lado, tienen dos características limitantes que son la porosidad residual y la oxidabilidad. Los tratamientos específicos permiten en muchos casos limitar en gran medida estos inconvenientes.

Tipo de aplicación	Densidad	Módulo GPa (dirección)	Resistencia a ruptura en tracción MPa	Resistencia al cizallamiento o interlaminar MPa	Conductividad térmica W/m.K
Cuello de boquilla	1,90	35	80	-	50
Térmica	1,75	25	50-75	25-50	140-220
Estructural	1,85	45	180	25-50	20

Tribológica	1,77	27(xy)	66 (xy)	10	23 (xy)
Nuclear (fusión)	1,90	100 (x) 15 (y) 10 (z)	130 (x) 30 (y) 20 (z)	9-15	350 (x) 120)

Tabla 2. Ejemplos de propiedades de los CMC Cf/C según el tipo de aplicación.

4.5.2. Fibra de carbono y matriz de SiC

Los compuestos de matriz cerámica (CMC), basados en refuerzos de fibras de carbono y matrices de carburo de silicio (llamados compuestos C / SiC o C / C-SiC) representan una clase relativamente nueva de materiales estructurales. En los últimos años se han desarrollado nuevos procesos y materiales de fabricación. Los refuerzos de fibra corta, los precursores de polímeros baratos y los procesos en fase líquida redujeron los costos en casi un orden de magnitud en comparación con los compuestos C / SiC de primera generación que se desarrollaron originalmente para aplicaciones espaciales y militares. Además de las propiedades específicas de alta masa y estabilidad térmica, las propiedades funcionales como la baja expansión térmica y el buen comportamiento tribológico juegan una importancia creciente para nuevas aplicaciones comerciales como discos y pastillas de freno, embragues, placas de calibración o dispositivos de carga de hornos.

Con el fin de mejorar la resistencia a la oxidación y, por lo tanto, la vida útil de la aplicación de estos compuestos se ha investigado el uso de cerámica en lugar de carbono como material de matriz. El carburo de silicio es particularmente adecuado como material de matriz debido a su alta resistencia a la oxidación, su estabilidad superior a la temperatura y al choque térmico y su alta resistencia a la fluencia. En la práctica, se pueden utilizar técnicas de fabricación similares para la formación de matrices de carburo de silicio de compuestos C / SiC como para la fabricación de compuestos carbono / carbono. Generalmente, los materiales compuestos de matriz cerámica se han desarrollado para combinar las propiedades ventajosas de las cerámicas monolíticas con una alta tolerancia al daño, que se conoce, por ejemplo, por el refuerzo de polímeros reforzados con fibras. Sin embargo, los mecanismos que causan una alta tolerancia al daño son completamente diferentes para ambas

clases de material. Los polímeros están reforzados con fibras fuertes y rígidas, mientras que la matriz es débil y de baja resistencia, rigidez y estabilidad térmica. Se desea una unión fuerte entre la matriz y las fibras como resultado de las reacciones de alta superficie de las fibras. Sobre la base de las diferencias de rigidez entre las fibras y el polímero, la propia matriz se somete a tensión sólo ligeramente y la tasa de liberación de energía de una grieta de la matriz es baja debido a la modesta resistencia de la matriz. Por lo tanto, las fibras altamente cargadas pueden detener las grietas sin dañarse.

Los compuestos de matriz cerámica se caracterizan por el hecho de que la rigidez de ambas, fibras y matriz, está en el mismo orden de magnitud. Las fuerzas de unión de fibra / matriz altas dan como resultado tensiones que son similares para la matriz, así como para las fibras y la tolerancia al daño es comparable a la de las cerámicas monolíticas. El caso opuesto con uniones fibra / matriz extremadamente bajas conduce a una matriz casi libre de tensiones y una alta tenacidad a la fractura. Sin embargo, como las propiedades de desprendimiento y cizallamiento dependen principalmente de los efectos de fricción, este tipo de materiales compuestos generalmente no son adecuados como material estructural. Por lo tanto, las CMC tolerantes a daños requieren uniones moderadas de fibra / matriz con interfases adaptadas. La microestructura de la interfase puede variar desde interfaces afiladas no reactivas hasta interfaces reaccionadas in situ, interfaces porosas o multicapa y es responsable de detener y desviar las grietas de la matriz.

PROPERTY	UNITS	TEMPERATURE		
		73°F (23°C)	1832°F (1000°C)	2552°F (1400°C)
Fiber Content	%	45	45	45
Specific Gravity		2.1	2.1	2.1
Porosity	%	10	10	10
Tensile Strength	KSI (MPa)	51 (350)	51 (350)	46 (330)
Elongation (Tensile)	%	0.9	0.9	NA
Young's Modulus (Tensile)	MSI (GPa)	13 (90)	15 (100)	15 (100)
Poisson's Ratio				
V12	—	0	NA	NA
V13	—	0.5	NA	NA
Flexural Strength	KSI (MPa)	73 (500)	102 (700)	102 (700)
Compressive Strength				
in Plane	KSI (MPa)	84 (580)	87 (600)	102 (700)
Thru the Thickness	KSI (MPa)	61 (420)	65 (450)	73 (500)
Shear Strength (Interlaminar)	KSI (MPa)	5.0 (35)	5.0 (35)	5.0 (35)
Thermal Diffusivity				
in Plane	10 ⁻⁴ FT ² /S (10 ⁻⁴ M ² S ⁻¹)	118 (11)	75 (7)	86 (8)
Thru the Thickness	10 ⁻⁴ FT ² /S (10 ⁻⁴ M ² S ⁻¹)	54 (5)	20 (2)	20 (2)
Coefficient of Thermal Expansion				
in Plane	10 ⁻⁴ /°F (10 ⁻⁴ /°K)	1.7 (3)	1.7 (3)	NA
Thru the Thickness	10 ⁻⁴ /°F (10 ⁻⁴ /°K)	2.8 (5)	2.8 (5)	NA
Specific Heat	BTU/lbm °F (JKG ⁻¹ °K)	.15 (620)	.33 (1400)	NA
Total Emissivity		0.8	0.8	

Tabla 3. Propiedades de los CMC Cf/SiC

Total carbon fiber volume fraction (%)	40	45	50
Carbon matrix volume fraction (%)	35	30	25
SiC matrix volume fraction (%)	20	20	20
Void volume fraction (%)	5	5	5
C/SiC matrix ratio	65/35	60/40	55/45
Density (g/cm ³)	2.06	2.10	2.14
Tensile strength (MPa)	145	165	180
Elastic Modulus (GPa)	82	96	105
Shear modulus* (GPa)	28	32	35
Poisson ratio	0.17	0.16	0.15
k (W/m.K)	79	72	66
α (10 ⁻⁶ /°C)	1.00	1.04	1.17

*calculated by $E=2G(1+\nu)$.

Tabla 4. Propiedades de matrices híbridas de carbono/carburo de silicio relacionadas con fracciones volumétricas de carbono y carburo de silicio.

Total carbon fiber volume fraction (%) C/SiC matrix ratio	40	45	50	Total carbon fiber volume fraction (%) C/SiC matrix ratio	40	45	50		
	65/35	60/40	55/45		65/35	60/40	55/45		
E_{11}	141	156	167	E_{11}	89	96	98		
E_{22}	36	35	33	E_{22}	89	96	98		
E_{33}	36	35	33	E_{33}	37	36	37		
G_{12}	20	21	21	G_{12}	20	21	21		
G_{23}	14	14	13	G_{23}	17	17	18		
G_{13}	20	21	21	G_{13}	17	17	18		
ν_{12}	0.18	0.18	0.18	ν_{12}	0.07	0.06	0.06		
ν_{13}	0.18	0.18	0.18	ν_{13}	0.23	0.22	0.21		
ν_{23}	0.25	0.25	0.25	ν_{23}	0.23	0.22	0.21		
k (W/mK)	k_{11}	57	50	45	k (W/mK)	k_{11}	46	40	38
	k_{22}	35	30	25		k_{22}	46	40	38
	k_{33}	35	30	25		k_{33}	35	30	28
α ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	α_{11}	0.12	0.70	1.05	α ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	α_{11}	0.56	0.92	0.97
	α_{22}	0.68	0.34	0.63		α_{22}	0.56	0.92	0.97
	α_{33}	0.68	0.34	0.63		α_{33}	0.04	0.54	0.60

Tabla 5. Propiedades de CMC de C/SiC de matriz híbrida reforzada con fibra de carbono unidireccional (1D)

Tabla 6. Propiedades de CMC de Cf/SiC de matriz híbrida reforzada con fibra de carbono bidireccional (2D)

4.5.3. Fibra de SiC y matriz de SiC

Los CMC de SiCf/SiC tienen las propiedades siguientes (Tabla 6):

- Son duros y dúctiles en cambio de ser frágiles.
- Tienen alta resistencia a la mayoría de los medios más corrosivos y abrasivos.
- Capacidad de alcanzar propiedades para aplicaciones específicas
- Posee un grado de resistencia a fatiga a condiciones de altas cargas termo-mecánicas y, además, un elevada resistencia de cambios bruscos de temperatura.
- Alta resistencia al calor hasta 1200°C
- Se puede utilizar en producción de automoción en los frenos.
- Las propiedades son acondicionadas para que cada proceso
- Dependiendo de la aplicación podemos tener en cuenta que puede haber combinaciones de matriz dominante, también como que el de fibra dominante.

PROPERTY	UNITS	TEMPERATURE		
		73°F (23°C)	1832°F (1000°C)	2552°F (1400°C)
Fiber Content	%	40	40	40
Specific Gravity		2.5	2.5	2.5
Porosity	%	10	10	10
Tensile Strength	KSI (MPa)	29 (200)	29 (200)	22 (150)
Elongation (Tensile)	%	0.3	0.4	0.5
Young's Modulus (Tensile)	MSI (GPa)	33 (230)	29 (200)	25 (170)
Poisson's Ratio				
V12	—	0.15	NA	NA
V13	—	0.4	NA	NA
Flexural Strength	KSI (MPa)	44 (300)	58 (400)	41 (280)
Compressive Strength				
In Plane	KSI (MPa)	84 (580)	70 (480)	44 (300)
Thru the Thickness	KSI (MPa)	61 (420)	55 (380)	36 (250)
Shear Strength (Interlaminar)	KSI (MPa)	5.8 (40)	5.1 (35)	3.6 (25)
Thermal Diffusivity				
In Plane	10 ⁴ FT ² /S (10 ⁴ M ² S ⁻¹)	130 (12)	54 (5)	54 (5)
Thru the Thickness	10 ⁴ FT ² /S (10 ⁴ M ² S ⁻¹)	65 (6)	20 (2)	20 (2)
Coefficient of Thermal Expansion				
In Plane	10 ⁻⁴ °F (10 ⁻⁴ °K)	1.7 (3)	1.7 (3)	NA
Thru the Thickness	10 ⁻⁴ °F (10 ⁻⁴ °K)	1.4 (2.5)	1.4 (2.5)	NA
Specific Heat	BTU/lbm °F (JKG ⁻¹ °K)	15 (620)	.29 (1200)	NA
Total Emissivity		0.8	0.8	0.8

Tabla 7. Propiedades de CMC de SiC/SiC [28].

El gráfico a continuación muestra cómo los CMC superan a los materiales de motores aeronáuticos anteriores, como la superaleación de níquel (Inconel). Los compuestos de SiC/SiC producidos en masa por GE Aviation (Evendale, Ohio, EE.UU.) operan a 1316°C.

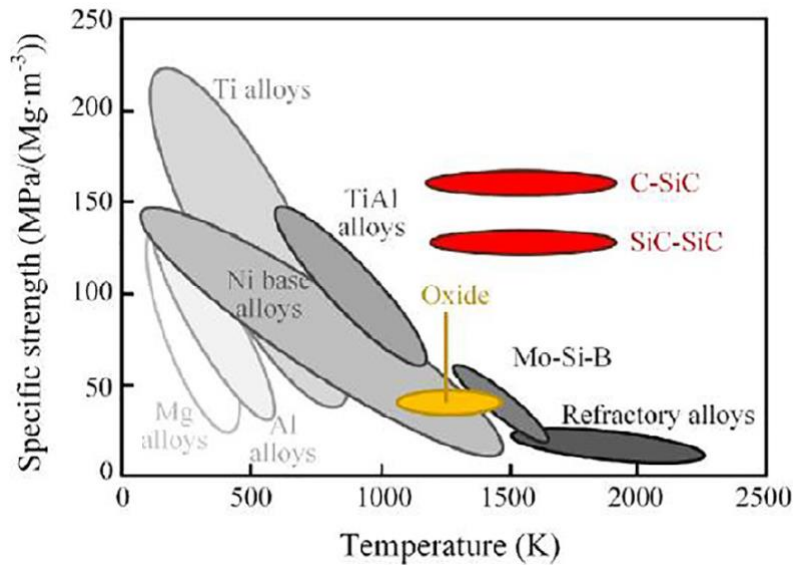


Figura 8. Relación entre la resistencia específica y la temperatura de materiales aeroespaciales alternativos [29].

4.6. Proveedores y coste

A continuación, se detallan los principales fabricantes de materiales CMC.

4.6.1. SAFRAN (Francia)

SAFRAN Ceramics, nueva empresa del grupo SAFRAN, localizada en las afueras de Burdeos, fabrica CMC de Cf/C (SEPCARB), de Cf/SiC (SEPCARB inox) y de SiCf/SiC (CERASEP). Es una empresa pionera y líder en fabricación de CMC.

Se está en contacto con la empresa para un posible suministro de materiales.

4.6.2. SGL CARBON GmbH (Alemania)

Esta empresa propone tanto CMC de Cf/C (SIGRABOND® Standard) como de Cf/SiC (SIGRASIC®). Cuentan con más de 40 años de experiencia con fibras de carbono y materiales compuestos. Nuestra propia fibra de carbono, producida en Europa y América del Norte, forma la base para todas las etapas de procesamiento de aplicaciones de compuestos. Desde precursores pasando por fibras de carbono hasta textiles y materiales preimpregnados, beneficiarse de nuestras diversas tecnologías de procesamiento y nuestro amplio conocimiento de producción, materiales y aplicaciones.

4.6.3. GENERAL ELECTRIC (USA)

GE Research tiene una amplia experiencia en el desarrollo, caracterización y ampliación de la producción de compuestos de matriz cerámica reforzados con fibra (CMC) y compuestos de matriz de polímero (PMC). Los CMC utilizan fibras cerámicas, con un revestimiento de interfaz especial, dentro de una matriz cerámica. Esta combinación de materiales proporciona una capacidad de temperatura similar a la cerámica (815°C-1650°C) con una durabilidad similar a la del metal y un ahorro de peso significativo en comparación con los metales. Los PMC utilizan fibras de vidrio, polímero o carbono dentro de una matriz de polímero que combina la resistencia y rigidez de las fibras con la capacidad de transferencia de carga de la matriz. GE Research cuenta con equipos dedicados al procesamiento de compuestos, modelado de procesos, pruebas mecánicas y ambientales, modelado

de propiedades de microestructura y levantamiento de compuestos. La experiencia de GE Research incluye la producción y comprensión de cada componente compuesto, incluidas las fibras de refuerzo, los recubrimientos de fibra, las matrices y los recubrimientos de barrera ambiental (EBC). La capacidad de comprender y desarrollar estos compuestos y sus componentes proporciona una clara ventaja en la comercialización y monetización de estas tecnologías. Por ejemplo, GE Research desarrolló un sistema CMC infiltrado por fusión, y su EBC, que GE Aviation ha comercializado y se utiliza en los motores a reacción comerciales CFM Leap y GE9X. GE continúa innovando en este espacio con el desarrollo de nuevos sistemas compuestos para aplicaciones militares y comerciales.

4.6.4. NITE CORPORATION (Japón)

Los productos compuestos NITE-SiC / SiC se fabrican mediante patentes internacionales basadas en nanotecnología, que se conoce como método NITE. El método NITE es sinónimo de nano infiltración y método de fase eutéctica transitoria, una modificación innovadora del método de sinterización en fase líquida.

Los materiales NITE-SiC / SiC alcanzan menos del 5% de porosidad con excelente hermeticidad. Los centros de investigación de terceros en todo el mundo también han confirmado una excelente tolerancia al daño por radiación, la estabilidad a altas temperaturas, incluida la resistencia a la corrosión en entornos de vapor de temperatura súper alta y la estabilidad ambiental.

Los materiales están hechos de fibra Si Hi-Nicalon Type S (1200 fibras/mecha) con un recubrimiento CVD-C de las fibras de 100-300nm y con una matriz NITE-SiC.

Se pueden fabricar también con fibra de carbono (Cf/SiC).

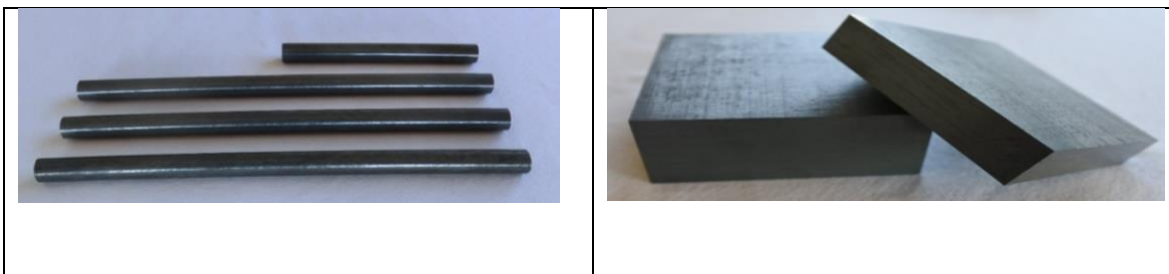


Figura 9. Tubos y placas de CMC en SiCf/SiC fabricados por el método NITE.

Product Number	Structure				Shape (mm)	
	Fiber	Matrix	Fiber orientation	Strengthening structure	Plane	Thickness
BS0-3	SiC	SiC	0/90	Layered(2D)	30x30	2,5,15,25,50,
BS0-5	SiC	SiC	0/90	Layered(2D)	50x50	2,5,15,25,50,
BS0-10	SiC	SiC	0/90	Layered(2D)	100x100	2,5,15,25,50,

Tabla 8. Dimensiones de las probetas fabricadas por NITE Corporation

El precio de una placa de 100 mm x 100 mm x 5 mm en Cf/SiC es de 100.000 yens (750 €) y en SiCf/SiC de 200.000 yens (1500 €).

4.6.5. ULTRAMET (USA)

La empresa americana fabrica los materiales siguientes:

- Cf/ZrC: ambientes oxidantes de 1760-2760°C
- Cf/HfC: ambientes oxidantes de 1760-2760°C
- Cf/TaC y Cf/TaC-HfC
- Cf/C revestida de CMC

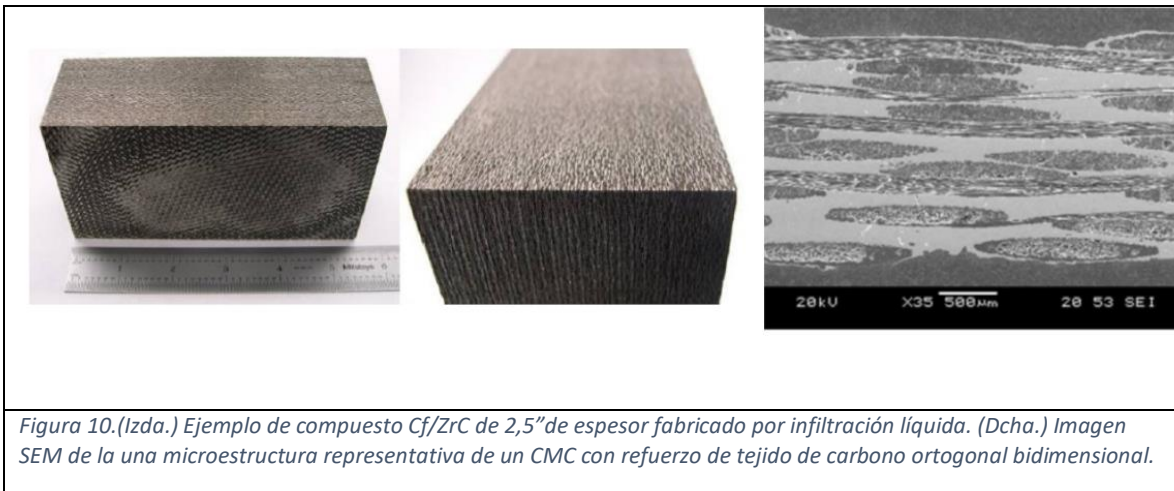
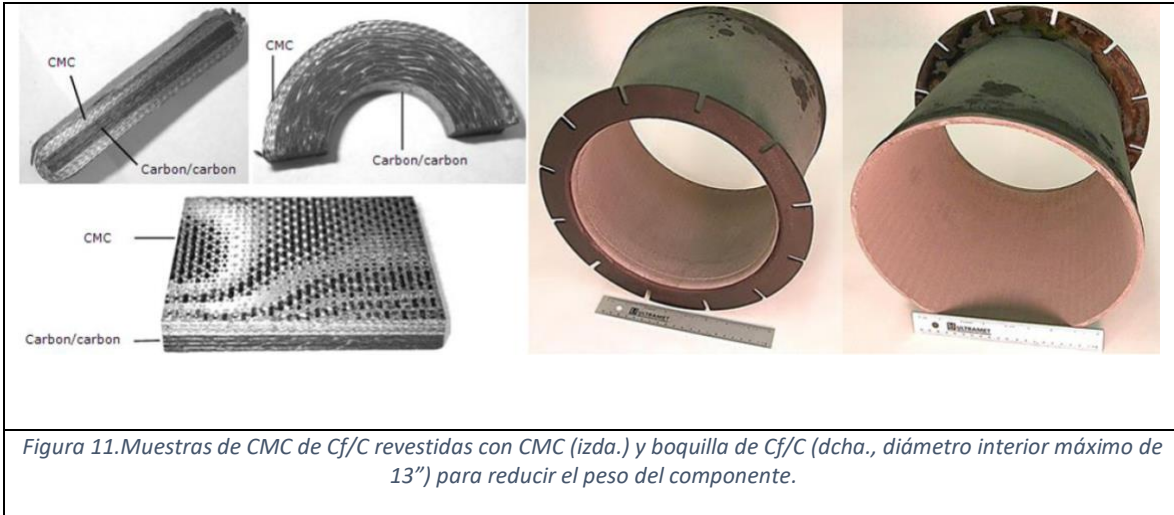


Figura 10. (Izda.) Ejemplo de compuesto Cf/ZrC de 2,5" de espesor fabricado por infiltración líquida. (Dcha.) Imagen SEM de la una microestructura representativa de un CMC con refuerzo de tejido de carbono ortogonal bidimensional.



Se ha pedido un presupuesto, sin contestación por ahora. Es posible que, además, estos materiales no se puedan exportar a Europa.

4.6.6. GOODFELLOW

Esta empresa conocida como proveedor especialista de metales, aleaciones, cerámicas, polímeros y otros materiales, sin una cantidad de pedido mínimo, para satisfacer la investigación, desarrollo y producción especializada de la ciencia y la industria en todo el mundo.

Propone CMC de Cf/C elaborado a partir de tela gruesa de alto rendimiento y densificado por impregnación líquida, carbonización y grafitización.

El precio de una plancha de 150 mm x 150 mm x 5 mm es de 642€.

4.7. Aplicaciones

A continuación, se detallan algunas aplicaciones de los tres tipos de CMC.

4.7.1. Fibra de carbono y matriz de carbono

- **Partes de motores de cohetes sólidos y líquidos**

En los motores de cohetes, los gases calientes producidos en la cámara de combustión deben canalizarse a través de una boquilla para crear y controlar el

empuje. Por tanto, buscaremos materiales refractarios, ligeros, resistentes a los choques térmicos y reproducibles en cuanto a prestaciones.

- **Cuellos de boquilla**

En un motor cohete de propergol sólido, los gases muy calientes (3000°K) se canalizan a través de una parte llamada "cuello de boquilla". Los compuestos Cf/C encontraron sus primeras aplicaciones en esos componentes por su resistencia en entornos extremos. Hay muchas variaciones. Por ejemplo, la Figura 4 muestra un cuello de alto rendimiento hecho con refuerzo a lo largo de las cuatro diagonales del cubo y densificación por la vía brea para promover una alta conductividad. La Figura 4 dcha. muestra un cuello grande (booster del lanzador Ariane V) de una textura de fibra tridimensional, densificada por gas.

- **Divergentes para motores de propergoles líquidos**

Actualmente, la mayor parte de los divergentes de motores de cohetes líquidos son de diseño metálico, de doble pared, refrigerados por la circulación de combustible. El peso, el coste y la complejidad tecnológica de dichos materiales han hecho que su reemplazo por un divergente delgado en Cf/C no refrigerado sea competitivo. El Cf/C también conserva sus características a muy bajas temperaturas (H₂ líquido), en particular no se hace quebradizo. El material soporta así un fuerte gradiente térmico entre la entrada del divergente en contacto con la cámara de combustión enfriada con hidrógeno líquido y el propio cuerpo del divergente, sin enfriar y sometido a los flujos térmicos de los gases de combustión.

Como resultado, se diseñó, probó y fabricó en serie un Cf/C divergente de 3 mm de espesor y casi 3 m de alto para equipar el motor americano RL10 (Pratt y Whitney) de la parte superior del cohete Delta 4 (figura 14). Su uso ha permitido una ganancia de carga que se puede poner en órbita en casi 500 kg.



Figura 12. Parte divergente desplegable del motor del segundo piso del cohete americano Delta 4.

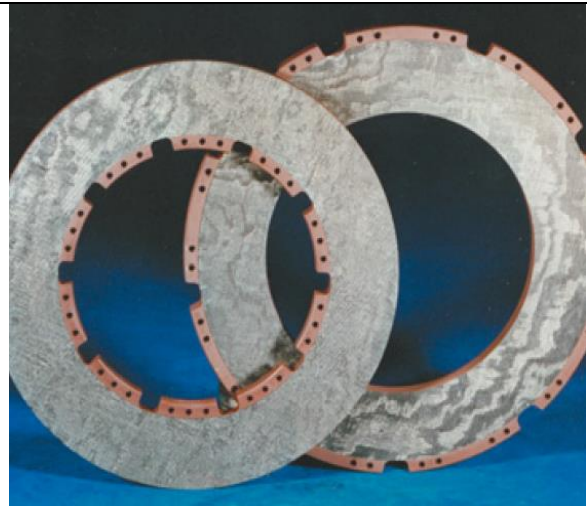


Figura 13. Discos de freno de avión (rotor y estator) con un diámetro exterior de ≈ 20 pulgadas.

- **Discos de freno para aviones y trenes de alta velocidad**

La producción de discos de freno para aeronaves civiles y trenes es hoy en día la principal aplicación de Cf/C, tanto en términos de masa como en términos de facturación. El mercado mundial actual es del orden de 4000 toneladas/año. Hablar en toneladas de un producto tan ligero y de alta tecnología es indicativo del lugar esencial que ha ocupado Cf/C en el frenado. Para lograr tales cantidades de material a costes de fabricación y uso aceptables, se han implementado nuevas tecnologías. Se utiliza una textura 3D cosida, isotrópica en el plano y densificada por gas (figura 15).

Desde un punto de vista tribológico, los frenos de las aeronaves o de los trenes deben cumplir dos especificaciones principales:

- en servicio normal, deben frenar con regularidad y desgastarse poco (aspecto económico);
- en el frenado de emergencia, el freno debe poder detener una aeronave completamente cargada y lanzada a la velocidad de despegue o un tren a alta velocidad (aspecto de seguridad).

Si inicialmente es la ganancia de peso (alrededor de 600 kg/avión) el elemento decisivo para el uso de discos Cf/C, es el aspecto de seguridad el que se ha convertido en el elemento decisivo a partir de entonces, y el el uso del Cf/C para los frenos de los aviones (fig. 16) y de los TAV se impuso rápida y universalmente. Hoy en día, este tipo de componente se usa también para coches de Formula 1 (fig. 17) y coches de alta gama (Ferrari, Bugatti...).



- **Componentes para la industria**

El uso de composites Cf/C permite producir piezas delgadas, no frágiles, resistentes a la fatiga térmica y mecánica.

- **Crisoles para la fabricación de monocristales de silicio**

La aplicación se refiere a la extracción de monocristales de silicio para la industria electrónica. Estos monocristales son de tamaño creciente y requieren la fusión de grandes volúmenes de silicio El tamaño de los crisoles aumenta (1 m) y ya no son compatibles (tecnología, economía) con el mecanizado en un bloque de grafito, el

uso de crisoles en Cf/C se ha vuelto atractivo. El Cf/C utilizado se produce mediante el devanado de filamentos (fig. 18).

- **Bases de horno**

En los hornos de tratamiento térmico, se utilizan bandejas (llamadas suelas) sobre las que se colocan las piezas durante el tratamiento (recocido, soldadura, etc.). Estas placas no deben deformarse durante los ciclos y ser estables durante muchos ciclos para evitar que las piezas cargadas se deformen. El Cf/C es especialmente adecuado para este tipo de uso (fig. 19).

- **Materiales para la industria nuclear**

Los reactores de fusión más avanzados son del tipo “Tokamak” en los que el material reactivo constituye un plasma de alta energía confinado por un campo magnético. En caso de contacto accidental de este plasma con la pared, se transfieren energías considerables. El material debe ser de alta conductividad térmica en la dirección del espesor para transmitir el calor liberado, y debe ser lo suficientemente fuerte en las otras direcciones para resistir las tensiones generadas por las soldaduras (fig. 20) en una estructura metálica enfriada.

Por tanto, se han desarrollado composites Cf/C específicos, que se caracterizan por el uso de una fibra de carbono ex-pitch muy conductora, en el espesor, asociada a una textura tridimensional cosida que asegura la cohesión y no la fragilidad.

En las centrales nucleares (de fisión) del futuro, es posible que las partes de Cf/C puedan realizar funciones importantes, en condiciones ambientales severas (temperatura, irradiación) en las que los metales muestran sus límites.

El uso de compuestos de carbono/carbono es innovador en muchos campos²⁹. Como mínimo, reemplazan al grafito porque proporcionan dos características principales: resiliencia (no fragilidad) y resistencia mecánica. Esto permite aprovechar al máximo propiedades particulares como las características

tribológicas y una alta capacidad calorífica específica en caliente. La producción en masa de los discos de freno ha demostrado que, en este tipo de condiciones, el nivel de coste es comparable al de ciertos grafitos.

El interés técnico-económico del uso de piezas compuestas de Cf/C requiere un estudio completo del sistema en el que está involucrado, porque muchas veces son los efectos secundarios inducidos los que hacen que la rentabilidad sea efectiva. Debemos analizar todos los aspectos del coste del uso de la pieza en Cf/C y no quedarnos al nivel del precio por kilo comparado a un metal.

Para usos a alta temperatura y atmósfera oxidante, se debe agregar protección antioxidante. Para las temperaturas más altas, se utilizan depósitos de SiC, en particular SiC depositado en el núcleo por infiltración de vapor químico. Este eje allanó el camino para los materiales compuestos de matriz cerámica (CMC).



Figura 17. Suelas de soporte de piezas para tratamiento térmico.



Figura 16. Crisol para la fabricación de monocristales de SiC (diámetro 800 mm).

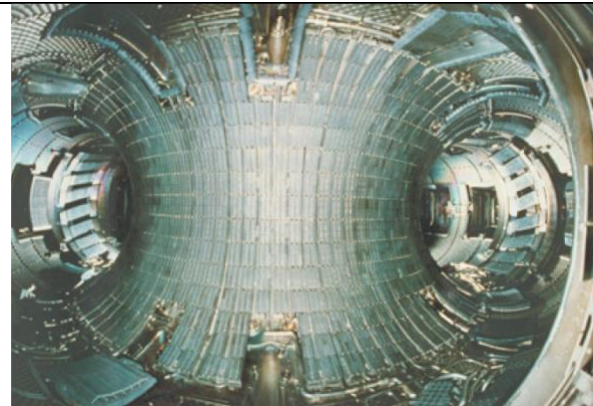


Figura 18. Pared del tokamak Tore Supra recubierta con briquetas de carbono/carbono.

4.7.2. Fibra de carbono y matriz de SiC

Los representantes típicos de tales componentes eran toberas de cohetes, flaps de motor, bordes de ataque de naves espaciales y discos de freno de aeronaves. Su vida útil comprende de varios minutos a unas pocas horas bajo los más altos requisitos termomecánicos que no pueden ser satisfechos por ningún otro material estructural.

- **TPS y estructuras calientes de vehículos espaciales.**

Se producen temperaturas de hasta 1800°C durante la fase de reingreso de los orbitadores a la atmósfera terrestre. Los sistemas de protección térmica (TPS) son el dominio de las cerámicas de SiC reforzadas con fibra de carbono en las estructuras de las naves espaciales y durante más de dos décadas se han llevado

a cabo numerosos proyectos impulsados por la tecnología en Europa, Estados Unidos y Japón. Las estructuras calientes del vehículo espacial experimental X-38 de la NASA, que fue planeado para servir como portador de tecnología para un nuevo vehículo de retorno de la tripulación (CRV) de la Estación Espacial Internacional (ISS), se consideran un ejemplo para la etapa actual de desarrollo Cf/SiC y Cf/C-SiC para sistemas de protección térmica. Una tapa de morro, los paneles de protección térmica adyacentes (faldón de morro), dos segmentos de borde de ataque y dos faldillas de carrocería para la dirección del vehículo fueron fabricados y calificados mediante pruebas en tierra por un consorcio alemán [6-8]. La tapa de la nariz hecha de LSI-Cf/C-SiC de DLR está particularmente expuesta a tensiones extremas de temperatura al volver a entrar debido a su ubicación directamente en la región de estancamiento del vehículo (fig. 21). La conexión del morro al fuselaje consta de ocho tirantes de montaje individuales, que también están hechos de Cf/C-SiC o, respectivamente, en las áreas más frías, de una aleación de metal resistente a la temperatura. Este sistema de sujeción tipo palanca garantiza una alta durabilidad frente a tensiones mecánicas, y también permite una expansión térmica sin obstáculos de la carcasa, que puede llegar hasta los tres milímetros con un diámetro medio de 700 mm al nivel de temperatura esperado de 1750°C.

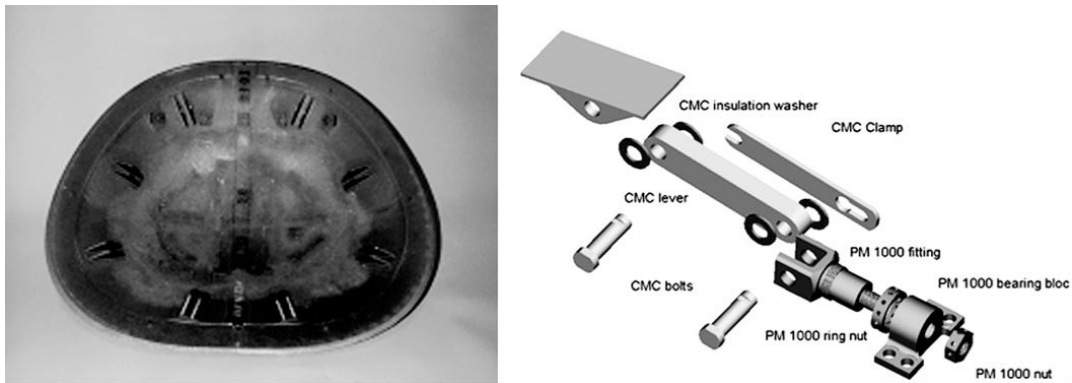


Figura 19. Diseño de fijación de la tapa nasal X-38 (hecha de compuestos C / C-SiC)

Los faldones de carrocería CVI-Cf/SiC, fabricados por MAN Technologie, se construyen a partir de cuatro cajas con refuerzos transversales integrales y bridas para cubrir los soportes. Las solapas de 1600 mm de largo y 1500 mm de ancho se unen con más de 400 tornillos en total, también fabricados en CVI-Cf/SiC (fig. 22).

El uso de compuestos Cf/SiC está proporcionando una reducción de peso de aproximadamente un 50% con márgenes de seguridad más altos en comparación con las estructuras metálicas aisladas. El faldón nasal de Cf/SiC fue fabricado por ASTRION GmbH mediante el proceso de infiltración de polímero líquido.



Figura 20. Aletas de cuerpo CVI-Cf/SiC para X-38, unidas con tornillos C / SiC. El Body Flap fue desarrollado por MAN-T en el marco del programa alemán TETRA que se llevó a cabo por orden de DLR y patrocinado por la BMBF y el STMWVT de Baviera.

- **Paletas, toberas y aletas de motores de cohetes y motores a reacción**

Se exigen tiempos operativos incluso más cortos que los que ocurren durante el reingreso de las paletas de reacción que se utilizan para desviar la dirección de empuje en los cohetes de combustible sólido, pero están cargadas por tensiones considerablemente más altas (fig. 23). Las paletas controlables proporcionan una mayor maniobrabilidad de los cohetes, principalmente durante la fase de baja velocidad inmediatamente después del despegue. Solo se requieren unos pocos segundos de resistencia, pero estos pocos segundos imponen al material las máximas exigencias en cuanto a estabilidad termomecánica y resistencia a la abrasión. Las superficies de las paletas de Cf/SiC deben recubrirse adicionalmente con una capa protectora de cerámica (por ejemplo, CVD-SiC) para poder resistir la inmensa explosión de partículas (por ejemplo, Al₂O₃) que se produce cuando el combustible sólido se quema. Al mismo tiempo, el contenido cerámico del material de estructura debe estar en un nivel tan alto, que el inevitable consumo de quemado

tenga lugar solo gradualmente, de modo que esté disponible una suficiente superficie residual de paletas durante todo el período de quemado. En consecuencia, la formulación de la microestructura del compuesto Cf/SiC requiere una optimización de las demandas conflictivas de alta tenacidad a la fractura (alto contenido de C) y alta resistencia a la abrasión (alto contenido de SiC).



Figura 21. Paletas de reacción de C / C-SiC para sistemas de propulsión de cohetes de combustible sólido.

Los compuestos Cf/SiC también se han investigado con éxito para boquillas de expansión de sistemas de propulsión de cohetes. A modo de ejemplo, se diseñó y fabricó un demostrador de tobera del motor de etapa superior de Ariane 5 mediante el devanado de filamentos, utilizando la técnica LPI [9]. La boquilla con una longitud de 1360 mm y un diámetro de salida de 1330 mm mostró una masa de 16 kg. Aunque fueron necesarias estructuras de pared considerablemente más gruesas, se pudieron lograr reducciones de peso del 60% y un aumento de la temperatura permisible de aproximadamente 500°C en comparación con la superaleación Haynes 25.

Varios componentes de Cf/SiC como quemadores, conos de escape y aletas de motor han demostrado su viabilidad para motores a reacción militares [10]. Las aletas exteriores en el motor SNECMA M 88-2 proporcionan un ahorro de peso del 50% con respecto a la aleta de superaleación correspondiente (Inconel 718) y se han fabricado casi 300 aletas para pruebas en tierra (fig. 24). Los flaps de motor de Cf/SiC son de primer interés para los futuros motores militares donde permiten la

reducción del flujo de enfriamiento interno, generando así beneficios en el rendimiento del motor.

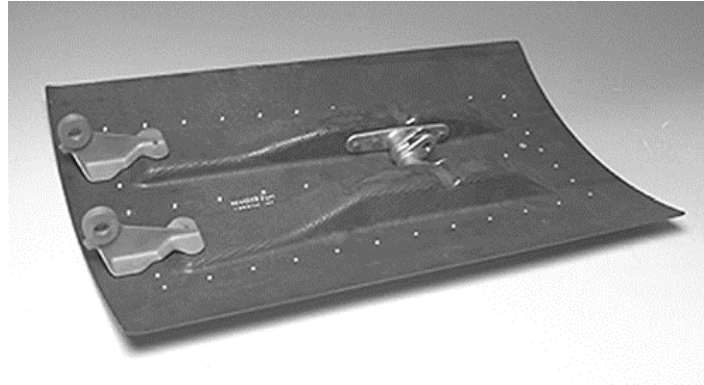


Figura 22. Aleta exterior C / SiC del motor M 88-2 (Sneema)

La baja resistencia general a la oxidación del carbono solo permite periodos operativos restringidos de las estructuras de Cf/SiC a temperaturas superiores a unos 450°C. Por lo tanto, no es posible su utilización en turbinas de aviones civiles o turbinas de gas estacionarias (por ejemplo, como tejas en cámaras de combustión, para difusores o para álabes de turbinas) con tiempos de funcionamiento de varias 10.000 horas.

Desde el punto de vista actual incluso con revestimientos protectores multicapa muy sofisticados es difícil usar esos materiales para aplicaciones terrestres en ambientes oxidantes a altas temperaturas. Por lo tanto, los desarrollos actuales de Cf/SiC terrestre se concentran en aplicaciones que tienen un rango de rendimiento que exige una resistencia a altas temperaturas solo por un corto tiempo, o en productos que hacen uso de otras características ventajosas de estos compuestos multifásicos.

- **Sistemas de fricción avanzados**

Los compuestos Cf/C-SiC, fabricados mediante infiltración de silicio líquido (proceso LSI), ofrecen propiedades tribológicas superiores en términos de altos coeficientes de fricción (CoF) y resistencia al desgaste. Las fibras de carbono mejoran la tolerancia al daño en comparación con el SiC monolítico, mientras que la matriz de carburo de silicio mejora la resistencia al desgaste en comparación con el carbono/carbono. Por lo tanto, los compuestos Cf/C-SiC son materiales nuevos y

destacados para frenos y embragues de automóviles, trenes y frenos de emergencia de alta velocidad en el campo de la ingeniería mecánica y el transporte.

Los primeros intentos de investigar los compuestos Cf/C-SiC para su uso como materiales de fricción para pastillas y discos de freno comenzaron a principios de los noventa [11]. Los materiales Cf/C-SiC muestran, en comparación con el carbono/carbono, una porosidad abierta considerablemente más baja (menos del 5%), una densidad moderadamente más alta (alrededor de 2 g/cm³) y una proporción cerámica de al menos el 20% en masa. Actualmente existen varias actividades en institutos y en industrias para investigar los materiales CMC para su uso como materiales de fricción para pastillas y discos de freno [12-16]. Los materiales resultantes difieren en sus constituyentes (fibras, cargas), microestructura (contenido cerámico, gradientes), propiedades (densidad, resistencia, conductividad térmica) y también en sus condiciones de procesamiento (recubrimiento de fibras, temperatura, etc.). No obstante, todos se basan en fibras de carbono y matrices de carburo de silicio como componentes principales del material compuesto. Las fibras de carbono generalmente disminuyen considerablemente la fragilidad del SiC, de modo que la tolerancia al daño de los componentes Cf/C-SiC se encuentra en el mismo orden de magnitud que para el hierro fundido gris.

Para uso automotriz, especialmente para discos de alto rendimiento, los costes de las fibras continuas y las técnicas de procesamiento comunes para componentes utilizados en la industria aeroespacial son demasiado altos para una producción en serie con un gran número de artículos. La forma más prometedora de reducir los costes y simplificar la fabricación es emplear refuerzos de fibra corta y técnicas de prensado.

Los compuestos Cf/SiC se utilizan principalmente en materiales de fricción y materiales de alta temperatura con una vida útil corta. Debido a las crecientes demandas de velocidad, carga y seguridad de los vehículos, los materiales de fricción ordinarios fallarán en condiciones extremas de frenado. Los compuestos Cf/SiC tienen muchas propiedades excelentes: coeficiente de fricción alto y estable,

que es insensible a los cambios de velocidad, carga y temperatura; buena resistencia al desgaste, no es fácil de rayar y adherirse a la superficie del par de fricción, buen comportamiento de rodaje; fuerte adaptabilidad ambiental, buena resistencia a la corrosión, resistencia al aceite y resistencia a la humedad; buenas propiedades mecánicas; baja densidad; larga vida útil, por lo que se considera la primera opción para la nueva generación de materiales de fricción de alto rendimiento [8,9]. En el campo de los sistemas de frenado de aeronaves, los discos de freno desarrollados por DACC (Corea del Sur) para el caza F16 se ha utilizado ampliamente. En el campo de los sistemas de frenado de limusinas, los discos de freno Cf/SiC se han utilizado ampliamente en el Porsche GT2, Ferrari 488 GTB y California T, Mercedes-Benz AMG, Corvette ZR1 (Fig. 25). En el campo de los sistemas de frenado de trenes de alta velocidad, los discos de freno Cf/SiC se han utilizado ampliamente en el TGV NG francés, el tren británico Heathrow Express y el tren TCV de Corea del Sur. Las pastillas de freno Cf/SiC y los discos de freno de los trenes de alta velocidad desarrollados por Central South University se han aplicado a los trenes de alta velocidad. Además, los compuestos Cf/SiC se han utilizado en los discos de freno de maquinaria de construcción, turbinas eólicas y camiones pesados [10].



Figura 23. Ejemplos de sistemas de frenado en Cf/SiC (de izda. a dcha.): Porsche GT2, Ferrari 488 GTB, Airbus A320Neo.

4.7.3. Fibra de SiC y matriz de SiC

Según un artículo de GE Reports de julio de 2016 de Tomas Kellner, un primer CMC de General Electrics Aviation se ha utilizado para las cubiertas de la sección caliente de su motor de avión de combate F136. En 2015, GE comenzó a probar

componentes CMC en un motor GENx (utilizado en el 787 Boeing Dreamliner) para madurar la tecnología del GE9X, el motor a reacción más grande jamás construido con un diámetro de turbina de 11 pies (3,35 m), que impulsará el avión Boeing 777X.

Las piezas de CMC ya están volando en el motor LEAP utilizado en los aviones Boeing 737 MAX, Airbus A320neo y COMAC C919. El motor LEAP es fabricado por CFM International (Cincinnati, Ohio, EE. UU.), Una empresa conjunta 50/50 entre GE Aviation y Safran Aircraft Engines (Courcouronnes, Francia).

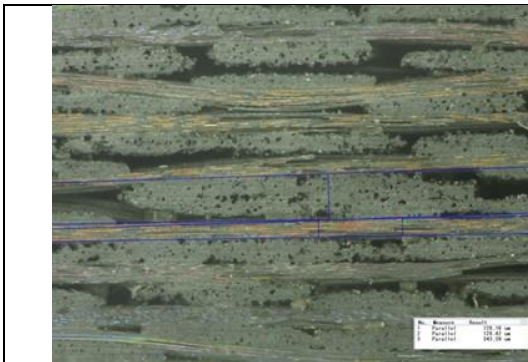


Figura 24. Imagen de microscopio óptico de un compuesto SiCf/SiC que muestra haces de fibras tejidas que refuerzan la matriz (SOURCE: Nicholas Simos, intechopen.com)



Figura 25. GE Aviation está produciendo en masa piezas de motor de SiC / SiC como estas cubiertas de piso 1 para el motor LEAP. SOURCE: GE Aviation, GE Reports)

Thermal Protection Systems (TPS) and Hot Structures for Hypersonic Vehicles

Se aplican diferentes técnicas de gestión térmica a diferentes vehículos de vuelo. La Figura 28 muestra la temperatura frente al tiempo de exposición para varios vehículos. En la parte superior izquierda de la Figura 28 se muestran las cápsulas de reentrada Apollo / CEV (Orion) y Mercury, que utilizan ablatores debido a temperaturas muy altas, pero tiempos relativamente cortos. El X-15 utilizó un enfoque de disipador de calor, debido a tiempos cortos y temperaturas relativamente moderadas. El SR-71 experimentó tiempos de vuelo más largos, lo que resultó en un diseño de estructura caliente y, nuevamente, las temperaturas fueron moderadas.

El Space Shuttle Orbiter es un fuselaje de aluminio aislado con temperaturas moderadas y expuesto durante más tiempo. Avanzando con vehículos hipersónicos que respiran aire, como lo ilustra un vehículo SSTO, se necesitará un nuevo enfoque para proteger térmicamente los vehículos. El nuevo enfoque abarcará inevitablemente una amplia gama de enfoques diferentes, incluidas las estructuras calientes, el aislamiento y la refrigeración activa.

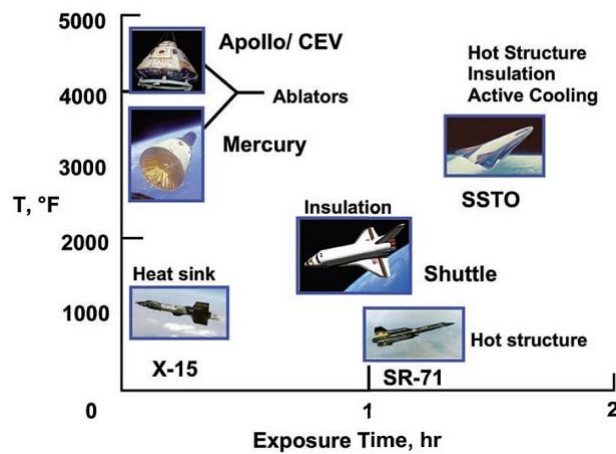


Figura 26. Thermal management approach for several vehicles as a function of temperature and exposure time.

Los compuestos SiCf/SiC se propusieron inicialmente para un diseño de estructura de manta térmica en la década de 1990, para lograr una temperatura de operación alta de hasta ~ 1000°C (para una alta eficiencia de conversión de energía) y una activación superior baja del sistema de manta, que tiene beneficios atractivos y únicos en comparación con una manta de base metálica [16-19]. Junto con un concepto de tan alto rendimiento, hubo desafíos significativos con los compuestos SiCf/SiC, incluida la fabricación de componentes de formas grandes y/o complejas (nave Hermes de la ESA), la falta de experiencia en aplicaciones estructurales prácticas y el mantenimiento de la hermeticidad en entornos de servicio.

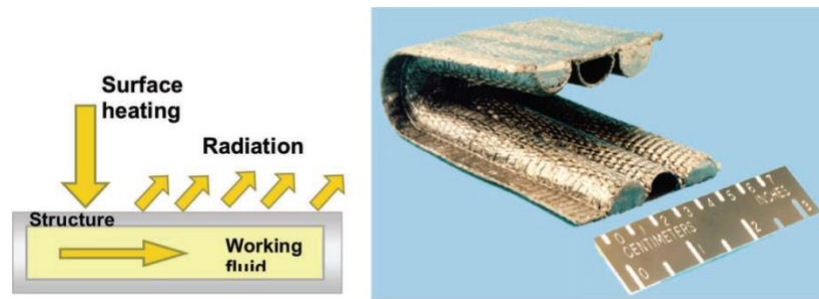


Figura 27. Esquema y fotografía que ilustran un borde de ataque enfriado por tubería de calor.

Más tarde, se propuso un concepto de manta de doble refrigerante de helio/plomo-litio, donde los insertos de canal de flujo (FCI) hechos de compuesto de SiCf/SiC son elementos clave que sirven como aislamiento eléctrico y térmico entre un metal líquido que fluye y estructuras de acero. Esta es una aplicación que utiliza el compuesto SiCf/SiC como material funcional, aunque todavía se requieren propiedades estructurales significativas para resistir el estrés debido a los gradientes térmicos dentro del componente. Los obstáculos tecnológicos en el desarrollo de material de SiC específicamente para esta aplicación incluyen el control de las propiedades de aislamiento térmico y eléctrico adecuadas en un entorno de irradiación y la compatibilidad química con el metal líquido en movimiento. La reciente investigación de fusión en compuestos SiCf/SiC tanto desde el diseño como desde los aspectos experimentales está más dirigida a esta aplicación de FCI que a una capa completa basada en SiC. Por ejemplo, Smolentsev et al. estudiaron el flujo de Pb-Li en una forma de FCI de SiC poroso recubierto de SiC con depósito de vapor químico (CVD) en un campo magnético de hasta 1,5 T a la temperatura de la aleación Pb-Li de 300°C. Este trabajo abordó que la entrada de Pb-Li en el SiC FCI durante las pruebas resultó en la degradación de las propiedades críticas de aislamiento eléctrico del FCI.

Aplicaciones en reactores nucleares

Los beneficios adicionales de los avances en la tecnología de fabricación es el surgimiento de una nueva aplicación de fusión que utiliza compuestos SiCf/SiC. Huang y col. propusieron desviadores monobloque de tungsteno refrigerados por

helio con tubería o conducto compuesto de SiCf/SiC para reemplazar la tubería a base de cobre que se utiliza actualmente en un diseño típico de desviador ITER [10]. Los resultados de la simulación computacional (fig. 30) mostraron que un compuesto de SiCf/SiC enfriado con helio puede eliminar un flujo de calor superficial en estado estable de $\sim 10\text{MW/m}^2$, lo que sugiere que el monobloque W/SiC enfriado con He puede soportar el desviador- como flujos de calor. Anteriormente, el nivel de preparación tecnológica de la fabricación de tubos compuestos de SiCf/SiC se consideraba bajo. Sin embargo, el notable progreso en el desarrollo de revestimientos de combustible a base de compuestos de SiCf/SiC para reactores de fisión permitió la fabricación de tubos largos y de pared delgada de compuestos de SiCf/SiC de grado nuclear. Además, ya se ha demostrado la unión de SiC con tungsteno.

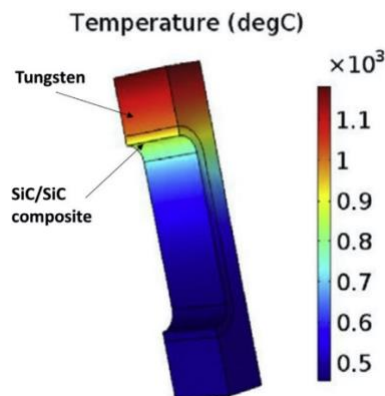


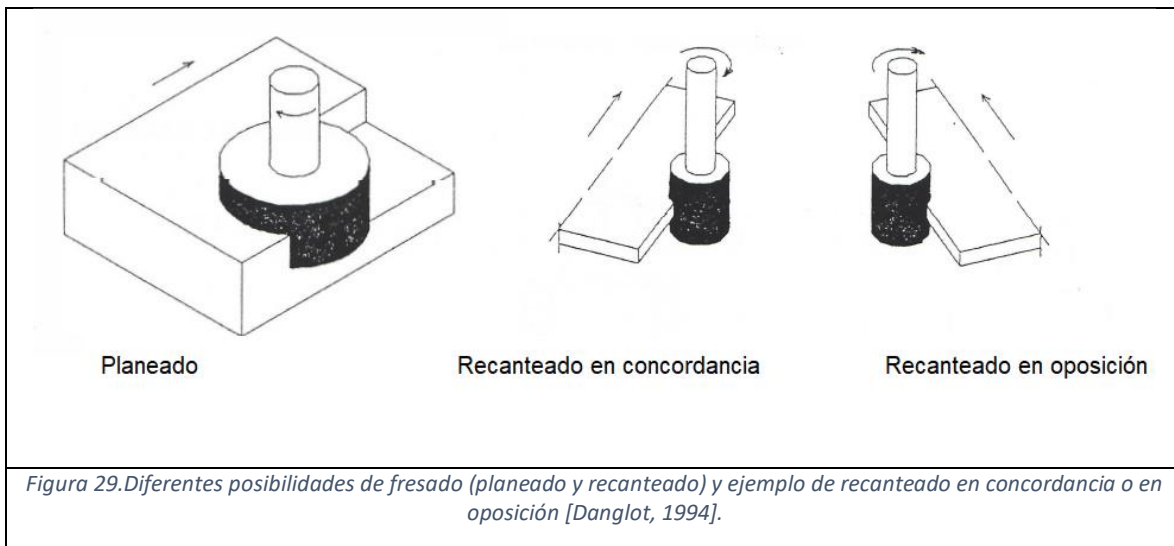
Figura 28. Distribución de temperatura simulada en un monobloque de tungsteno con conducto de refrigerante compuesto SiCf/SiC. La carga de calor que incide en la superficie superior es de $7,6\text{ MW/m}^2$.

4.8. Mecanizado abrasivo de los CMC

Por experiencia y conocimientos previos, se limita el análisis bibliográfico al mecanizado con herramientas abrasivas, excluyendo también el mecanizado por chorro abrasivo y el mecanizado por ultrasonidos con herramienta o fluido abrasivos.

4.8.1. Procesos de mecanizado abrasivo utilizados

Los primeros estudios sobre mecanizado de CMC y en particular de Cf/SiC (SEPCARB Inox) se realizaron en los años 1990 por J. Danglot (SEP, ahora SAFRAN, Francia)³⁰ y F. Girot³¹, en colaboración con fabricantes de herramientas diamantadas. El recantado del SEPCARB-INOX es el método de mecanizado menos conocido. El riesgo de dañar el material es muy alto y las piezas a producir son de formas complejas y delgadas. No se contempló como proceso de fresado el planeado ya que ese tipo de mecanizado era bastante limitado. La forma general de las piezas se obtiene durante la constitución de la preforma. Las condiciones de corte varían desde el centro de la herramienta hasta el radio exterior. Los fenómenos de "atasco" de virutas ocurren debajo de la herramienta y parte de la herramienta funciona en recantado.



El recantado es la operación obligatoria que se puede realizar varias veces durante el ciclo de producción del material, para abrir los poros y continuar con el proceso de CVI, eliminar las longitudes sobrantes y obtener las dimensiones finales. Se puede asimilar a una operación de rectificado en pasada profunda, ya que las pasadas radiales pueden ser de varios mm.

Para el recantado, los parámetros que mantendremos son el diámetro de la herramienta y las condiciones de corte son constantes. Esto permite, en un estudio en el cual se pueden adquirir conocimientos, identificar los problemas y facilitar la explotación de los resultados.

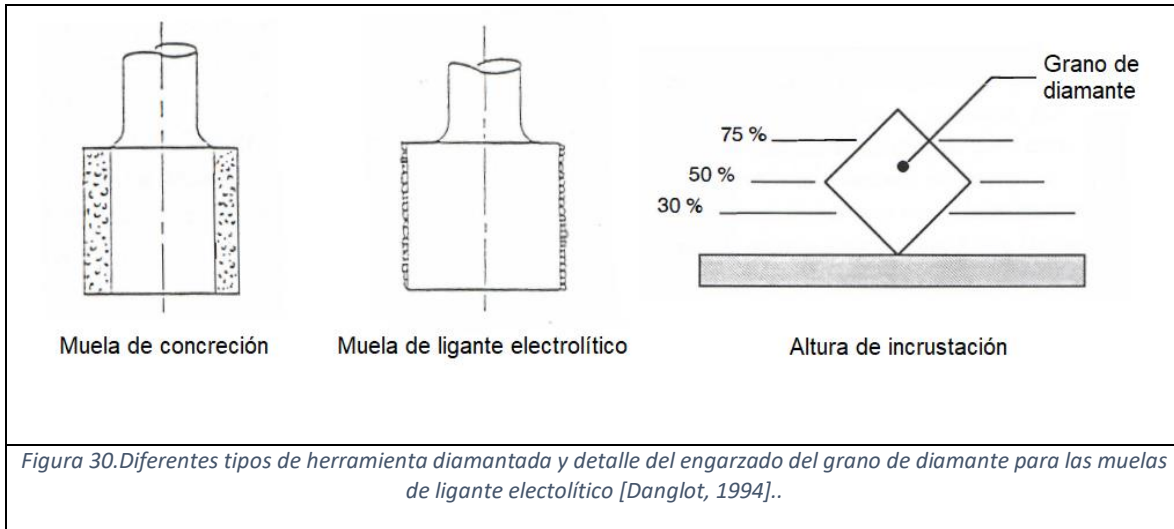
A priori, no hay diferencia entre el mecanizado en concordancia y en oposición, ya que, en rectificado, el avance de la mesa cambia de dirección con cada pasada, por lo que una pasada de dos se hace en concordancia, la otra en oposición. Danglot realizó de forma sistemática recantado en concordancia, y se realizaron ensayos en oposición para comprobar que no había diferencia.

Las herramientas que se pueden utilizar para este tipo de mecanizado se dividen en dos categorías:

- Muelas de concreción,
- Muelas abrasivas con ligante electrolítico.

Las muelas de concreción son muelas cuyos diamantes quedan completamente cubiertos por el ligante, sinterizándose la zona activa de la herramienta sobre el soporte metálico. El aglutinante puede ser metálico (bronce, ...) o resinoide (baquelita). Las ventajas de estas herramientas son su longevidad (varias capas de diamante) y el buen estado de las superficies mecanizadas. Sus desventajas son el coste y la baja tasa de arranque.

Las muelas abrasivas de ligante electrolítico tienen solo una capa de diamante. El diamante se sujeta al marco metálico de la herramienta, gracias a un depósito electrolítico (níquel). Esta herramienta tiene un coste unitario mucho menor. El inconveniente conocido de este tipo de herramienta es una vida útil aleatoria y más corta que las muelas de concreción.



Para la realización del estudio eligieron una muela con ligante electrolítico. Es la herramienta más utilizada en fresado. En primer lugar, por todas las formas de herramienta que se pueden producir, luego por su asequible precio y finalmente por su gran potencia de corte. El diamante es natural, con una concentración en diamante máxima (volumen de diamante depositado en la herramienta), es decir que los granos se tocan entre sí en toda la periferia. Se puede solicitar al fabricante de la herramienta una denominada concentración aireada para limitar el denominado problema de "atasco" o embotamiento de la herramienta, aunque habitualmente no se utiliza para mecanizar este tipo de material por un número de granos de diamante limitado. El engarzado corresponde a la altura de incrustación de los granos de diamante en el depósito electrolítico. Hay tres alturas:

- D, bajo: 30% de incrustación,
- N, normal: 50% de incrustación,
- S, super: 75% de incrustación.

Las herramientas que se utilizaron son las de incrustación S, por resistir mejor durante el mecanizado de Cf/SiC y SiCf/SiC. En cuanto al tamaño de grano, este está definido por la norma FEPA (Federación Europea de Productores de Abrasivos) y la cifra corresponde al tamaño de grano medio.

Usualmente, en la empresa usaban muelas con grano D427 (desbaste) a D151 (para acabado). El tamaño de grano influye en la superficie mecanizada. Un grano grande permite una interesante tasa de arranque de material en poco tiempo, pero dejará ralladuras muy marcadas en la pieza que habrá que remover con una muela de grano fino. Se eligió un grano D252, tamaño de grano medio con buena potencia de corte, para mecanizar con grandes profundidades de corte. Además, este tamaño de grano se utiliza a menudo para muelas abrasivas donde la precisión dimensional de la herramienta no es esencial.

Con respecto a las dimensiones, la herramienta debe ser cilíndrica, de un diámetro que permita obtener interesantes velocidades circunferenciales, altura suficiente para poder mecanizar sucesivamente varias placas. La elección fue una herramienta de diámetro de corte de 12 mm, una altura de corte de 15 mm, y un diámetro del vástago > 6 mm.

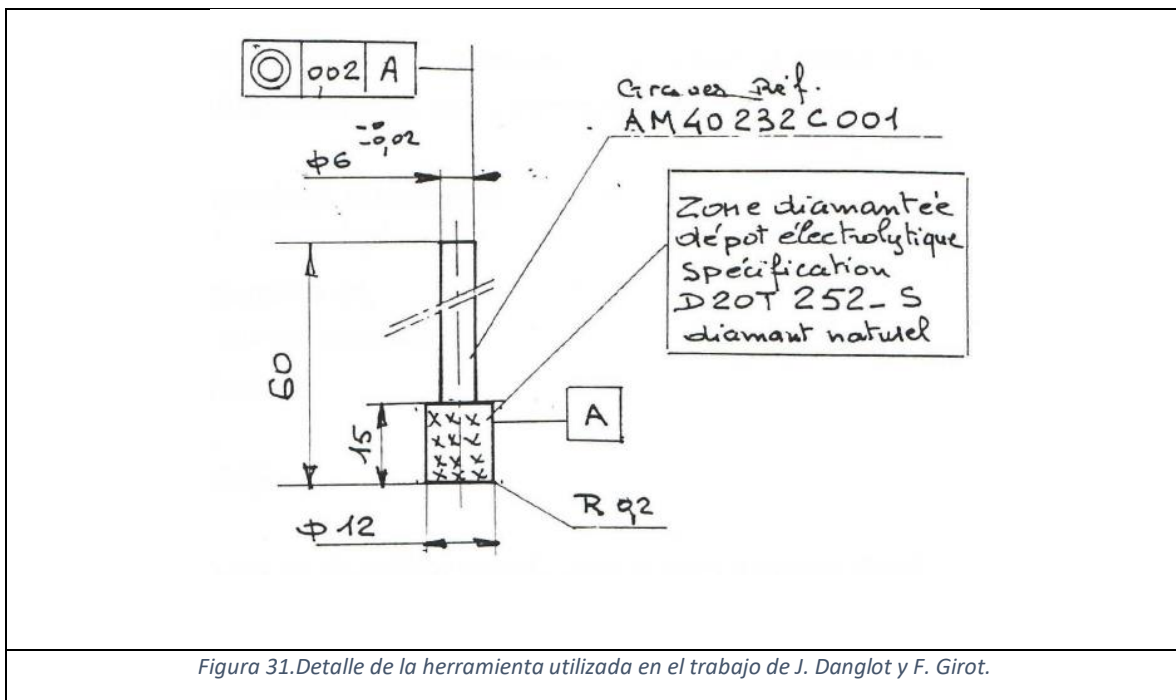


Figura 31. Detalle de la herramienta utilizada en el trabajo de J. Danglot y F. Girot.

Las operaciones de mecanizado se realizaron con lubricación, utilizando el producto habitual, ósea agua a la que se le ha añadido un 3% de JEFFA FR5, que es un líquido de uso habitual en rectificado. El número de pasadas debe ser al menos

igual a dos para poder verificar los valores obtenidos. Además, para poder comparar el desgaste de las herramientas, el volumen de material eliminado debe ser el mismo, independientemente de la profundidad de corte. Por lo cual se usaron unas pasadas radiales **ac** de 1 mm, 2.5 mm y 5 mm, respectivamente en 10, 4 y 2 pasadas. Los otros parámetros utilizados fueron, la velocidad de rotación **N** de (2800, 11400 y 20000 rpm), y la velocidad de avance **Vw** (100, 500 y 1000 mm/min). Se realizó un DoE con un diseño ortogonal completo (27 condiciones diferentes) y se añadió unos ensayos más a 11400 rpm con un avance de 2000 mm/min, y a 90000 rpm con un avance de 100 mm/min para cada uno de los tres valores de **ac**. Como respuestas, se estudiaron las siguientes cantidades: la fuerza radial (FR), la fuerza tangencial (FT), el acabado superficial o rugosidad(R), el daño mecánico a partir de la variación del módulo de Young (E), el daño superficial a partir de la dimensión del astillado (T).

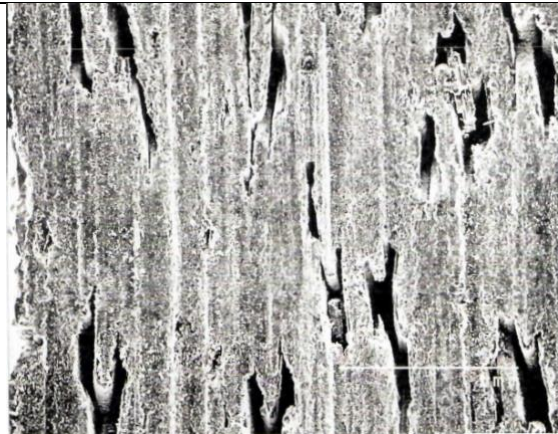
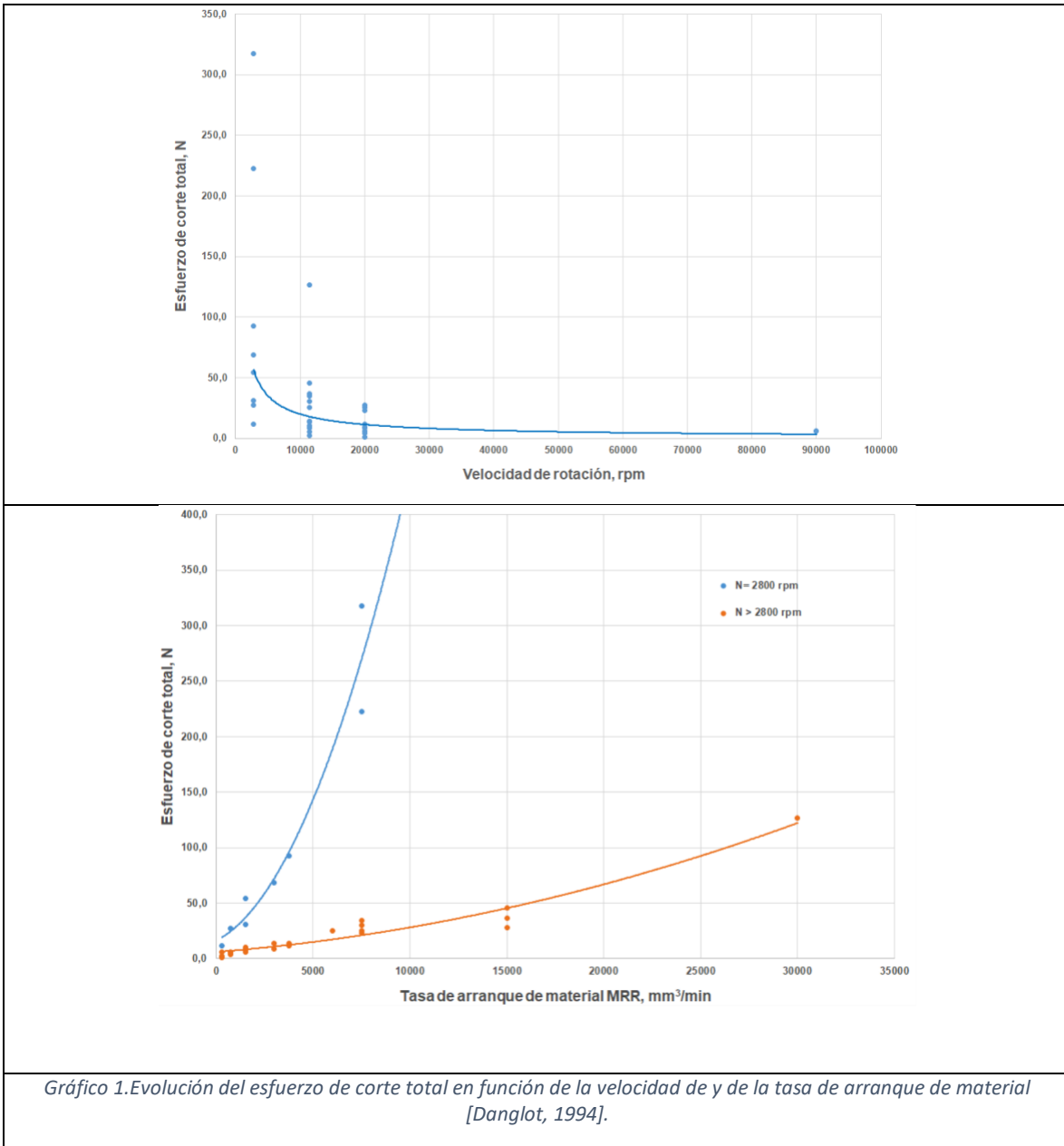


Figura 32. Calidad superficial obtenida donde se puede apreciar la porosidad abierta del material Cf/SiC (SEPCARB Inox) [Danglot, 1994].

La evolución de los esfuerzos con la velocidad de rotación (fig. 35) muestran que, a partir de 11400 rpm, los esfuerzos ya casi no varían, cual sea el valor de la pasada **ac** y de la velocidad de avance **Vw**. Con respecto a la tasa de arranque de material **MRR**, a partir de 11400 rpm, el esfuerzo varía de manera casi lineal con la tasa de arranque cuando para la velocidad de 2800 rpm esa variación es muy rápida y casi exponencial.



En conclusión, el trabajo de Danglot y Girot demuestra que:

(2) La muela abrasiva es un factor fundamental para el mecanizado. La calidad del mecanizado depende de sus características y su reproducibilidad. La elección de los granos debería limitarse a las gamas con poca disparidad de tamaño de grano. La realización de la herramienta con ligante electrolítico con un engarzado normal (50%) debe permitir aumentar la vida útil de la herramienta en al menos 30% por un coste de compra equivalente. Esta nueva altura de incrustación debería

mejorar la capacidad de corte de la herramienta, con bordes de corte más claros y mejor evacuación de viruta. Durante las primeras operaciones de mecanizado con este tipo de herramienta, será necesario comprobar que los granos de diamante no sean expulsados del aglomerante bajo la fuerza de corte, lo que reduciría la vida útil de la herramienta. Si limitamos el esfuerzo de corte, este fenómeno no debería ocurrir.

(3) El análisis del material antes del mecanizado revela porosidades y fisuras múltiples de la matriz. El mecanizado genera nuevas fisuras así como un astillado del material a lo largo y al final del mecanizado. Esto puede ser perjudicial para las características mecánicas del material. La medición del módulo de Young longitudinal específico antes y después del mecanizado indica una disminución de esta característica cuando la fuerza de corte supera los 50 N. El acabado superficial no cambia con el aumento de la profundidad de corte. Mejora notablemente si la velocidad de rotación es alta. Las dimensiones del astillado en la superficie del material aumentan si se aumenta la profundidad de corte y si disminuye la velocidad de rotación. No se observó delaminación. Esto se explica por el hecho de que no hay esfuerzos en el sentido interlaminar.

(4) Las fuerzas de corte cambian según los parámetros. Aumentan de manera lineal con la profundidad de corte y la velocidad de avance. Disminuyen exponencialmente en función de la velocidad de rotación de la herramienta. El rango de fuerzas registradas es muy amplio, de 1 N a 320 N. La fuerza radial está relacionada principalmente con la velocidad de rotación. Los otros parámetros: avance, profundidad de corte y sus interacciones con la velocidad de rotación tienen mucha menos influencia. La fuerza tangencial es función de la velocidad, la profundidad de corte y sus interacciones. Estas variables tienen el mismo peso en el aumento de la fuerza tangencial para un trabajo en concordancia. En el caso de mecanizado en oposición, la fuerza tangencial se multiplica por 2 a 4. El mecanizado en concordancia debe utilizarse sistemáticamente para limitar las fuerzas de corte.

(5) No se verifica el mecanizado con las condiciones de corte del rectificado (velocidad de rotación muy alta, avance muy rápido y profundidad de

corte baja), preconizados por los fabricantes de herramientas para limitar la fuerza de corte. El mecanizado con las condiciones de corte del fresado (velocidad de rotación moderada, avance limitado y alta profundidad de corte) permite una tasa de arranque de material elevado con fuerzas de corte moderadas.

(6) El análisis de los resultados nos permite elegir una velocidad de corte entre 7 y 13 m/s, correspondiente a fuerzas inferiores a 50 N. Una velocidad inferior genera fuerzas demasiado elevadas. Una velocidad más rápida prácticamente ya no reduce los esfuerzos y requiere la compra de husillos de alta velocidad que son costosos y difíciles de usar industrialmente. Una velocidad de corte entre 7 y 13 m/s corresponde a las posibilidades de las máquinas herramienta y debe recomendarse. Los parámetros económicos se caracterizan por:

- una velocidad circunferencial del orden de 15 m/s. Este rango de velocidades corresponde a una velocidad de rotación compatible con las posibilidades de las máquinas herramienta actuales, equipadas con multiplicadores de velocidad mecánicos.
- una velocidad de avance de 1000 mm/min
- una profundidad de corte de 5 mm.

Estas condiciones de corte permiten una tasa de arranque de material de 15000 mm³/min. Este valor significativo es treinta veces mayor que el indicado en la norma de proceso SAFRAN.

4.8.2. Acabado superficial del mecanizado abrasivo

La rugosidad de la superficie mecanizada es el índice más común para evaluar la calidad de la superficie mecanizada. En los estudios, se usan tanto los parámetros de características bidimensionales (como Ra, Rz) como los parámetros de características tridimensionales (como Sa, Sq, Sz, Sku, Sdr, Sbi). Sin embargo, en vista de la anisotropía y heterogeneidad de los CMC, los parámetros de características bidimensionales pueden ser difíciles de evaluar con precisión para parámetros de características tridimensionales. Generalmente, la morfología de la superficie 3D se obtiene mediante métodos de medición óptica sin contacto (fig. 36), y luego se obtienen los parámetros de características tridimensionales.

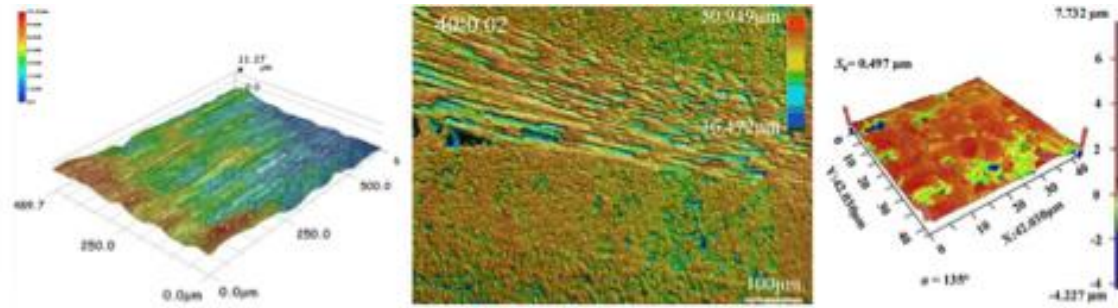


Figura 33. Morfología superficial 3D de la superficie mecanizada.

Las propiedades del material juegan un papel decisivo en la calidad de la superficie mecanizada. Como material anisotrópico y heterogéneo típico, obviamente existe el efecto de las orientaciones de la fibra de carbono y la dirección de mecanizado sobre la rugosidad de la superficie mecanizada.

Se realizaron experimentos de fresado en tres orientaciones típicas de las fibras (fig. 37). Los resultados mostraron que tanto Ra como Rz siguieron la siguiente regla: Longitudinal > Normal > Transversal.

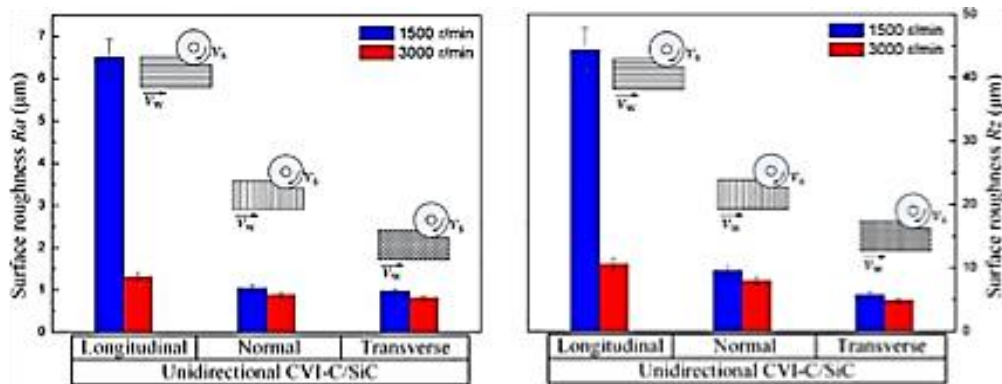


Figura 34. Efecto de las orientaciones de las fibras sobre la rugosidad de la superficie mecanizada.

Para el rectificado de superficies con muelas diamantadas, definieron el ángulo de deflexión como α , β , γ según el plano de referencia, y propusieron que cuando $\alpha = 90$, $\beta = 90$, $\gamma = 0$, estos ángulos son definidos de tal manera que estén de acuerdo al plano de referencia del mecanizado, de esta forma analizar de forma tridimensional que S_a y S_z fuesen lo mismo, de esta manera se puede discutir la incidencia que puede tener el ángulo de ataque de la herramienta y a su vez que dirección tenemos las fibras, con respecto a la rugosidad de la superficie cuando se

usa una herramienta de granos de diamante para mecanizados abrasivos compuestas de Cf/SiC, y propusieron que S_q era el más pequeño cuando el ángulo era de 90. A su vez, realizaron experimentos de fresado de compuestos tejidos 2D de Cf/SiC en diferentes direcciones, así como con compuestos tejidos 2.5D de Cf/SiC. Todos los resultados experimentales demostraron que la orientación de las fibras con respecto a la dirección de mecanizado afecta a la rugosidad.

Los parámetros geométricos de la herramienta utilizada para el mecanizado también afectan la rugosidad de la superficie, a su vez, encontraron que el uso de muelas segmentadas aumentaba R_a y S_a en el rectificado de compuestos Cf/SiC. La razón es que el uso de una muela con granos de diamante aumenta el máximo de deformaciones, el espesor de la viruta, y cada segmento de la muela tenía un impacto mecánico en la pieza. Como otro factor a estudiar, analizaron la influencia del ángulo de punta y el ángulo de paso de la herramienta de PCD en S_a y S_z . Para varios procesos de mecanizado, la variación de mecanizado, con respecto a la rugosidad de la superficie con parámetros de mecanizado está ampliamente distribuida. El mayor consenso es que la superficie mecanizada, la rugosidad disminuye con el aumento de la velocidad del husillo y aumenta con la velocidad de avance y la profundidad de rectificado (o profundidad de corte).

4.8.3. Relación de la rugosidad con la Energía Específica de Corte

Otro factor de suma importancia cuando se va a mecanizar un material es que la energía de corte específica que es la tasa del mecanismo de remoción de material en energía y pudieron notar que existe una correlación negativa entre la rugosidad de la superficie mecanizada y la energía de fresado específica, como se muestra en la Fig. 38. algunas conclusiones inusuales llevaron a cabo un experimento de molienda en compuestos Cf / SiC, y los resultados mostraron que a medida que aumentaba la velocidad de alimentación, tanto S_a como S_q disminuían y la influencia del espesor máximo de viruta no deformada en la rugosidad de la superficie no fue significativa debido a la orientación de la fibra, propusieron que R_a

disminuyó ligeramente a medida que la profundidad de rectificado aumentó en el rectificado MQL de compuestos Cf / SiC, debido a la reducción del desgaste de la muela. Por otro lado, al mecanizar compuestos de Cf / SiC utilizando herramientas de PCD que encontraron si la velocidad de corte era demasiado alta, la herramienta sería inestable debido a una carga excesiva, lo que resultaría en un aumento brusco de la rugosidad de la superficie mecanizada.

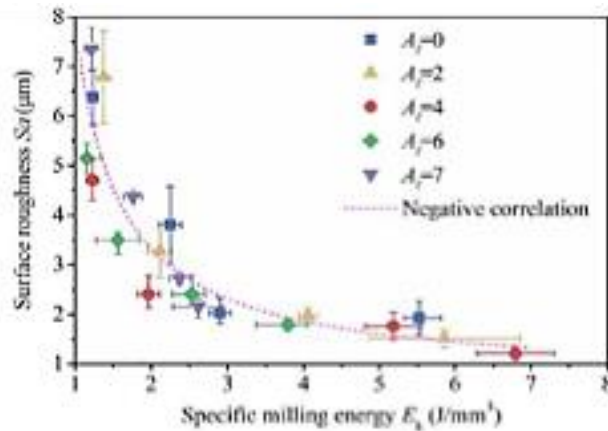


Figura 35. Correlación entre rugosidad superficial y energía de fresado específica [10].

4.8.4. Efecto de Distintos Métodos de Mecanizado sobre la Rugosidad.

Al mecanizar compuestos Cf / SiC utilizando una muela de granos de diamante, encontraron que si la densidad de los materiales era baja (la porosidad era demasiado alta), la influencia de los parámetros de mecanizado en la rugosidad de la superficie era inestable. Además de los efectos de las propiedades del material y los parámetros de mecanizado sobre la rugosidad de la superficie, también se han discutido los efectos de los parámetros de mecanizado asistido. Para MQL propusieron que en el rectificado de compuestos Cf / SiC, en comparación con el rectificado en seco, el rectificado fluido (rectificado en húmedo) y el rectificado MQL redujeron eficazmente la rugosidad de la superficie, debido al buen efecto de enfriamiento y lavado. Vale la pena señalar que el fresado MQL solo utiliza una pequeña cantidad de aceite lubricante para obtener un buen rendimiento integral, con efecto y protección ambiental. Sobre esta base, discutieron el efecto de los parámetros MQL (dirección de la boquilla, presión de aire, caudal de aceite y

distancia de la boquilla) sobre la rugosidad de la superficie mecanizada. Además propusieron la aplicación de NMQL (MQL con N_2) en el fresado de compuestos Cf/SiC. Los resultados experimentales se muestran en la figura 1, e indican la eficacia de NMQL para reducir la rugosidad de la superficie mecanizada.

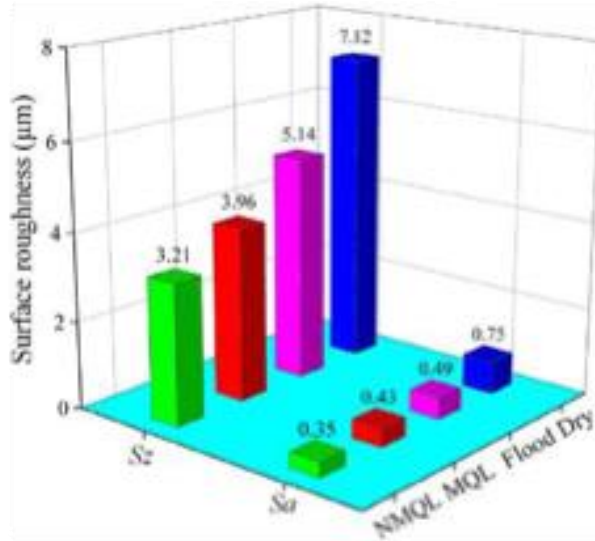


Figura 36. Valores de rugosidad media Ra, para diferentes estrategias de rectificado.

4.8.5. Síntesis de las condiciones de corte y máquinas utilizadas

Tipo de Mecanizado	Herramienta	CMC y Forma de Fabricación	Parámetros de mecanizado	Fuente
Recantado	Muela diamantada de 12 mm de diámetro, granos D252 con ligante metálico (Ni) de altura S (75%)	SEPCARB-INOX 2D por CVI	Pasada axial: 3,5 mm Pasada radial: 1, 2,5 y 5 mm Vc: 2800, 11400, 20000 y 90000 rpm Vw: 100, 500, 1000 y 2000 mm/min Refrigeración: agua con 3 % de JEFFA FR5	USINAGE DES MATÉRIEAUX COMPOSITES THERMOSTRUCTURAUX A MATRICE CÉRAMIQUE Memoria TFC del CNAM (1993), nº 258 Francia
Fresado	Fresa diamantada D256 con aglomerante de níquel	Fibra de carbono 45%, reforzado con 50% se Carburo de silicio, con un 5% de porosidad. Fabricado por CVI.	Velocidad de corte: de 100 a 3400 m/min. Vw: 100 a 2000 mm/mn Pasada radial de 1 a 5 mm	High speed abrasive milling of ceramic matrix composite materials, 1 st French German Conference on High Speed Machining, June 1997
Mecanizado ultrasónico, con rectificado	Rectificadora cilíndrica de 10 mm		Refrigeración: agua. Profundidad de pasa 1 mm. Vw: 300 mm/min. Pasadas 5 veces	Kinematic view of tool life in rotary ultrasonic side milling of hard and brittle materials https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2009.12.006
Rectificado	Muela de Diamante	Fibra de carbono, reforzado con carburo de silicio.	Angulos de ataque de la muela, fueron longitudinal, normal y transversal con angulos de ataque de: $\alpha=90^\circ$ $\beta=90^\circ$ $\varphi=0^\circ$	
Taladrado	5mm diamond coated twist drill	CVI-MI SiC/ SiC with Hi-Nicalon fibres in a woven architecture of a 5 harness satin (5HS)	f=2 mm/min and v=3000 rpm)	On understanding the microstructure of SiC/SiC Ceramic Matrix Composites (CMCs) after a material removal process https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.11.037
Rectificado o mecanizado láser		2,5D braided SiC/SiC composite with 100 nm pyrolytic carbon by CVI and SiC matrix by PIP		Effect of Machining Processes on Mechanical Properties of SiC/SiC Composites https://doi.org/10.1088/1757-899X/678/1/012054

Rectificado asistido por US	single diamond abrasive particle is brazed on the end face of a cup-shaped diamond grinding wheel base, which is made of low carbon steel (Type 45 steel), its diameter is $\varnothing 24$ mm, the wall thickness is 2 mm, the diameter of the diamond abrasive 91 μ m,	Cf/SiC	DMG Ultrasonic 20 Linear, DMG MORI the spindle speed n is 1000 rpm, the grinding depth ap is 10 μ m, and the workpiece speed Vw is 100 mm/min. During ultrasound-assisted cutting, the resonant frequency of the tool is 21.2 kHz and the end amplitude is approximately 4 μ m.	Research on Material Removal Mechanism of C/SiC Composites in Ultrasound Vibration-Assisted Grinding https://doi.org/10.3390/ma13081918
Mecanizado convencional, mecanizado asistido por US o láser				Machining of SiC ceramic matrix composites: A review https://doi.org/10.1016/j.cja.2020.08.001
Mecanizado convencional	PCD tool	SiCf/SiC B by CVI + SiC by CVI + (Si + SiC particles) by SMI		Influence of grit geometry and fibre orientation on the abrasive material removal mechanisms of SiC/SiC Ceramic Matrix Composites (CMCs) https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2020.103580
Milling, grinding, drilling, unconventional machining	PCD tools, abrasive tools, grinding wheels...			A review on machining of carbon fiber reinforced ceramic matrix composites https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.06.112
	Abrasive tools			Diamond abrasive based cutting tool for processing of advanced engineering materials: a review 2nd International Conference on Materials Manufacturing and Modelling, ICMMM – 2019.

4.8.6. Mecanismos de corte

Para resumir los logros de diferentes investigaciones, se señalan los desafíos que deben resolverse urgentemente del mecanizado de FRCMCs-SiC en una amplia gama de aplicaciones de ingeniería, y se prosiguen las nuevas direcciones de investigación del mecanizado de FRCMCs-SiC como podemos ver en la figura 4.

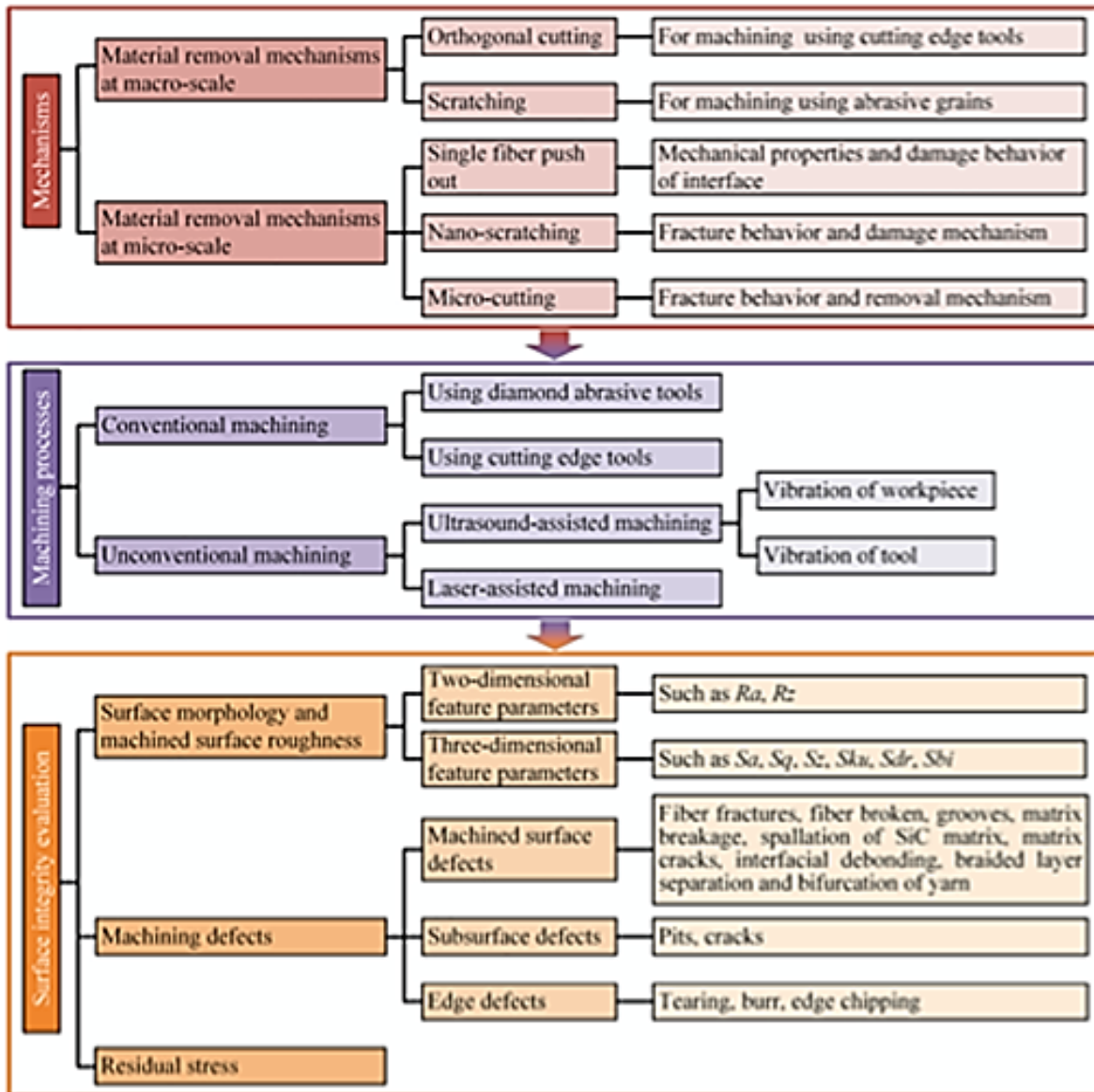


Figura 37. Resumen del contenido sobre el mecanismo de eliminación de material, los procesos de mecanizado y la evaluación de la integridad de la superficie de FRCMCs-SiC.

El mecanismo de arranque de material incide directamente en los fenómenos físicos durante el mecanizado (fuerza, calor, deformación, etc.) y la calidad después del mecanizado. Por lo tanto, es de gran importancia comprender el mecanismo de eliminación de material de los FRCMCs-SiC para realizar un mecanizado de alta calidad y eficiencia.

Dependiendo del ataque de la herramienta podemos determinar los mecanismos de corte presentes en las cerámicas y a continuación podemos ver como se desarrolla el mecanismo de arranque de material dependiendo del ataque.

4.8.7. Mecanismo de arranque de material basado en corte ortogonal

Para el mecanizado (como fresado, taladrado, torneado) con herramientas de corte, el corte ortogonal (OC) es el experimento básico más utilizado para estudiar el mecanismo de eliminación de material. Para explorar el mecanismo de arranque de material y la transición dúctil-frágil en el corte, se llevaron a cabo experimentos de corte ortogonal en tres típicas orientaciones de las fibras de los compuestos Cf/SiC. Como se muestra en la Fig. 6, el mecanismo de eliminación de material es significativamente diferente a lo largo de diferentes orientaciones de fibra y en diferentes profundidades de corte. Cuando el grosor de corte es pequeño, el corte está dominado por el comportamiento de cizallamiento de los composites al cortar a lo largo de las fibras longitudinales y el comportamiento de cizallamiento de una matriz al cortar a lo largo de fibras y fibras transversales, que es similar a la ruptura dúctil. Cuando el espesor de corte aumenta a un cierto valor, el corte está dominado por la iniciación y propagación de la grieta de la interfaz fibra-matriz al cortar a lo largo de fibras longitudinales y a través de fibras y la fractura de fibras inducida por flexión al cortar a lo largo de las fibras transversales, que es una ruptura típica quebradiza. Sobre esta base, se ha propuesto un modelo de corte analítico basado en el comportamiento inelástico y la mecánica de fractura de compuestos frágiles

anisotrópicos ortotrópicos, que es útil para comprender la integridad de la superficie en el mecanizado.

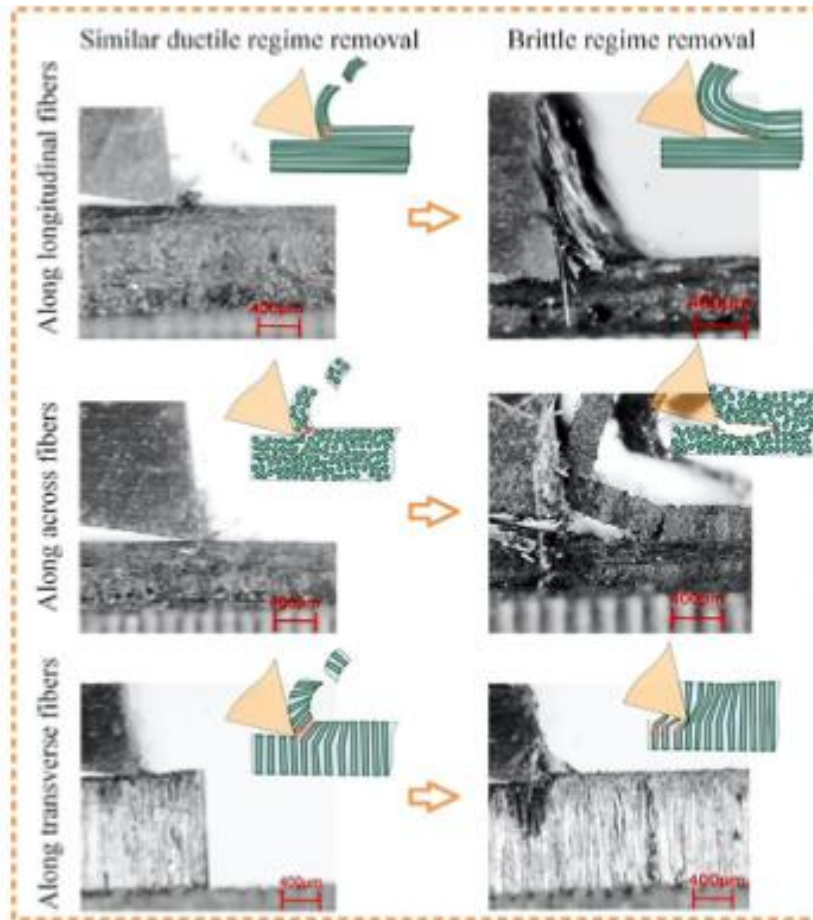


Figura 38. Imágenes de eliminación de material capturadas por una cámara de alta velocidad.

4.8.8. Mecanismo de arranque de material basado en rayado

Para el mecanizado (como el pulido) con abrasivo, a menudo se utilizan experimentos de rayado para estudiar el mecanismo de eliminación de material. Para estudiar las características de trituración de compuestos 2D Cf / SiC en diferentes orientaciones de fibra, (1) llevaron a cabo un único experimento de rayado abrasivo con un penetrador de diamante en una máquina de pulir y analizaron el mecanismo de trituración. Dentro del rango de profundidad de rayado (de 10 µm a

50 μm), la eliminación quebradiza que combina la fractura quebradiza en capas de las fibras de carbono y el agrietamiento de la matriz de SiC fue el mecanismo de eliminación del material. La figura 7 muestra la morfología de rayado de la fibra 0 y la fibra 90 a lo largo del ángulo de rayado de 0 y 45 respectivamente. Se observa el daño por desgarro causado por la flexión y desprendimiento de las fibras de carbono. Diseñaron una nueva prueba de rayado abrasivo único utilizando mecanizado CNC, y llevó a cabo experimentos a lo largo de fibras longitudinales y a lo largo de fibras. Dentro del rango de profundidad de rayado establecido (de 10 μm a 100 μm), la conclusión de que la fractura frágil (que incluye el agrietamiento de la matriz, la rotura de la fibra, la extracción de la fibra y el despegado interfacial de la matriz de la fibra) es el mecanismo principal de eliminación de material en la trituración de Cf. También se obtuvieron compuestos de SiC y la fractura frágil provocó daños graves en su superficie.

Por lo tanto, bajo una gran profundidad de rayado, la fractura frágil, que se compone de aplastamiento de la matriz, desunión de la interfaz fibra-matriz y fractura de fibra (fractura por flexión, fractura por compresión y fractura por cizallamiento), es el mecanismo reconocido de arranque de material.

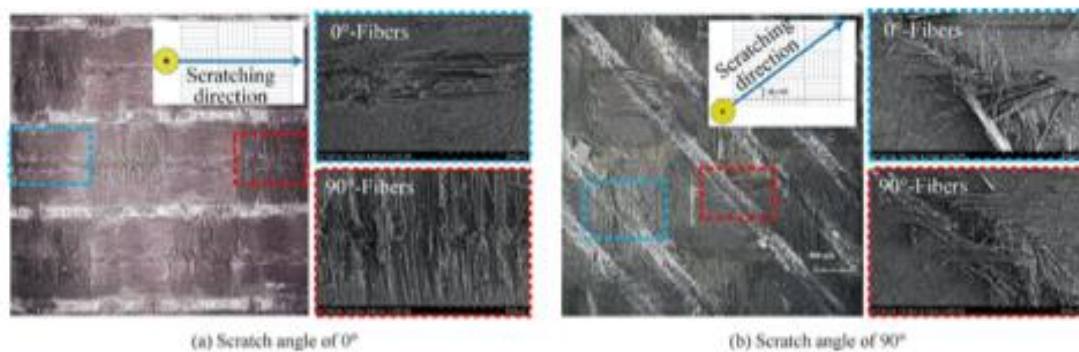


Figura 39. Morfología de scratch.

4.8.9. Propiedades del material a nano/microescala y mecanismo de eliminación.

La interfase de la matriz de fibra-SiC es un componente importante de FRMCs-SiC. El despegado de la interfase débil conduce a la relajación de la tensión en la punta de la grieta, lo que logra el propósito de endurecimiento del material y mejora de la tolerancia al daño. Las interfaces débiles son propensas a daños como el despegado durante el mecanizado, y las fibras libres causadas por el despegado en interfase tienen influencia importante en el mecanismo de eliminación de material mismo. Por lo tanto, vale la pena explorar las propiedades mecánicas interfaciales de los FRMCs-SiC, que proporcionan una base para la investigación del mecanismo de eliminación de material y el modelado de simulación.

Para evaluar las propiedades de la interfase fibra-matriz, las pruebas micromecánicas son medios efectivos, como las pruebas de extracción de una sola fibra, las pruebas de microuniones, las pruebas de expulsión de la fibra y las pruebas de fragmentación de una sola fibra.⁴⁷ Para los compuestos Cf / SiC, usó un indentador de Berkovich para empujar y empujar hacia atrás la fibra de carbono de una muestra de 50–100 μm de espesor en un nanoindentador para probar la resistencia al corte interfacial y el coeficiente de fricción interfacial del carbón pirolítico. La figura 7 muestra la curva de carga-desplazamiento y el diagrama de propagación de grietas interfaciales del proceso típico de extrusión de fibras, que se puede dividir en cuatro etapas: deformación elástica de la fibra de carbono, etapa de empuje hacia adentro (inicio de grietas), etapa de empuje hacia afuera (propagación de grietas) y contacto entre el penetrador y la matriz. En base a esto, se puede calcular la resistencia al cizallamiento interfacial. Además, el coeficiente de fricción interfacial del carbono pirolítico se puede obtener empujando hacia atrás la fibra de carbono desprendida. Este estudio proporciona una base teórica para la simulación numérica de la mecánica interfacial y el análisis del mecanismo de remoción de material en el mecanizado.

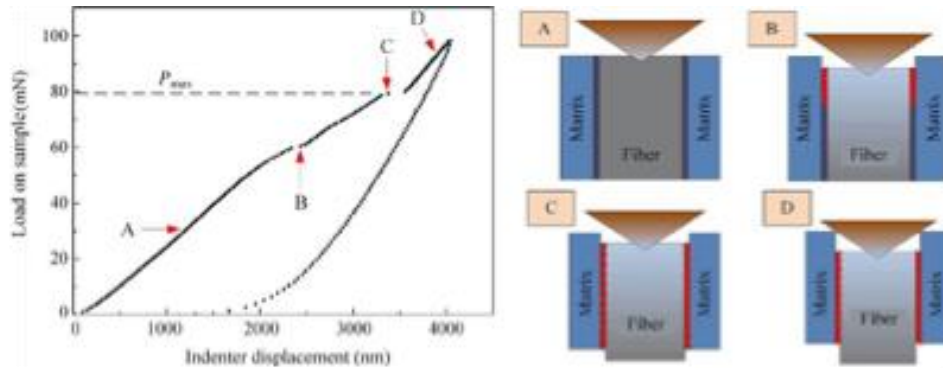


Figura 40. Curva de carga-desplazamiento y diagrama de propagación de grietas interfaciales de la prueba de expulsión de una sola fibra con penetrador de Berkovich [10].

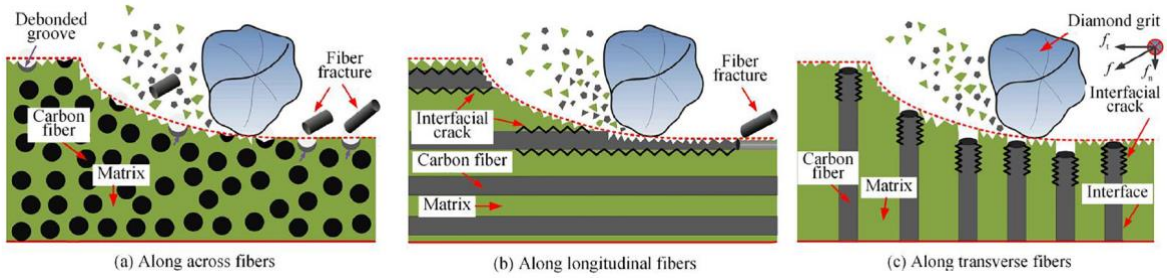


Figura 41. Diagramas esquemáticos de rectificado a lo largo de tres direcciones típicas [10].

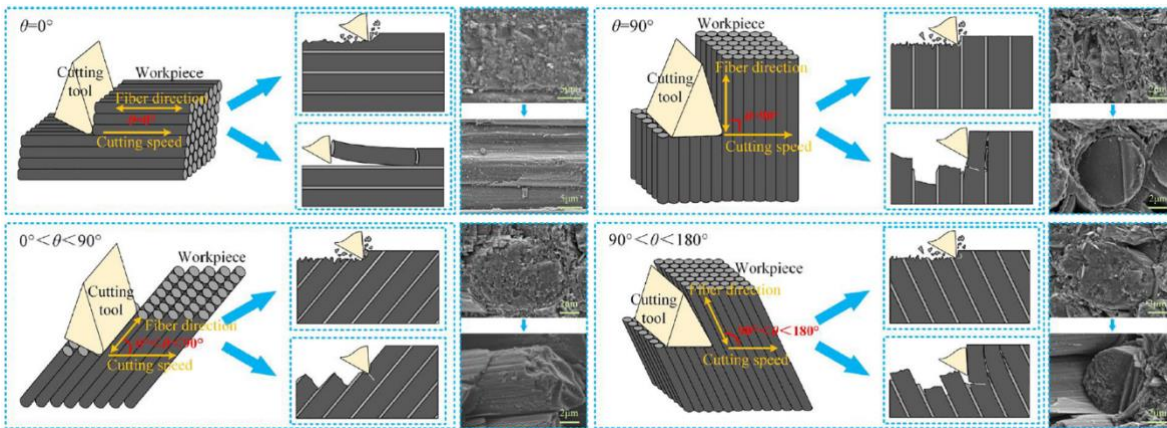
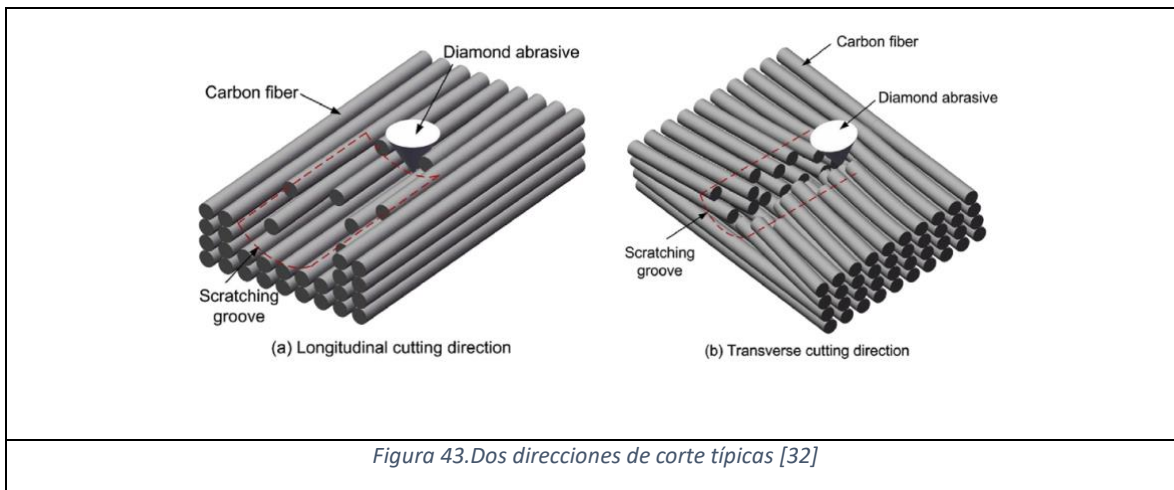


Figura 42. Mecanismo de eliminación de material de las fibras de carbono en el corte de composites Cf / SiC [10].

4.8.10. Rectificado de CMCs

El rectificado se considera a menudo un método de acabado y tiene algunas ventajas en el mecanizado de materiales duros y quebradizos. El rectificado juega un papel insustituible en el mecanizado de piezas de precisión. En el rectificado de compuestos de matriz cerámica reforzada con fibra de carbono, la fuerza de corte, el modo de eliminación de fibras y la calidad de la superficie se han convertido en el foco de atención de los investigadores.

En el estudio de Li³², para dilucidar por completo los mecanismos de eliminación de material en el rectificado de compuestos unidireccionales de Cf/SiC, se utilizó una herramienta de indentación de un solo abrasivo para llevar a cabo experimentos relevantes en dos direcciones de corte típicas, como se muestra en la Fig. X. Con la misma profundidad de corte, encontraron que la fuerza tangencial es en general mayor que la fuerza normal, y las fuerzas de rectificado tanto en la dirección de corte longitudinal como en la dirección de corte transversal muestran imparidad. La fractura frágil juega un papel importante en el arranque de material al rayar los compuestos de Cf/SiC. Ding y al.³³ señaló que la fuerza de rectificado del compuesto Cf/SiC era baja, del 35% al 76% de la fuerza de corte del SiC bajo el mismo parámetro de rectificado.



Algunos autores han analizado el proceso mediante la fórmula empírica de la fuerza de rectificado. Dada la complejidad del proceso de rectificado y la diversificación de la estructura compuesta, es más difícil establecer un modelo matemático de fuerza de rectificado que de fresado. Con base en que el mecanismo de arranque es principalmente una fractura frágil, se propuso las expresiones teóricas de la fuerza de corte para el compuesto 2D Cf/SiC rectificado con una muela de diamante con aglomerante orgánico de la siguiente manera³⁴.

$$F_T = K a_p^{0,75} V_s^{-0,5} V_w^{0,5}$$

$$F_N = K' a_p^{0,75} V_s^{-0,5} V_w^{0,5}$$

donde F_T y F_N son las fuerzas de rectificado tangenciales y normales, respectivamente; K y K' son factores de escala; a_p es la profundidad de rectificado; V_s es la velocidad de la muela y V_w es la velocidad de avance.

A partir de las expresiones teóricas anteriores de la fuerza de rectificado, se obtiene que la influencia máxima en la fuerza de rectificado son la profundidad de rectificado; la velocidad de la muela abrasiva y la velocidad de avance tienen aproximadamente el mismo efecto.

Liu et al.³⁵ han estudiado los mecanismos de formación de la morfología de la superficie rectificada en compuestos de Cf/SiC con una estructura tejida ortogonal bidimensional mediante el uso de una muela de diamante con ligante orgánico y han mostrado que los parámetros de rectificado tenían una influencia significativa en la rugosidad de la superficie. Esa rugosidad aumenta con la velocidad de avance y la profundidad de corte, pero se reduce con el aumento de la velocidad de corte. Debido a la particularidad de la estructura trenzada, el principal mecanismo de formación de la superficie de los compuestos Cf/SiC consiste en una fractura quebradiza en capas de fibra de carbono. La fractura de fibras de los haces de fibras a 0° fue más importante que la de los haces de fibras a 90° . Además, en el

rectificado de compuestos Cf/SiC en tres direcciones típicas por L.F. Zhang et al.³⁶, la orientación de la fibra y los parámetros de rectificado no solo afectan la fuerza de recctificado, sino que también tienen un gran efecto en la topografía de la superficie. Además, la anisotropía del compuesto Cf/SiC fue la razón principal del cambio de la fuerza de rectificado y de la topografía de la superficie en tres direcciones típicas.

La figura X muestra los modos de arranque de fibras después de mecanizar estos compuestos. La velocidad de avance puede tener alguna influencia en la forma de fractura de la fibra. Si la velocidad de avance es grande, la fibra tiene poco tiempo para ser eliminada normalmente, lo que resulta en un fenómeno de fractura por extrusión de la fibra. Al rectificar diferentes compuestos de Cf/SiC de estructura tejida, la influencia de los parámetros de rectificado en el proceso de mecanizado es ligeramente diferente. Tanto las fibras de carbono como la matriz de SiC se eliminan en forma de fractura frágil. La eliminación de la fibra de carbono muestra una fractura laminar y se extrae, lo que no está sincronizado con la eliminación de la matriz de SiC. Como resultado, el valor de rugosidad de la superficie mecanizada del compuesto Cf/SiC es mayor que el del SiC con los mismos parámetros de rectificado³⁷.

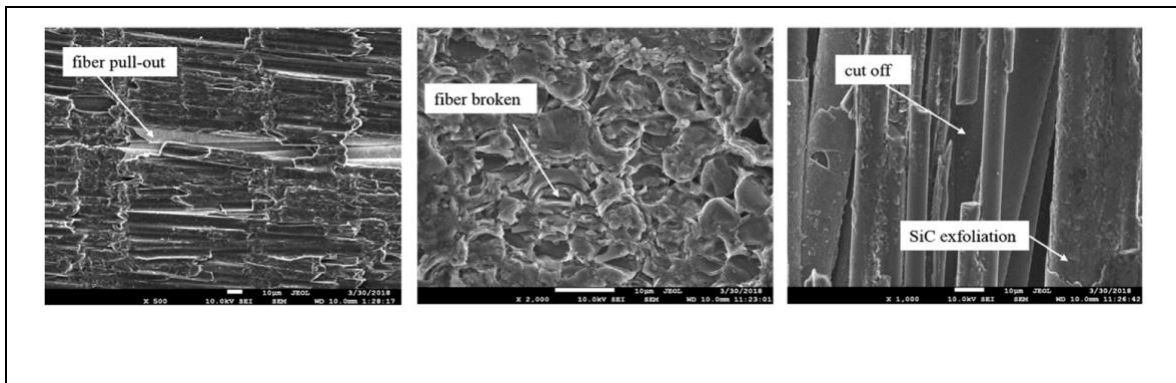


Figura 44.Principales defectos superficiales durante el rectificado de composites Cf/SiC [38].

El estudio del rectificado del compuesto de matriz cerámica concierne también la maquinabilidad de nuevas herramientas de corte. Por ejemplo, se han empleado

muelas de óxido de aluminio blanco (WA) y muelas de diamante vitrificadas porosas para mecanizar el compuesto Cf/C– SiC³⁹. La muela de diamante mostró un mejor rendimiento de mecanizado que la muela WA. Se han desarrollado también muelas segmentadas de nuevo diseño⁴⁰, y los resultados mostraron que puede reducir las fuerzas de rectificado, el desgaste de la muela y aumentar la tasa de arranque de material (MRR).

4.8.11. Daño al material

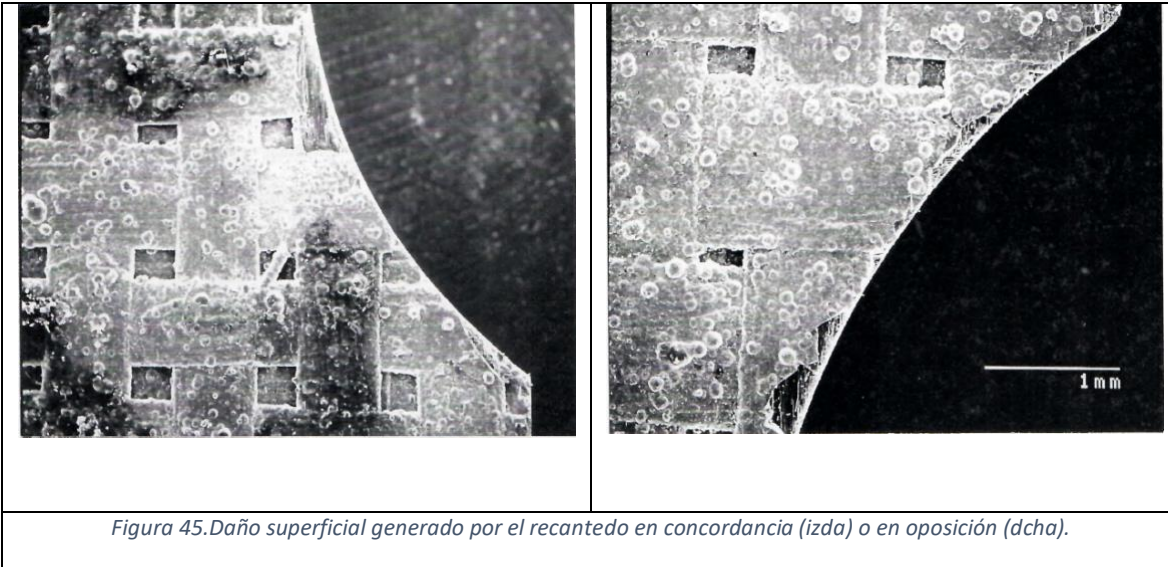
Danglot ha demostrado que el método de mecanizado, en concordancia o en oposición, influye en el daño al material, sobre todo en salida con la generación de un astillado importante. Usualmente, se mecaniza en ambos sentidos de manera indiferente, considerando que el mecanizado es similar al rectificado.

En pruebas mediante mecanizado en concordancia y en oposición (fig. 30) donde se ha detenido la herramienta muestran, en el primer caso, un mecanizado sin daño cuando en el otro caso, se genera un astillado en toda la zona en contacto con la herramienta (fig. 30 y 31).

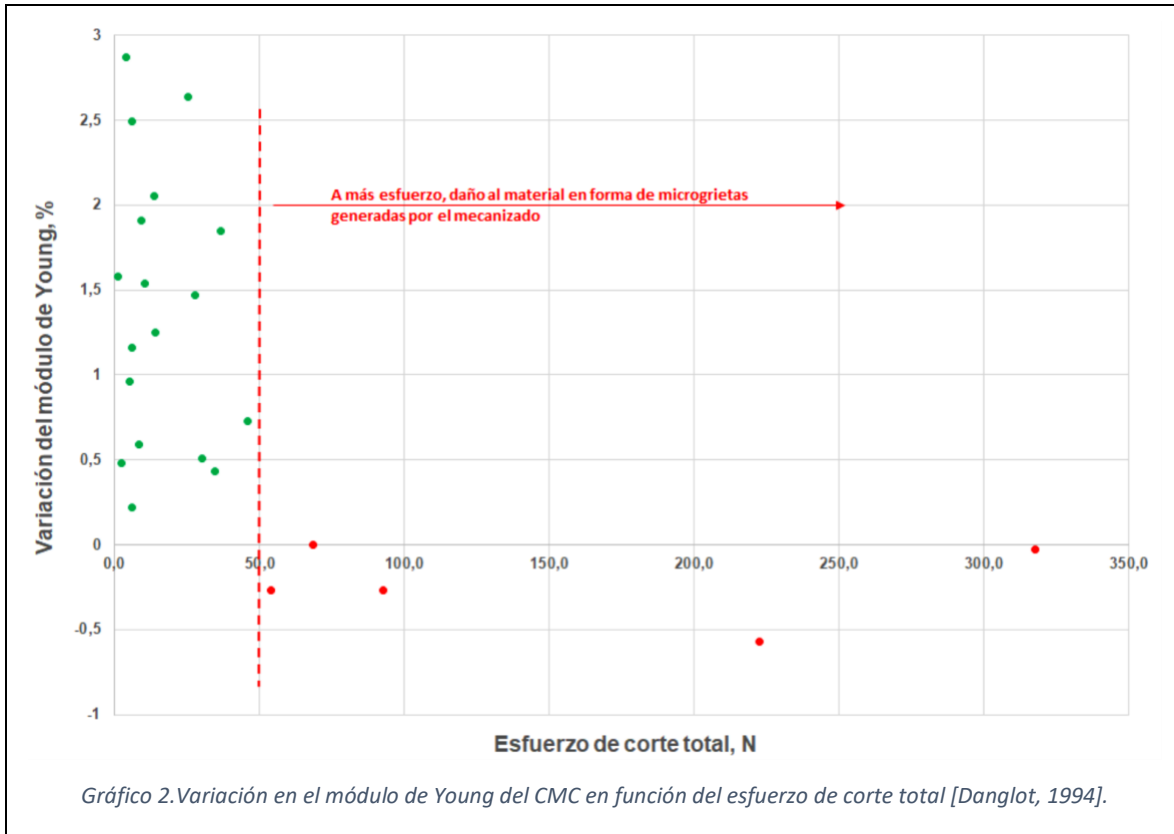
Este fenómeno de daño a la salida de la herramienta, diferente según la dirección de recantado, tiene probablemente dos orígenes distintos. En primer lugar, los volúmenes de viruta producidos y el diámetro de la muela utilizada tienen poca relación con el rectificado convencional. Entonces, la formación de la viruta es diferente entre el mecanizado en concordancia y en oposición.

En el mecanizado en concordancia, la dimensión de la viruta es máxima en el ataque de la herramienta y cero en su salida. En mecanizado en oposición ese esfuerzo es máximo en la salida. Por lo cual daña al material provocando este astillado.

³⁹ T. Tashiro, J. Fujiwara, Y. Takenaka, *Grinding of C/C-SiC Composite in Dry Method*, Springer, London, 2007, pp. 351–352.



Danglot, además, demostró que se genera un daño en forma de microgrietas superficiales en el espesor de la zona mecanizada, daño que modifica las propiedades del material, en particular su módulo de Young E . A partir de un esfuerzo de corte total superior a 50 N, el módulo de Young del material mecanizado disminuye cuando para esfuerzos inferiores a ese valor, incluso mejora en comparación con las probetas de referencia (fig. 32).



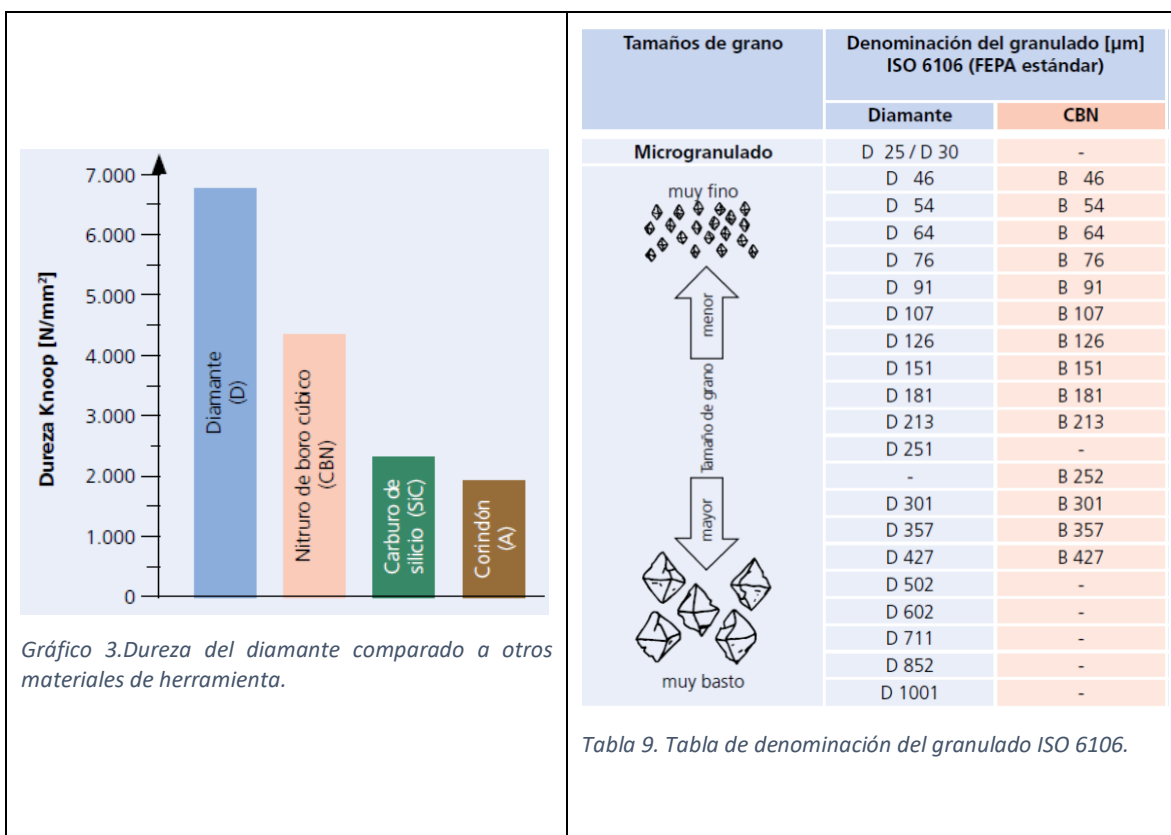
4.9. Herramientas abrasivas, proveedores y coste

Se ha limitado la búsqueda en proveedores de la zona norte de España y si es posible de la Comunidad Autónoma del País Vasco.

Los abrasivos de diamante y de CBN se utilizan cuando los materiales no se pueden mecanizar con abrasivos convencionales como corindón o carburo de silicio. Para muchas aplicaciones supone la solución más económica. El diamante y CBN forman el grupo de los abrasivos más duros.

El diamante es la materia prima sólida más dura que existe. Está compuesto de carbono puro con estructura cristalina. El diamante para herramientas abrasivas suele fabricarse sintéticamente a temperaturas muy altas y elevada presión. Las propiedades del tipo de abrasivo pueden optimizarse para posteriores aplicaciones de la herramienta.

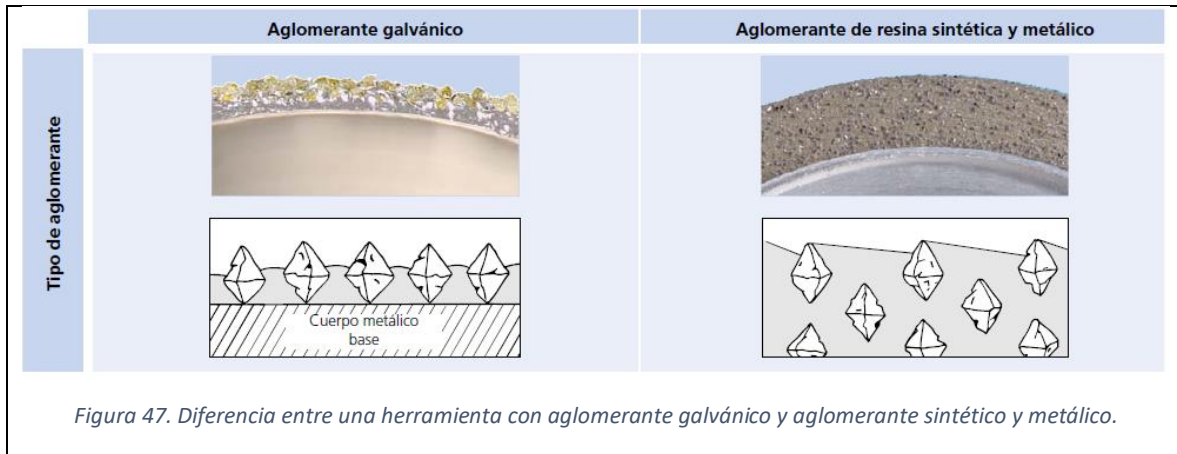
El CBN (nitruro de boro cúbico) es el segundo material más duro. Está compuesto de boro y nitrógeno con estructura cristalina. Las herramientas de diamante y CBN resultan una alternativa muy rentable, a la hora de mecanizar determinados materiales, en comparación con las herramientas compuestas de abrasivos convencionales como corindón o carburo de silicio. El grano de diamante y CBN es considerablemente más duro y sus cantos de corte resultan mucho más resistentes contra el desgaste. Además, las herramientas de diamante y CBN tienen una vida útil considerablemente más larga.



Los tamaños de grano de las herramientas de diamante y CBN se refieren al diámetro medio del grano en [µm]. Así, cuanto mayor es el número, más basto es el grano. Un grano más basto conlleva un mayor arranque de material y una mayor rugosidad de la superficie. El tamaño de grano óptimo depende de la aplicación, del material a mecanizar, de la máquina a utilizar y de otros muchos factores. Por norma general puede afirmarse que cuanto más duro sea el material para mecanizar o mas

fino el acabado de la superficie a conseguir, menor deberá ser el grano elegido.

Existen dos posibilidades para la realización de la herramienta: las herramientas con ligante o aglomerante galvánico o electrolítico y las herramientas de concreción con aglomerante de resina sintética o metálico.



La característica principal de las herramientas con aglomerante galvánico es una única capa de abrasivo de diamante o grano CBN. Se denomina capa de abrasivo la fijación de granos abrasivos sobre un cuerpo metálico base mediante una capa de níquel aplicada electroquímicamente. La capa de níquel equivale aproximadamente a la mitad del diámetro del grano utilizado (incrustación al 50% o N), aunque ese espesor se puede disminuir (incrustación al 30% o D) o aumentar (incrustación al 75% o S). Las ventajas de ese tipo de aglomerante son:

- Menor tiempo de mecanizado por el tipo de aglomerante
- Reducción de tiempos improductivos, ya que no es preciso igualar ni perfilar
- Reducción en el coste de la herramienta por la capa única y la posibilidad de la renovación de recubrimiento
- Perfil de herramientas individuales
- Geometría de la herramienta constante por su recubrimiento monocapa

Las herramientas con aglomerante galvánico solucionan muchos problemas en el mecanizado de distintos materiales, p. ej. Materias especialmente duras o abrasivas. Las características de las herramientas con aglomerante galvánico

pueden variar según la aplicación, entre otras cosas, por la elección del tamaño de grano. Las herramientas de diamante y CBN con aglomerante galvánico pueden usarse tanto para mecanizado seco como húmedo.

El recubrimiento abrasivo de las herramientas de aglomerante de resina sintética de diamante y CBN consta de grano abrasivo, aglomerante y aditivos. El aglomerante va firmemente prensado, es decir, no es poroso.

El aglomerante de resina sintética está estrechamente relacionado con el aglomerante metálico. En comparación con el aglomerante de resina sintética, se caracteriza por la mayor resistencia del grano y de perfil.

Aglomerante de resina sintética:

- Las características de recubrimiento del aglomerante de resina sintética se adaptan de forma óptima al tipo de mecanizado
- Fáciles de rectificar

Aglomerante metálico:

- Alta estabilidad y resistencia al desgaste

Los discos de amolar con aglomerante de resina sintética de diamante y CBN suelen utilizarse para desbastar, es decir, afilar herramientas de metal duro o HSS y otros trabajos de rectificado.

Las herramientas con aglomerante metálico se utilizan para el amolado de vidrio y cerámica industrial.

Las herramientas de diamante y CBN con aglomerante de resina sintética y de metal pueden usarse tanto para el amolado seco como húmedo en función de la especificación.

Los rangos de velocidades de corte dependen de cada aplicación y nunca deben sobrepasar la velocidad periférica máxima permitida. Las diferentes tareas y ámbitos de aplicación de las herramientas de diamante y CBN con aglomerante galvánico, así como la gran importancia que cobra la máquina utilizada, no permite establecer unas velocidades de corte con carácter general. Los niveles de velocidades de corte recomendados aquí solo sirven como valores orientativos.

Por norma general puede afirmarse:

- Las herramientas de diamante para amolado seco nunca deben utilizarse con una velocidad de corte excesiva para no dañar térmicamente el abrasivo.
- A ser posible, las herramientas CBN no deben utilizarse por debajo de las velocidades de corte indicadas. La velocidad de corte óptima tiene un efecto directo sobre la rentabilidad de las herramientas en uso.
- Deben coordinarse entre sí siempre todos los parámetros dentro del proceso abrasivo. Si se modifica la velocidad de corte deben adaptarse también el avance y la alimentación del refrigerante, entre otros.
- Las herramientas de diamante y CBN con aglomerante galvánico pueden utilizarse para aplicaciones estacionarias convenientemente dimensionadas hasta una velocidad periférica de 125 m/s.

Velocidad de corte [m/s] ▶		5	10	15	20	25	30	35	40	45	...	80
Aglomerante galvánico	Diamante	Amolado seco	8-18 m/s				30-80 m/s para PRFV/PRFC, así como fundición gris y fundición nodular					
		Amolado húmedo			15-25 m/s							
	CBN	Amolado seco			15-25 m/s							
		Amolado húmedo					20-40 m/s					
Aglomerante de resina sintética	Diamante	Amolado seco			15-20 m/s							
		Amolado húmedo					20-30 m/s					
	CBN	Amolado seco			18-30 m/s							
		Amolado húmedo					25-40 m/s					
Aglomerante metálico	Diamante	Amolado seco	10-15 m/s									
		Amolado húmedo			15-30 m/s							
	CBN	Amolado húmedo					25-30 m/s					

Tabla 10. Velocidades de corte recomendadas para herramientas de diamante y CBN.

ø de la Hta. [mm]	Velocidad de corte [m/s]											
	8	12	15	18	20	25	30	40	50	80	100	125
Número de revoluciones redondeado [r.p.m.]												
1	153.000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	76.400	115.000	143.000	172.000	191.000	-	-	-	-	-	-	-
3	50.900	76.400	95.500	115.000	127.000	159.000	191.000	-	-	-	-	-
4	38.200	57.300	71.600	85.900	95.500	119.000	143.000	-	-	-	-	-
5	30.600	45.800	57.300	68.800	76.400	95.500	115.000	153.000	-	-	-	-
6	25.500	38.200	47.700	57.300	63.700	79.600	95.500	127.000	159.000	-	-	-
7	21.800	32.700	40.900	49.100	54.600	68.200	81.900	109.000	136.000	-	-	-
8	19.100	28.600	35.800	43.000	47.700	59.700	71.600	95.500	119.000	191.000	-	-
9	17.000	25.500	31.800	38.200	42.400	53.100	63.700	84.900	106.000	170.000	-	-
10	15.300	22.900	28.600	34.400	38.200	47.700	57.300	76.400	95.500	153.000	191.000	-
12	12.700	19.100	23.900	28.600	31.800	39.800	47.700	63.700	79.600	127.000	159.000	199.000
14	10.900	16.400	20.500	24.600	27.300	34.100	40.900	54.600	68.200	109.000	136.000	171.000
15	10.200	15.300	19.100	22.900	25.500	31.800	38.200	50.900	63.700	102.000	127.000	159.000
16	9.500	14.300	17.900	21.500	23.900	29.800	35.800	47.700	59.700	95.500	119.000	149.000
18	8.500	12.700	15.900	19.100	21.200	26.500	31.800	42.400	53.100	84.900	106.000	133.000
20	7.600	11.500	14.300	17.200	19.100	23.900	28.600	38.200	47.700	76.400	95.500	119.000
22	6.900	10.400	13.000	15.600	17.400	21.700	26.000	34.700	43.400	69.400	86.800	109.000
25	6.100	9.200	11.500	13.800	15.300	19.100	22.900	30.600	38.200	61.100	76.400	95.500
30	5.100	7.600	9.500	11.500	12.700	15.900	19.100	25.500	31.800	50.900	63.700	79.600
40	3.800	5.700	7.200	8.600	9.500	11.900	14.300	19.100	23.900	38.200	47.700	59.700
50	3.100	4.600	5.700	6.900	7.600	9.500	11.500	15.300	19.100	30.600	38.200	47.700
75	2.000	3.100	3.800	4.600	5.100	6.400	7.600	10.200	12.700	20.400	25.500	31.800
100	1.530	2.300	2.900	3.400	3.800	4.800	5.700	7.600	9.500	15.300	19.100	23.900
125	1.220	1.830	2.300	2.800	3.100	3.800	4.600	6.100	7.600	12.200	15.300	19.100
150	1.020	1.530	1.910	2.300	2.500	3.200	3.800	5.100	6.400	10.200	12.700	15.900
175	870	1.310	1.640	1.960	2.200	2.700	3.300	4.400	5.500	8.700	10.900	13.600
200	760	1.150	1.430	1.720	1.910	2.400	2.900	3.800	4.800	7.600	9.500	11.900
230	660	1.000	1.250	1.490	1.660	2.100	2.500	3.300	4.200	6.600	8.300	10.400
250	610	920	1.150	1.380	1.530	1.910	2.300	3.100	3.800	6.100	7.600	9.500
300	510	760	950	1.150	1.270	1.590	1.910	2.500	3.200	5.100	6.400	8.000
350	440	650	820	980	1.090	1.360	1.640	2.200	2.700	4.400	5.500	6.800
400	380	570	720	860	950	1.190	1.430	1.910	2.400	3.800	4.800	6.000
450	340	510	640	760	850	1.060	1.270	1.700	2.100	3.400	4.200	5.300
500	310	460	570	690	760	950	1.150	1.530	1.910	3.100	3.800	4.800
600	250	380	480	570	640	800	950	1.270	1.590	2.500	3.200	4.000

Tabla 11. Rango de revoluciones recomendado para herramientas de diamante y CBN.

4.9.1. ETORKI

ETORKI es una empresa moderna, localizada en Zamudio (Bizkaia) y especializada en la comercialización y aplicación de una amplia gama de muelas y herramientas de diamante y CBN para:

- fabricación y afilado de herramientas de metal duro y acero rápido;

- rectificado y pulido de piezas de metal duro, aceros termoresistentes, aleados e inoxidables, vidrio, cerámica, silicio, materiales refractarios, piedras preciosas y otros materiales;
- corte de productos de metal duro, vidrio, mármol, granito, cuarzo, cerámica;
- perforación de productos de vidrio.

Las muelas PREMIUM están diseñadas para rectificadoras, rectificadoras universales y centros CNC de Vollmer, Walter, Anca, Michael Deckel y otros.

Las ventajas de las herramientas de diamante y CBN frente a las herramientas abrasivas convencionales (SiC o Al₂O₃) son:

- Alta resistencia al desgaste
- Aumento de la vida de la herramienta después de afilar con muela diamantada en 1,2 - 2,5 veces
- Disminución de daños por stress térmico, al generarse menor temperatura en la zona de trabajo
- Aumento del tiempo de funcionamiento del equipo sin ajustes debido a la mayor vida útil de las herramientas de diamante y CBN
- Mayores volúmenes de producción manteniendo el nivel de calidad.

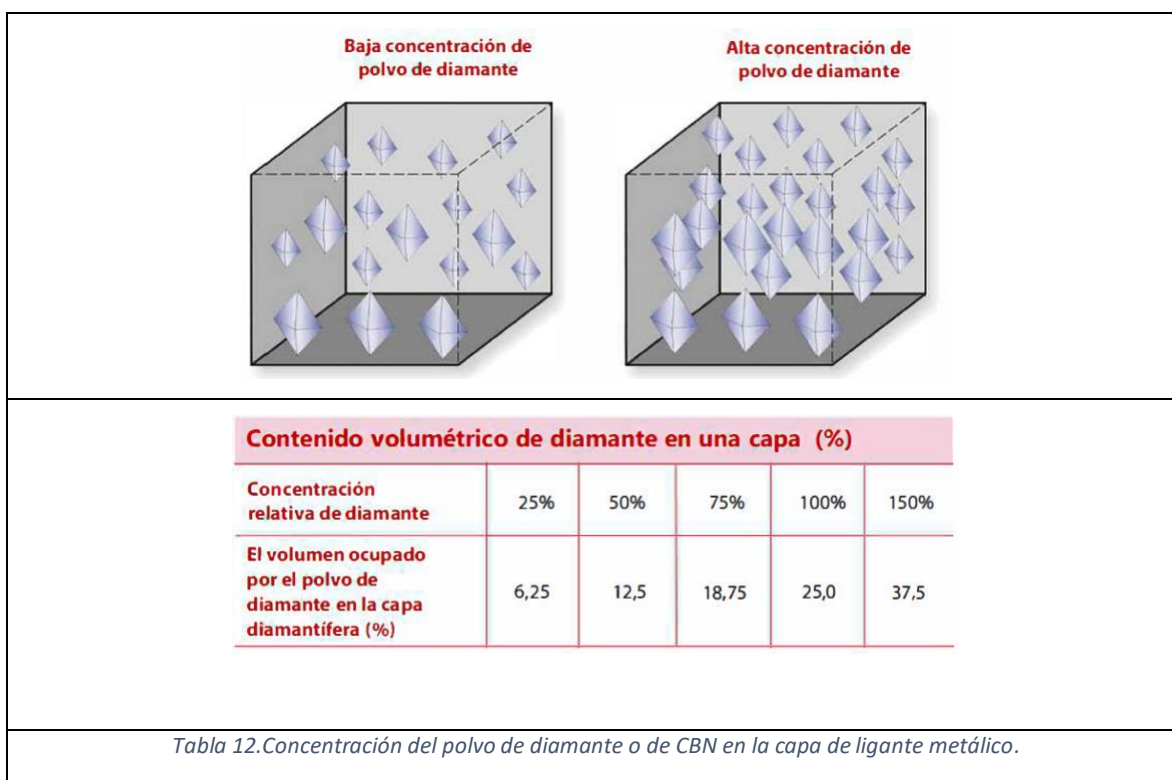
La concentración del polvo de diamante es el contenido de peso de los diamantes en un volumen unitario de la capa de diamante. La concentración relativa del diamante es una de las características más importantes de una herramienta de diamante, determinando su capacidad de corte, rendimiento, la vida útil y el costo. La selección de concentración depende del tipo de herramienta, de la forma y de las dimensiones de la superficie de trabajo, de la granulometría del polvo de diamante, de la resistencia al desgaste, del aglutinante y de las condiciones de la aplicación. Cuando se elige la concentración óptima de diamante en la capa de diamante, se aplica la regla siguiente:

- Con una pequeña superficie de contacto entre la muela abrasiva y la pieza de trabajo, por ejemplo, en rectificado circular, se debe seleccionar una alta concentración de diamante. Gracias a esto, se garantiza la resistencia al desgaste de la herramienta, incluso bajo cargas elevadas.

- Una superficie de contacto grande requiere medidas para reducir la temperatura de rectificado y reducir el esfuerzo de rectificado. En este caso, se debe usar una baja concentración de diamante.

Las muelas se fabrican con una concentración relativa de 25%, 50%, 75%, 100% y del 150% (existe la posibilidad de fabricar las muelas con otra concentración relativa (de acuerdo con el cliente).

Es preferible el rectificado con refrigerante porque la muela está menos expuesta al desgaste y es posible su uso en condiciones más exigentes y, por lo tanto, mejorar el rendimiento del rectificado. Además, la probabilidad de daño térmico a la pieza se reduce, es decir, la aparición de quemaduras en la misma.



4.9.2. PFERD

PFERD es la marca líder para el desarrollo, fabricación y asesoramiento, así como para la distribución de soluciones de herramientas para el tratamiento de superficies y el corte de materiales. Con más de 200 años de tradición, PFERD es una empresa familiar independiente, localizada en Vitoria, con proyección internacional. Las herramientas PFERD ofrecen al usuario el máximo rendimiento y la mejor rentabilidad. Su compromiso incondicional con la máxima calidad, su fiabilidad como proveedor y su manejo responsable de los recursos convierten a PFERD en un socio seguro y fiable a largo plazo. Todo el equipo humano de PFERD contribuye a posicionar PFERD como una marca de reconocida calidad a nivel internacional.

La empresa propone las siguientes herramientas.

4.10. Conclusiones sobre el estado del arte

- Mecanizado abrasivo posible con pasadas hasta 5 mm (Deep grinding)
- Herramientas tipo muela abrasiva son una solución sencilla y barata
- Las fuerzas disminuyen con la velocidad de giro o velocidad de corte. A partir de 12 m/s se minimizan las fuerzas cual sea la pasada radial.
- El daño depende en gran parte de la velocidad de avance y de la pasada radial.
- El recantado en concordancia parece dañar menos el material que en oposición.
- Los mecanismos de corte ...
- De los diferentes proveedores de material, SGL Carbon aparece como una buena solución para materiales de tipo Cf/SiC, con precios muy asequibles.
- Para los materiales de tipo SiCf/SiC, hay dificultad de suministro. Se está hablando con SAFRAN Ceramics para conseguir material.
- Fabricantes de herramientas locales han propuesto herramientas tipo muelas abrasivas con características interesantes y precios asequibles.
- Los materiales cerámicos de alta temperatura son cruciales para las aplicaciones aeroespaciales debido a sus propiedades únicas. Las cerámicas avanzadas poseen capacidades de alta temperatura o temperatura ultra alta,

resistencia a la ruptura por fluencia de baja densidad y alta temperatura, ya que tenemos una excelente resistencia a la oxidación y la corrosión. Los materiales estructurales de cerámica de ingeniería continúan siendo un enfoque principal para las aplicaciones estructurales avanzadas de motores de propulsión y vehículos aéreos debido a las necesidades cada vez mayores de eficiencia y operaciones de mayor temperatura.

Para el estudio previo, parece interesante poder:

- Comprar material a SGL Carbon, de tipo SIGRASIC MF (fibra molida), SF (fibra corta) y LF (fibra continua).
- Comprar herramientas a PFERD y ETORKI.
- Realizar ensayos previos con los parámetros siguientes:
 - $2 \text{ m/s} \leq V_c \leq 20 \text{ m/s}$
 - $100 \text{ mm/min} \leq V_w \leq 1000 \text{ mm/min}$
 - $0,5 \text{ mm} \leq a_e \leq 2,5 \text{ mm}$
 - ap constant e igual al espesor de las placas (6,5 mm)
 - recantado húmedo y en concordancia
- El mecanismo de eliminación de material de CMC (Compuesto de matriz cerámica) en el mecanizado se puede resumir ampliamente como fractura frágil (incluida la trituración de la matriz, el despegado interfacial, la fractura de la fibra). Además, vale la pena subdividir el mecanismo de fractura frágil de la fibra en fractura frágil a nanoescala y fractura frágil a microescala. La débil interfaz fibra-matriz es beneficiosa para mejorar la tenacidad del material, pero es un desafío evitar defectos de interfaz durante el mecanizado. Una exploración en profundidad del mecanismo de eliminación de material puede facilitar la comprensión de los mecanismos de generación de superficies mecanizadas y proporcionar ideas para evitar defectos de mecanizado.

- Teniendo en cuenta el entorno de servicio extremo, la calidad de mecanizado de las piezas de CMC es la más preocupada en el mecanizado. Los efectos de los parámetros de mecanizado, las propiedades del material (orientación de la fibra, dirección de mecanizado, densidad del material) y los parámetros de la herramienta sobre la rugosidad se discuten ampliamente. Además, una gran variedad de defectos de mecanizado es una característica importante del mecanizado de CMC. Se observan fracturas de fibras (cortadas, aplastadas, arrancadas, afloramientos), roturas de fibras (daños en las fibras), ranuras y rotura de la matriz, espalación de la matriz de SiC, grietas de la matriz, desunión interfacial, separación de la capa trenzada y bifurcación del hilo y también hay desportilladuras, rebabas y desgarros en el borde estructural. Debido a que la influencia de la tensión residual de la superficie mecanizada en el rendimiento de servicio de las piezas de CMC no está clara, existen pocas investigaciones relacionadas.

5. METODOLOGÍA

En esta parte del trabajo detallaremos como es desarrollo de este, en búsqueda de encontrar los mejores resultados para la experimentación y encontrar el tema de investigación. El desarrollo del proyecto se hará en las maquinas presentes en la Universidad del País Vasco, en la sede de Ingenieros en la ciudad de Bilbao. La experimentación consiente en mecanizar una fibra de carbono reforzado con carburo de silicio con una herramienta de desbaste como es una muela de diamante. A continuación, detallare el procedimiento de cómo se hará la experiencia.

5.1 Material seleccionado

Por motivos de rapidez de suministro y de presupuesto, se ha seleccionado a la empresa SGL CARBON GmbH (Alemania). Se han pedido 10 placas de 100 x 100 x 6,5 mm³ de cada uno de los 3 materiales SIGRASIC: SIGRASIC-MF (fibras molidas) con un comportamiento dominado por la matriz de SiC; SIGRASIC-LF (fibras continuas) con un comportamiento dominado por las fibras; SIGRASIC-SF (fibras cortas) con un comportamiento intermedio. Debido al poco tiempo restante para realizar los ensayos, el mecanizado se ha realizado sobre el material SIGRASIC-LF, y poder asi comparar con resultados de la literatura (en particular los de Danglot sobre SEPCARB-INOX muy parecido al SIGRASIC-LF).

5.2 Herramienta seleccionada y condicionada por la limitación de la máquina A6 (15.000 rpm)

Después de haber seleccionar el material, una parte fundamental del proceso es la herramienta, y al igual que el material, debido a la demanda actual de herramientas tomamos la decisión, de adquirir la herramienta diamantada de debaste, pero

hemos tomado como consideración el hecho de que las herramientas puedan alcanzar altas velocidades de mecanizado.

Por razones de rapidez de suministro de han pedido muelas y discos diamantados a la empresa PFERD, detalladas en el capítulo anterior con diámetros de 15, 25 para las muelas y de 30 mm para los discos, pero de características comunes en cuanto a tamaño del diamante o de CBN (125 µm) y concentración.

Herramienta	Tipo	Vc	Avance	Pasada
DZY-N 15,0-10/10 D126	Diamante 106-125 µm	15-25 m/s húmedo	0,01-0,05 mm/rev	≤ 6 mm
DZY-N 25,0 10/12 D126	Diamante 106-125 µm	15-25 m/s húmedo	0,01-0,05 mm/rev	≤ 6 mm
BZY-N 15,0 10/10 B126	Nitruro de boro cúbico 106-125 µm	20-40 m/s húmedo	0,01-0,05 mm/rev	≤ 6 mm

Tabla 13. Características de las herramientas a utilizar.

El centro de mecanizado utilizado para los ensayos es una máquina KONDIA A6 de eje vertical, de mesa móvil, con una capacidad de giro del husillo de 15000 rpm. Se utilizará una lubricación externa a base de taladrina.

Herramienta	Diámetro (mm)	Velocidad de corte m/s								Velocidad recomendada (m/s)
		2	7	12	17	22	27	32	37	
Muela Diamante Ø 15mm	15	2546	8913	15279	21645	28011	34377	40744	47110	15-25 m/s en humedo
Muela Diamante Ø 25mm	25	1528	5348	9167	12987	16807	20626	24446	28266	15-25 m/s en humedo
Muela CBN Ø 15mm	15	2546	8913	15279	21645	28011	34377	40744	47110	20-40 m/s en humedo
Disco Diamante Ø 30mm	30	1273	4456	7639	10823	14006	17189	20372	23555	15-25 m/s en humedo
Disco CBN Ø 30mm	30	1273	4456	7639	10823	14006	17189	20372	23555	20-40 m/s en humedo
Velocidad de avance Vw mm/rev		100								
Avance mm/rev		0,039	0,011	0,007	0,005	0,004	0,003	0,002	0,002	
		0,065	0,019	0,011	0,008	0,006	0,005	0,004	0,004	
		0,039	0,011	0,007	0,005	0,004	0,003	0,002	0,002	
		0,079	0,022	0,013	0,009	0,007	0,006	0,005	0,004	
		0,079	0,022	0,013	0,009	0,007	0,006	0,005	0,004	
Velocidad de avance Vw mm/rev		500								
Avance mm/rev		0,196	0,056	0,033	0,023	0,018	0,015	0,012	0,011	
		0,327	0,093	0,055	0,038	0,030	0,024	0,020	0,018	
		0,196	0,056	0,033	0,023	0,018	0,015	0,012	0,011	
		0,393	0,112	0,065	0,046	0,036	0,029	0,025	0,021	
		0,393	0,112	0,065	0,046	0,036	0,029	0,025	0,021	
Velocidad de avance Vw mm/rev		1000								
Avance mm/rev		0,393	0,112	0,065	0,046	0,036	0,029	0,025	0,021	
		0,654	0,187	0,109	0,077	0,059	0,048	0,041	0,035	
		0,393	0,112	0,065	0,046	0,036	0,029	0,025	0,021	
		0,785	0,224	0,131	0,092	0,071	0,058	0,049	0,042	
		0,785	0,224	0,131	0,092	0,071	0,058	0,049	0,042	

Tabla 14. Esquema de ensayos a realizar.

Los discos diamantados necesitan de un portaherramientas que hay que equilibrar, por lo cual la solución más sencilla para estos ensayos previos es el uso de las muelas diamantadas.

La muela de diámetro 25 mm es la que tiene mayor rango de velocidades por lo cual es la que utilizaremos.

5.3 Diseño de Experimentos

Para estos ensayos previos, se ha elegido trabajar con la herramienta de diámetro 25 mm con granos de diamante por ofrecer una gama de velocidad de corte en húmedo compatible con las limitaciones de la máquina utilizada (15000 rpm, pero limitado a 13000 rpm en nuestro caso).

Para poder comparar con otros trabajos de investigación, la velocidad de corte será de 2, 7, 12 y 17 m/s. De la misma, la velocidad de avance será de 100, 500 y 1000 mm/min.

Se trabajará con una pasada axial constante, correspondiente al espesor de nuestro material compuesto (6,5 mm) y una pasada radial fija de 1 mm excepto para un ensayo donde se aumentará hasta 2,5 mm.

Por razones de tiempo para hacer los ensayos, se limitan los ensayos previos a un solo material, en este caso el SIGRASIC-LF, con fibras continuas de carbono.

Ref.	Herramienta	Vc (m/s) / N (rpm)	Avance (mm/min)	Pasada (mm)
1	DZY-N 25,0 10/12 D126	2 / 1529	100	1
2		7 / 5350	100	1
3		12 / 9172	100	1
4		17 / 12994	100	1
5		17 / 12994	500	1
6		12 / 9172	500	1
7		7 / 5350	500	1
8		2 / 1529	500	1
9		17 / 12994	1000	1
10		12 / 9172	1000	1
11		17 / 12994	100	2,5
12		7 / 5350	1000	1

Tabla 15. Parámetros de mecanizado para los ensayos.

5.4 Posicionamiento del material y medidas de fuerzas

En la parte de mecanizado utilizaremos una mesa dinamométrica Kistler, para analizar los esfuerzos en las tres componentes de forma ortogonal, este elemento de gran rigidez y sobre todo debido a su rigidez nos dará una alta frecuencia natural, con ello nos dará una resolución capaz de ver pequeños cambios dinámicos y de esta manera poder determinar con gran calidad las fuerzas medidas, ya que toma todo el espectro de medición. El dinamómetro que se utilizará se muestra a continuación.

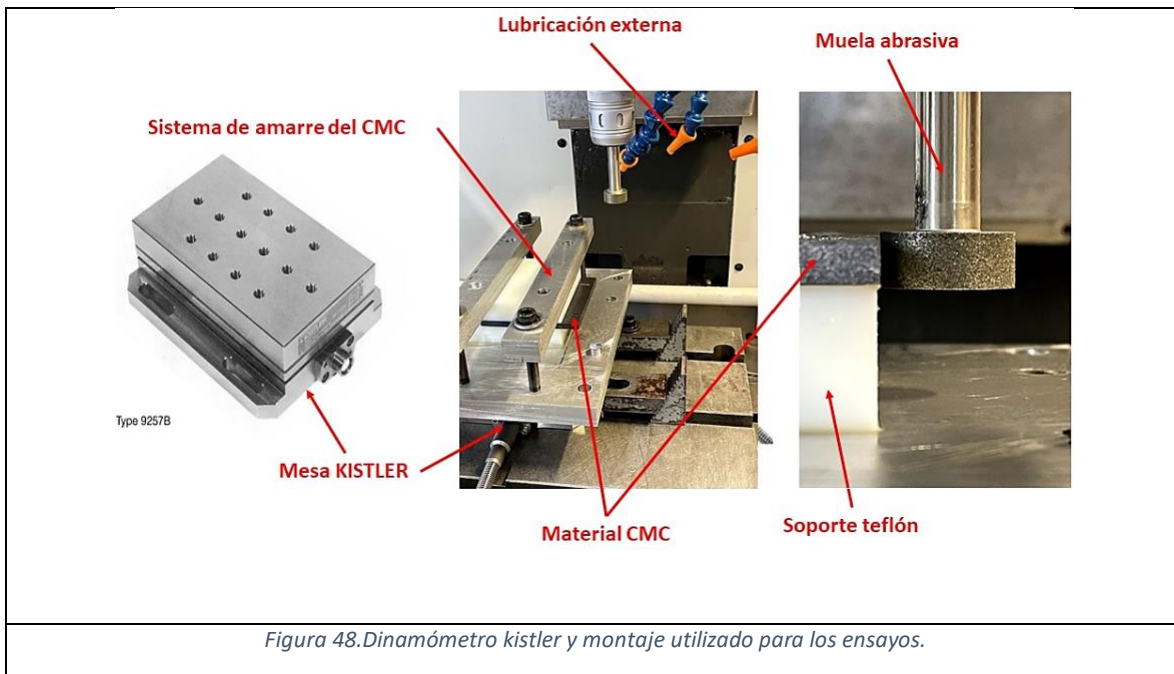


Figura 48. Dinamómetro kistler y montaje utilizado para los ensayos.

En la parte del mecanizado, el material será mecanizado en concordancia, según los resultados del estudio de Danglot [Danglot, 1994].

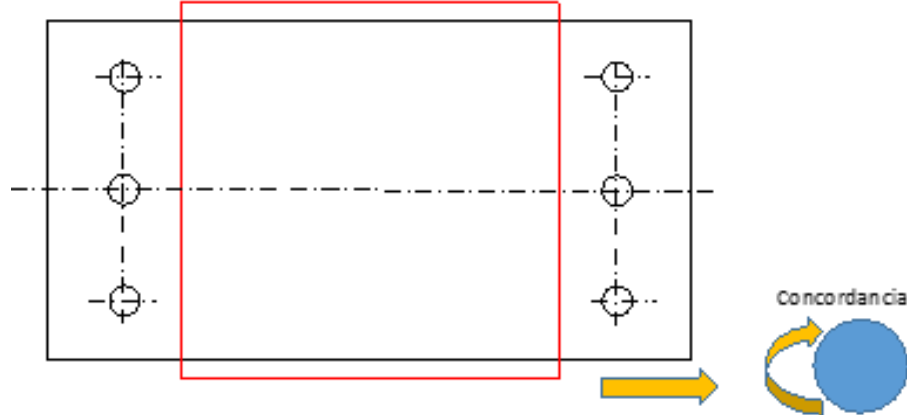


Figura 49. Esquemático de utillaje donde se realizarán los ensayos.

Para el post procesado de los datos utilizaremos tres métodos para determinar el daño tanto de la herramienta como de la pieza, los cuales son una lupa Leica, un microscopio confocal Leica, y programas de análisis de señales (MatLab,...) y métodos estadísticos (LUMIERE) para hacer un análisis de varianza de los diferentes resultados obtenidos (ANOVA).

5.5 Metodología de medición del daño

Para determinar la calidad del corte y su incidencia sobre el daño al material CMC, se miden dos variables representativas del proceso para diferentes condiciones de corte, a partir de fotografías y del software libre de análisis de imagen **ImageJ**⁴¹. ImageJ es un programa de procesamiento de imagen digital de dominio público programado en Java desarrollado en el National Institutes of Health. ImageJ fue diseñado con una arquitectura abierta que proporciona extensibilidad vía plugins Java y macros grabables. Esas variables son la profundidad máxima del astillado (en μm) y el área lineal astillada (en mm^2/cm). Para eso, se pasa de una foto en color a una en blanco y negro y se digitaliza (fig. 48).

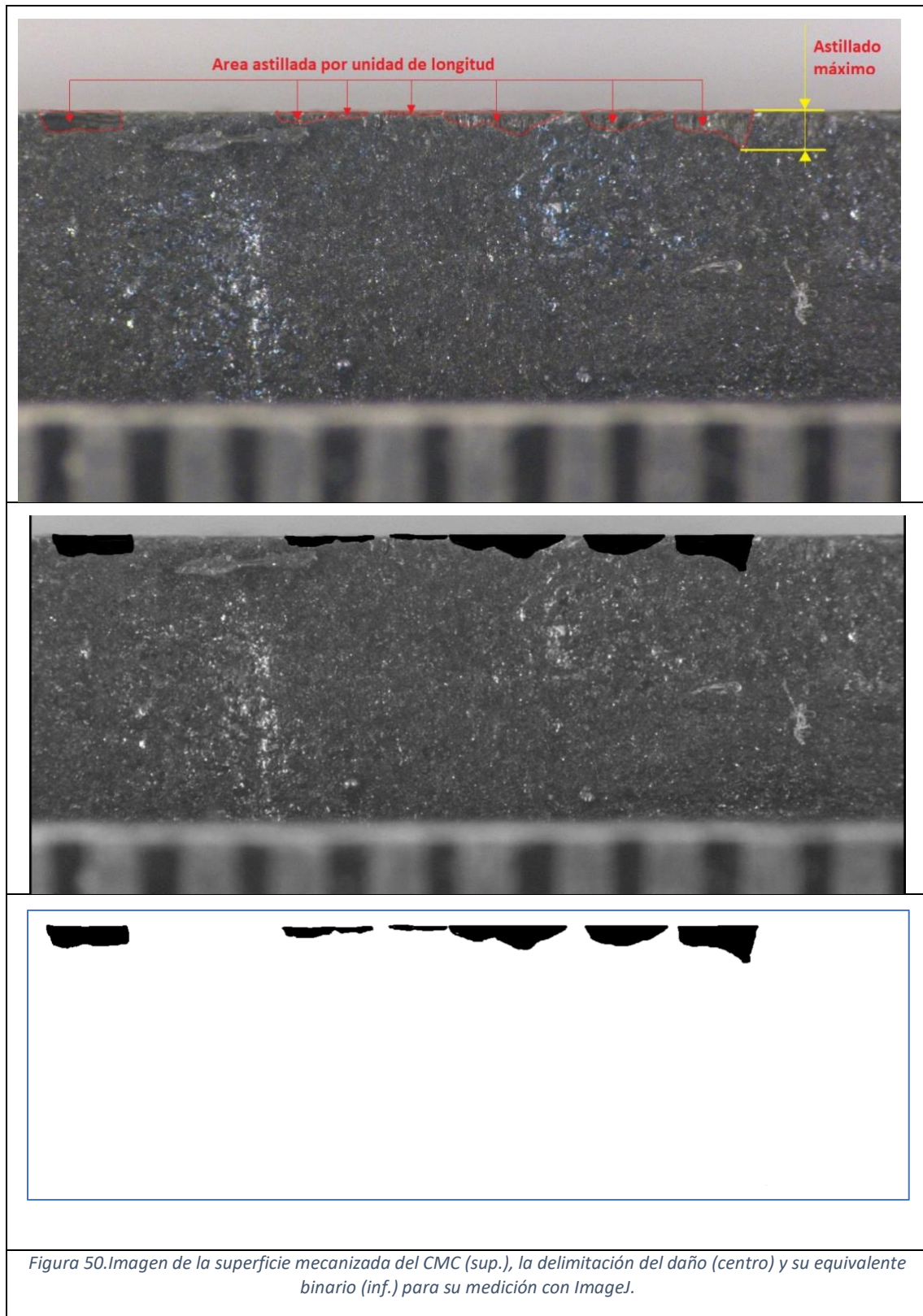


Figura 50. Imagen de la superficie mecanizada del CMC (sup.), la delimitación del daño (centro) y su equivalente binario (inf.) para su medición con ImageJ.

Se define la magnificación de la imagen a partir de una medida conocida o de una calibración inicial (aquí son 0,5 mm para la anchura entre dos graduaciones de la regla) y se determinan todas las partículas en negro de la foto digitalizada.

Para cada condición de corte, se realizan diferentes fotos a lo largo de los 100 mm mecanizados. Se realiza la media de esas superficies y se determina un daño específico para la superficie medida correspondiente a 10 mm de longitud (área lineal astillada). Se determina también la anchura máxima del astillado a lo largo de esos 100 mm (astillado máximo).

5.6 Análisis de varianza de los resultados (ANOVA)

El análisis de varianza (término a menudo abreviado por el término inglés ANOVA: ANalysis Of VAriance) es una prueba estadística que permite verificar que las variaciones de la variable estudiada (por ejemplo, el esfuerzo F_x) se pueden explicar a partir de las variaciones de los parámetros del proceso (aquí la velocidad de corte V_c , la velocidad de avance V_f o el avance f , la profundidad radial de corte ae o el desgaste de la herramienta).

El primer paso en un análisis de varianza consiste en definir el modelo teórico entre la variable estudiada y los parámetros, según el problema a estudiar. A menudo es posible escribir varios modelos para un mismo problema, de acuerdo con los elementos que se desean integrar en el estudio.

El modelo general es de la forma:

$$F_x = \mu + f(V_c, V_f, ae, \text{desgaste...}) + \varepsilon$$

Donde μ es una constante, $f()$ una función de los parámetros y ε el error del modelo o residuo. Ponemos el supuesto fundamental de que el error sigue una distribución normal.

La función $f(x)$ puede ser multílineal:

$$f(V_c, V_f, ae) = \alpha_1.V_c + \alpha_2.V_f + \alpha_3.ae$$

multílineal con interacciones entre parámetros:

$$f(V_c, V_f, ae) = \alpha_1.V_c + \alpha_2.V_f + \alpha_3.ae + \beta_1.V_c.V_f + \beta_2.V_c.ae + \beta_3.V_f.ae$$

o tener una expresión más compleja incluido no-lineal.

Los parámetros suelen tener diferentes niveles o factores (valores diferentes de los parámetros; por ejemplo, en este estudio, Vf a tenido como valor 100, 500 y 1000 mm/min).

Por regresión multilíneal, se determinan los coeficientes del modelo μ , α_i y β_i para minimizar el residuo ε .

El paso siguiente en el análisis de varianza consiste en explicar la varianza total sobre todas las muestras (los ensayos realizados) en función de la varianza debida a los factores (la varianza explicada por el modelo), la varianza debida a la interacción entre los factores y la varianza residual aleatoria (la varianza no explicada por el modelo). Para eso se hace un test de Student para cada parámetro y para la constante μ del modelo y se compara con el modelo de Fisher. Se determina un porcentaje de riesgo que ese parámetro explique las variaciones de la variable. Si ese riesgo es inferior a 10% se puede concluir que el parámetro es significativo para explicar el comportamiento de la variable (fig. 2).

Variable	Coefficiente	Desviación Estándar	t Student	Confianza %	Riesgo %	Centrado	
Constante	83,6029	36887153,97	0	0	100	-	
Vf	-0,2519	368871,5397	0	0	100	Non	
ae	39,6111	36887153,97	0	0	100	Non	
Vc	-8,3839	2,5816	-3,2476	98,59	1,41	Non	***
Vf * ae	0,4084	368871,5397	0	0	100	-	

La mayoría de los parámetros no parecen ser significativos. Se elimina la constante para ver si mejora el resultado.

Variable	Coefficiente	Desviación Estándar	t Student	Confianza %	Riesgo %	Centrado	
Vf	0,5841	0,4311	1,3549	78,75	21,25	Non	
ae	123,214	30,3698	4,0571	99,64	0,36	Non	***
Vc	-8,3839	2,4148	-3,4718	99,16	0,84	Non	***
Vf * ae	-0,4277	0,45	-0,9503	63,02	36,98	-	

Aparece otro parámetro que es significativo. Se cambia la interacción Vf*ae por Vf*Vc.

Variable	Coefficiente	Desviación Estándar	t Student	Confianza %	Riesgo %	Centrado	
Vf	0,3479	0,0397	8,7664	100	0	Non	***
ae	42,0189	9,2241	4,5553	99,86	0,14	Non	***
Vf * Vc	-0,018	0,003	-5,9783	99,98	0,02	-	***

Se ha eliminado el parámetro Vc ya que con la interacción Vf*Vc es ese elemento que es significativo. El modelo tiene todos sus componentes con un riesgo bajo.

Figura 51. Pasos sucesivos del análisis de varianza para obtener un modelo válido.

Los últimos pasos son:

- (1) averiguar que el modelo tiene un riesgo bajo haciendo un test de Student a la regresión y comparando ese valor con el modelo de Fisher.
- (2) Determinar el coeficiente de regresión del modelo que se obtiene de la manera siguiente:

$$r = \sqrt{\frac{\text{Suma de los cuadrados de la regresión}}{\text{Suma de los cuadrados totales}}}$$

(3) Averiguar la normalidad de los residuos (puesto que es una hipótesis inicial). Todos estos cálculos se hacen de manera automática a partir de diferentes softwares como XLSTAT, MINITAB, EXCEL, IBM SPSS, R...

En nuestro caso se ha utilizado el software LUMIERE.

La determinación de un modelo permite saber cuáles son los parámetros significativos, priorizar entre ellos esos parámetros y optimizar el proceso actuando al mismo tiempo sobre las variables estudiadas (por ejemplo, determinar las combinaciones de los parámetros **Vc**, **Vf** y **ae** que minimizan las variables como los esfuerzos, el daño al CMC, la rugosidad ...).

5.7 Análisis de la superficie mecanizada y del desgaste de las muelas

De manera de analizar de forma mas concreta el hecho del desgaste tanto de la herramienta como de la muela utilizares un microscopio Leica DCM3D que es un microscopio de tecnología de doble núcleo que nos permite analizar de manera microscópicas y nano estructurales en una superficie especifica. Con la facultad que tiene de combinar la tecnología confocal con interferómetro para realizar mediciones a alta velocidad y una buena resolución [2], con estas tecnologías nos permitirá hacer mediciones a los materiales que están compuestos tanto la herramienta y la pieza.

La razón por la cual en la que se utilizará este instrumento de metrología es por hecho que podremos analizar de forma mas precisa la superficie del área mecanizada como la muela de rectificado en cuestión, al ser un microscopio confocal nos dará la oportunidad de generar una imagen en 3D de la superficie mecanizada y poder determinar el acabado que nos deja la herramienta a diferentes parámetros. Por otro lado, para el análisis de la herramienta nos da la oportunidad de medir posibles daños que pueda tener el grano a cada pasada de la herramienta de diamante.

5.8 Análisis fractal

El mecanizado con herramientas abrasivas recubiertas con diamante es utilizado comúnmente en el mecanizado de piezas cerámicas⁴², y esta metodología es perfectamente aplicable a los materiales del tipo CMCs. Existe, sin embargo, una falta de conocimiento en cuanto a cómo el desgaste de la herramienta afecta a la integridad superficial del material mecanizado. Se ha investigado la integridad de la superficie obtenida como resultado de un mecanizado como un fenómeno aislado⁴³, o se menciona el desgaste de la herramienta como un factor importante debido a la alta dureza de las fibras de SiC, usadas en los CMCs⁴⁴. No se hace mención específica de cómo se evaluó el desgaste de la herramienta recubierta de diamant

5.8.1 La importancia del desgaste de las herramientas diamantadas para mecanizado de CMCs.

La predicción del desgaste de herramientas es uno de los tópicos más importantes en el campo del mecanizado. La predicción del desgaste de la herramienta se relaciona sobre todo con la integridad de las superficies, afecta directamente a la calidad de la pieza y es importante a nivel de logística de producción y costos de fabricación⁴⁵.

Existe alguna información sobre el desgaste de herramientas recubiertas con diamante para otras aplicaciones distintas del mecanizado con CMCs, por ejemplo, metodologías para medir el desgaste de herramientas en el mecanizado de rocas⁴⁶, o modelos matemáticos para el cálculo del Área de embotamiento (Blunting Area), tomando en cuenta diferentes mecanismos de desgaste⁴⁷. Existe abundante información sobre predicción del desgaste de herramientas convencionales del tipo plaquita “tool insert” al mecanizar metales, y con muy diversos enfoques, por

ejemplo, el uso de modelos analíticos, redes neuronales en torneado⁴⁸, análisis de señales con tratamiento de uso de redes neuronales para fresado⁴⁹, uso de regresiones lineales en combinación con Diseño de Experimentos en operaciones de acabado⁵⁰, o uso de algoritmos en combinación con “Machine Learning”⁵¹.

Para el desgaste de herramientas por mecanizado de materiales compuestos de matriz metálica se ha encontrado alguna información, como por ejemplo, la investigación sobre el uso del Método de Elementos Finitos en combinación con un criterio de daño para el taladrado de composites⁵².

5.8.2 El uso de fractales para el análisis de mecanizado.

En la investigación de Sahoo et al.⁵³, se hace una investigación exhaustiva del uso de fractales para caracterizar la calidad superficial de diversos procesos de mecanizado. Se menciona que una de las principales ventajas de ese enfoque es la independencia del tamaño de la muestra. Por ejemplo, las variaciones de la altura en la rugosidad dependen del tamaño de la sección que se analizó. El uso de una medida que sea invariante con la escala⁵⁴, sugiere el uso de fractales en el caso de superficies que sean rugosas (como las de herramientas recubiertas con diamante). Para esta investigación se mecanizó por recantado una placa de CMCs de Carburo de Silicio. La altura útil de la herramienta recubierta era de 10 mm, y el espesor de la placa de composite fue de 6,5 mm. La herramienta se centró en forma simétrica respecto a la placa de material compuesto, de tal manera que aproximadamente 1,75 mm de cada lado de la herramienta permanecieron sin utilizar, lo que sirvió como muestra para determinar la diferencia en la dimensión fractal de la herramienta en estado “nueva”.

El uso de fractales para caracterizar una herramienta del tipo abrasiva recubierta con diamantes, consiste básicamente en calcular la dimensión fractal de la superficie de esta. Una geometría fractal es una medida de la complejidad de la superficie, y el valor de la dimensión fractal puede tomar un valor no-entero entre 2 y 3, donde el valor topológico de una superficie normalmente es de 2. En general, cuando se incrementa el valor de la dimensión fractal, mayor es la complejidad de la superficie⁵⁵.

Existe una diversidad de propuestas para calcular la dimensión fractal de una superficie: por prismas triangulares⁵⁶, método por variaciones (the variation method)^{57,58}, Método de la Raíz Media Cuadrática aplicada a superficies 3D (three-dimensional root-mean-square (3D-RMS))⁵⁹, o por el uso del Método de la Raíz Media Cuadrática Residual Local (Regional residual root mean square (3R method))⁶⁰. Todos los métodos anteriores se presentan ventajas y desventajas y mayor o menor precisión. Sin embargo, todos tienen una limitación respecto a la forma del área que se toma como muestra para determinar la dimensión fractal (la sección medida debe ser cuadrada), o al número de puntos de muestra del mapa en cada coordenada del plano XY (debe ser un número cercano a una potencia de 2). Un ejemplo de un mapa de datos “problemático” se muestra en la Figura 2.

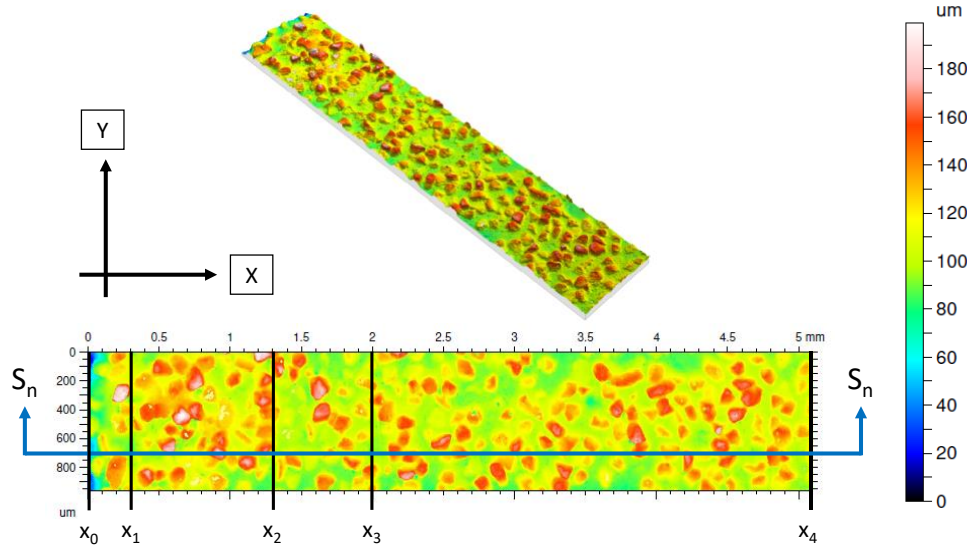


Figura 52. Mapa topográfico de una herramienta recubierta de diamante. El tamaño del mapa es de 1536 puntos en la dirección X (columnas), y 288 en la dirección Y (filas).

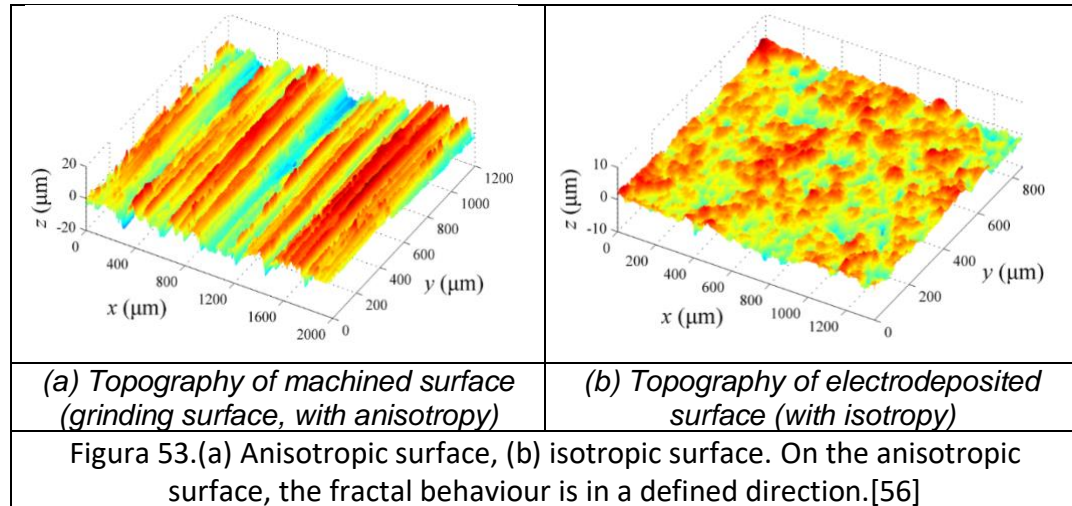
Para un mapa topográfico como el de la Figura 2 es complicado calcular la dimensión fractal, puesto que no toda la sección de la herramienta se ha desgastado. No se tomará en cuenta el borde lateral de la herramienta, desde la cota $x_0=0$, hasta $x_1=0.3$ mm. Los datos entre las coordenadas $x_1=0.3$ a $x_2=1.3$ mm corresponden a la zona donde la herramienta recubierta no ha mecanizado CMC. Desde $x_3=2$ hasta $x_4=5.1$ mm es la zona donde se ha CMC. Entre $x_2=1.3$ y $x_3=2$ mm existe incertidumbre en cuanto a la ubicación de la herramienta respecto a la placa de CMC durante el mecanizado, y por eso no se analizó.

5.8.3 Método propuesto para determinar la dimensión fractal.

La superficie debe reunir ciertos requisitos mínimos para poder ser analizada según el método que se propondrá más adelante. Los requisitos son:

- La rugosidad debe ser isotrópica: la superficie no debe presentar direccionalidad en su patrón fractal. La isotropía de la superficie es importante puesto que permite utilizar el método de reducción de la dimensión para calcular el fractal de la superficie (D_{surf}) como el valor de

dimensión fractal a lo largo de cierta dirección de un perfil ($D_{\text{prof}}+1$)^{61,62}. Un ejemplo de rugosidad isotrópica y otra anisotrópica se muestra en la Figura 3.



- La sección (mapa), del que se calculará la dimensión fractal debe ser de forma cuadrada o rectangular, y debe estar alineada a lo largo de un sistema de coordenadas conveniente, como se muestra en la Figura 51.

El método que se propone consiste en lo siguiente:

- Divídase la superficie en secciones a lo largo de la dirección que contenga la mayor cantidad de datos, y obténganse perfiles de rugosidad perpendiculares a la dirección que contiene la menor cantidad de datos. En el caso de la Figura 2, la mayor cantidad de datos se encuentra a lo largo de la coordenada X (columnas), y la dirección con menor cantidad de datos a lo largo de la dirección Y (filas).
- La selección del perfil de rugosidad dependerá de la zona de la superficie que se busca analizar. Por ejemplo, la Figura 4 muestra un perfil de rugosidad

desde $x_3=2$ hasta $x_4=5.1$ mm, en la zona donde la herramienta ha mecanizado CMC.

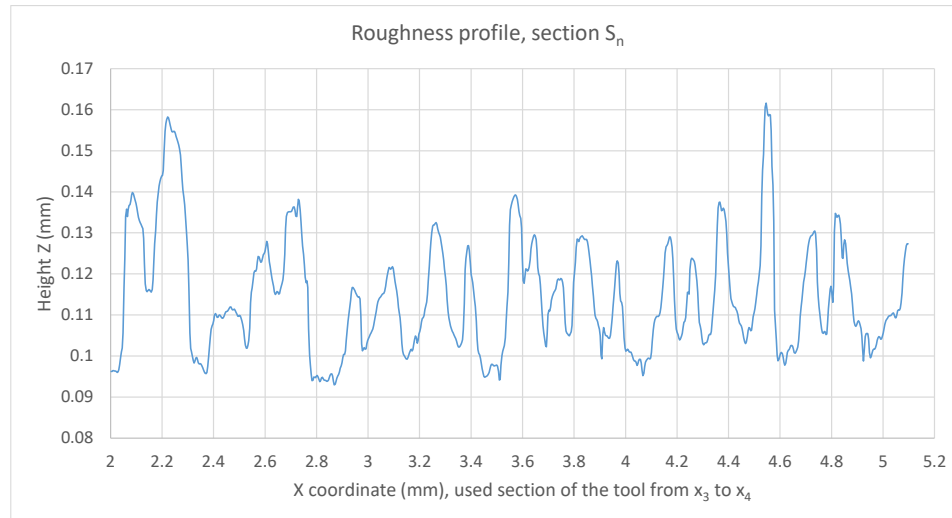


Figura 54. Perfil de rugosidad de una parte de la sección (S_n), de la superficie de la herramienta como se muestra en la Figura 2. En este caso, el perfil se ha seleccionado de la zona en que la herramienta ha sufrido desgaste por mecanizar CMCs.

- El número de perfiles de rugosidad será igual al número de la menor cantidad de datos a lo largo de esa dirección. Para el caso de la Figura 51, desde $n_{row}=1$ ($y=0$ mm) hasta $n_{row}=\text{last row}$ ($y=0.9$ mm).
- Calcúlese la dimensión fractal para la sección de cada perfil de rugosidad como el que se muestra en la Figura 52. Para el cálculo de la dimensión fractal se recomienda el método de Power Spectral Density (PSD)⁶³. Cada coordenada en el eje X representaría el tiempo en una onda, y la amplitud de la misma onda estaría representada por la altura de rugosidad en la coordenada Z.
- La Densidad Espectral de Potencia requiere de la selección de una forma de estimar la energía de la onda (en este caso el perfil de rugosidad). Se puede utilizar los métodos clásicos: “method of autocorrelation method, periodogram method, Bartlett method, and Welch method”. Según Shen et

al.⁶⁴, los métodos de Bartlett y Welch son los más precisos, y por eso se ha seleccionado este último (Welch).

- Para cada perfil se calcula la pendiente (β), en escala Log-Log de la línea de ajuste para los datos de la Densidad Espectral de Potencia, como se muestra en la Figura 53 para el perfil de rugosidad de la Figura 52.

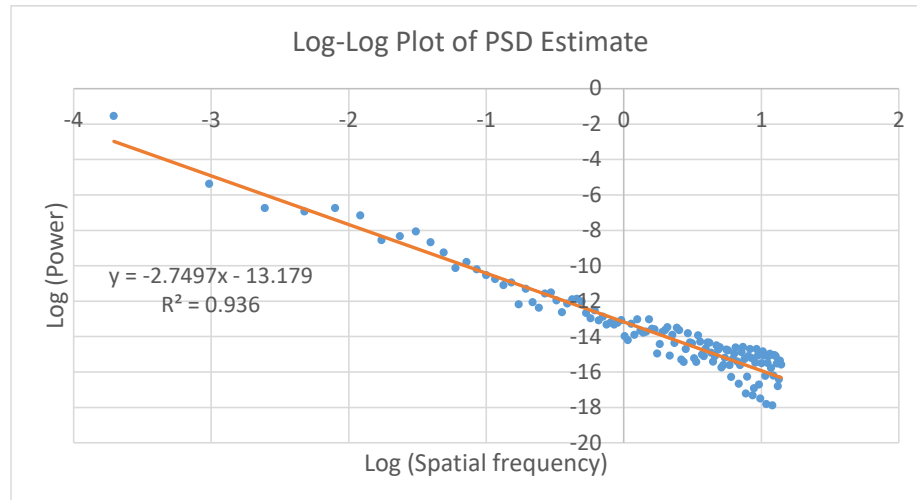


Figura 55. Cálculo de la pendiente $\beta = -2.7497$ para la estimación de la Densidad Espectral de Potencia del perfil de rugosidad de la Figura 52.

- Se calculan las pendientes para todos los perfiles de rugosidad de la superficie en el área de estudio de interés desde $n_{row}=1$ hasta n_{row} (como en el caso de la Figura 2), y se calcula el valor del coeficiente de Hurst (H) $0 \leq H \leq 1$ ⁶⁵, a partir de la Ecuación 1.

$ \beta = 2H_{n-row} - 1$	Eq. (1)
----------------------------	---------

Para una superficie auto-afín⁶⁶, el cálculo de la dimensión fractal de la superficie (2D), a partir de los perfiles de rugosidad de esta (1D), se hará por medio de la Ecuación 2.

$D_{surf} = E + 1 - H_{n-row}$	Eq. (2)
--------------------------------	---------

Dónde: E es la dimensión del espacio euclidiano (en este caso $E=2$ para una superficie).

- Se ajustan los valores estimados D_{surf} de cada perfil de rugosidad a una distribución de tipo Logística⁶⁷. Se ha escogido la Distribución Logística debido a su relativa sencillez y a que se adapta muy bien a la forma en que se distribuyen los datos de D_{surf} obtenidos a partir de cada perfil de rugosidad, como se muestra en la Figura 6.

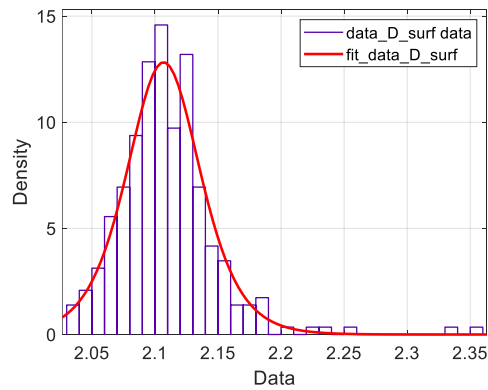


Figura 6. Fit of Logistic Probability density function for data of D_{surf} .

- El valor de D_{surf} para toda la superficie fractal será Ecuación 3.

$D_{surf} = \mu \left[PDF \left(D_{surf} \right) \right]$	Eq. (3)
---	---------

Dónde μ es el valor del parámetro de localización de la Función de Densidad de Probabilidad (PDF).

6. Resultados

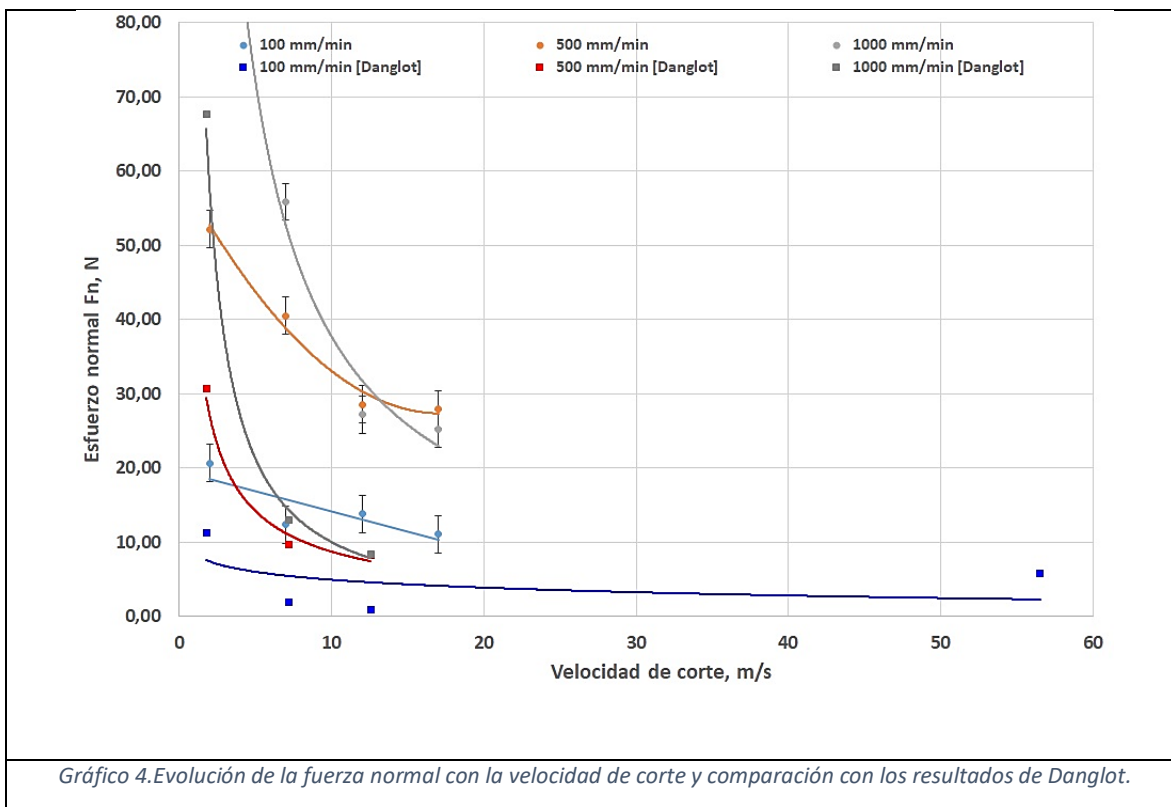
A continuación, se analizan los resultados obtenidos.

6.1 Evolución de las fuerzas de corte

Los resultados de medición de fuerzas de corte se presentan en la Tabla 16 y las figuras a continuación.

Ensayo	ae (mm)	Vw (mm/min)	N (rpm)	Vc (m/s)	Fn (N)	Ft(N)
1	1	100	1529	2	20,65	2,72
2	1	100	5350	7	12,35	3,76
3	1	100	9172	12	13,77	4,51
4	1	100	12994	17	11,06	4,66
8	1	500	1529	2	52,15	2,34
7	1	500	5350	7	40,53	2,11
6	1	500	9172	12	28,56	1,5
5	1	500	12994	17	27,92	1,81
9	1	1000	5350	7	55,86	2,46
10	1	1000	9172	12	27,17	1,48
11	1	1000	12994	17	25,23	1,47
12	2,5	100	12994	17	20,54	1,67
0	0,5	100	12994	17	6,75	

Tabla 16. Valores de fuerza normal y tangencial para cada uno de los experimentos del DoE



El esfuerzo tangencial sigue siendo muy bajo (y en la incertidumbre de la medida ± 5 N) cual sean las condiciones de corte. Este resultado es homogéneo con los resultados de Danglot, aunque en su caso la herramienta era constituida por granos de $256 \mu\text{m}$.

La fuerza normal disminuye con la velocidad de corte cual sea la velocidad de avance. Se confirman los resultados de Danglot: a partir de $12,5 \text{ m/s}$, la fuerza normal es mínima y un incremento de esa velocidad de corte no disminuye de manera significativa esa fuerza normal. La velocidad de corte hasta 25 m/s en condiciones húmedas recomendada por los fabricantes de herramientas está sobreestimada para este tipo de mecanizados y un valor máximo de 17 m/s parece ser más realista.

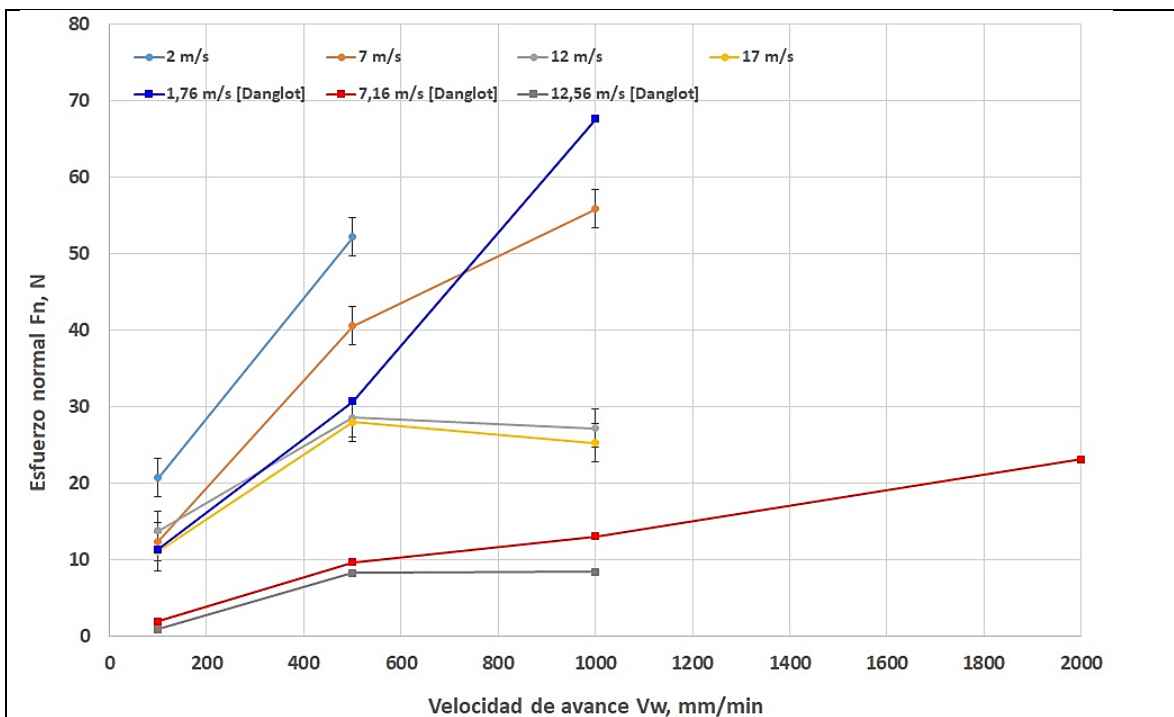
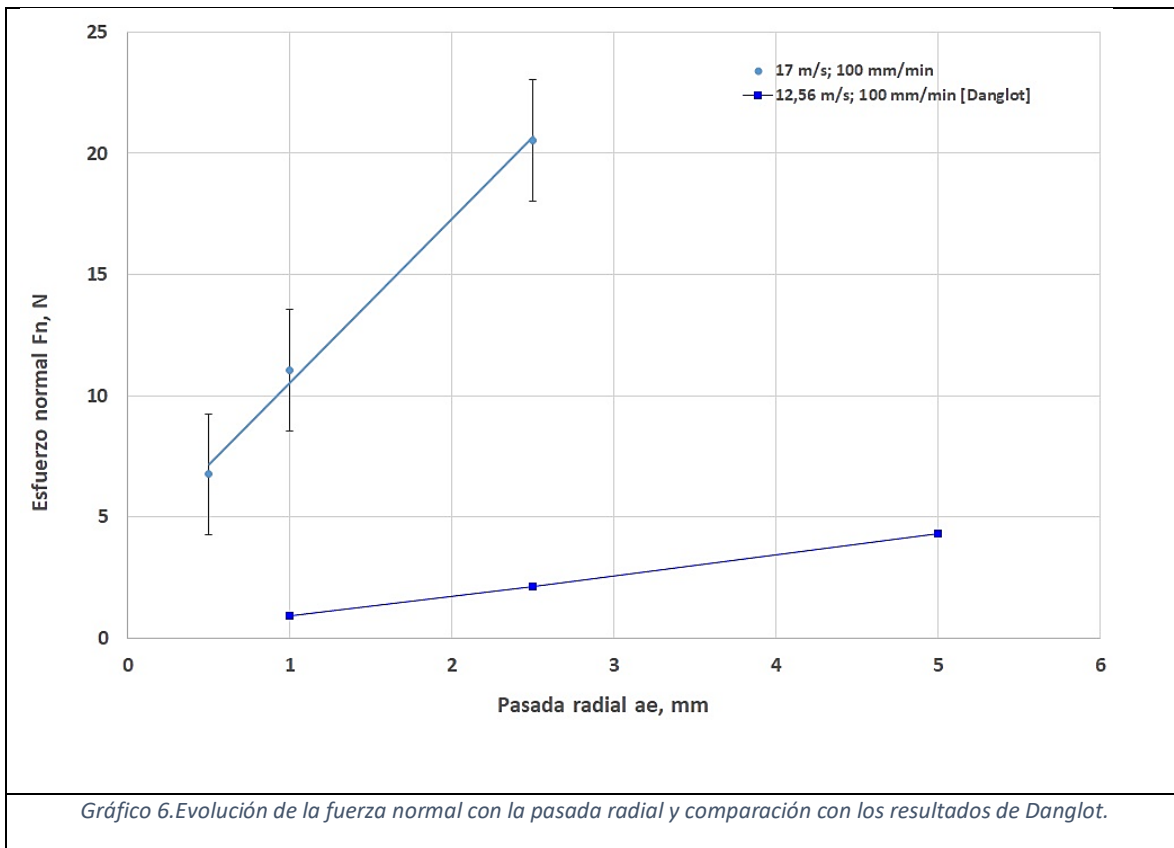


Gráfico 5. Evolución de la fuerza normal con la velocidad de avance y comparación con los resultados de Danglot.

La fuerza normal aumenta con la velocidad de avance. Pero se distinguen diferencias de incremento según la velocidad de corte. Para las velocidades bajas (2 y 7 m/s), el incremento de la fuerza normal con la velocidad de avance es mucho más rápido que a velocidades más elevadas (12 y 17 m/s). Incluso, para esas dos

velocidades de corte, a partir de 500 mm/min, la fuerza normal se estabiliza. Danglot puso en evidencia ese comportamiento. Se puede deducir una diferencia de comportamiento de la herramienta que explique este fenómeno, seguramente asociado a un cambio en la fuerza específica.

En cuanto a la influencia de la pasada radial, hay una dependencia lineal de la fuerza normal con la pasada, conforme con los resultados de Danglot.



En los diferentes ensayos llevados a cabo, nuestros resultados de fuerza normal han sido siempre más elevados que los de Danglot, demostrando el interés de utilizar una herramienta con un grano más gordo (256 μm en vez de 125 μm en nuestros ensayos).

Para determinar cuáles eran los parámetros de corte significativos, se ha realizado un análisis de varianza de los resultados de fuerza normal en función de los parámetros del proceso.

Análisis de varianza del esfuerzo normal F_n

Variable	Coefficient	Ecart-Type	t Student	Confiance %	Risque %	Centrage	
ae	10,2834	2,3217	4,4292	99,87	0,13	Non	***
Vw	0,0748	0,01	7,4545	100	0	Non	***
Vw * Vc	-0,0037	0,0008	-4,844	99,93	0,07	-	***
Décomposition de la somme de carrés							
Source	mme des Carr	Ddl	Carrés Moyen	Fisher	Confiance %	Risque %	
Régression	11299,5072	3	3766,5024	73,6568	100	0	
Résidus	511,3586	10	51,1359				
Total	11810,8658	13	908,5281			$r^2 = 0,9567$	

Tabla 17. Resultados del ANOVA del esfuerzo normal.

La velocidad de avance, la pasada radial y la interacción entre la velocidad de avance y la velocidad de corte son los parámetros significativos del proceso. El coeficiente de regresión es muy bueno ($r = 0,9781$) con un valor de la prueba de Fisher muy alto. Eso significa que el modelo explica muy bien las variaciones de la fuerza normal.

La prueba de normalidad de los residuos demuestra que la distribución es normal y que no hay parámetros olvidados que puedan explicar las variaciones de esa fuerza normal.

Numero de datos	Media	Dispersión	DoF (grados de libertad)
13	0,7501	6,481	12
Test de Normalidad : SHAPIRO ET WILK			
Estadística Calculada	Ley	Confianza %	Riesgo (alpha)%
0,9689	NORMAL	16,7412	83,2588
La distribución no es significativamente diferente de la ley normal.			

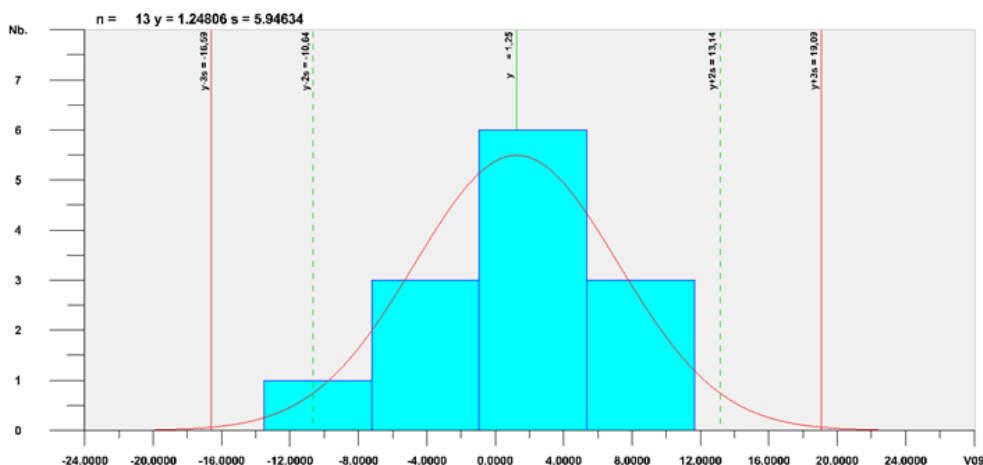


Gráfico 7. Resultado de ANOVA.

Minimización de la fuerza normal F_n

El modelo permite definir las condiciones óptimas para minimizar la fuerza normal, como aparece en la tabla siguiente.

ae (mm)	Vw (mm/min)	Vc (m/s)	F_n (N)
0,5	100,0	15,5	6,89
1,1	100,0	17,0	12,51

Tabla 18. Tabla de minimización de la fuerza normal con respecto a los parámetros de corte.

6.2 Evolución del daño

Los resultados de medición de fuerzas de corte se presentan en la Tabla 19 y las figuras a continuación.

SIGRASIC LF - PROBETA 1								
Herramienta 3: Muela diamantada PFERD de aglomerante galvánico, grano D126, Ø 25 mm, h 10 mm								
Voladizo 60 mm								
Numero ensayo	Velocidad de avance mm/min	Velocidad de rotación rpm	Pasada axial ap mm	Pasada radial ae mm	Avance mm/rev	Velocidad de corte m/s	Area astillada mm ² /cm	Astillado máximo µm
Ensayo 1	100	1529	6,5	1	0,065	2,0	0,1729	105
Ensayo 2	100	5350	6,5	1	0,019	7,0	0,0809	63
Ensayo 3	100	9172	6,5	1	0,011	12,0	0,0589	57
Ensayo 4	100	12994	6,5	1	0,008	17,0	0,0189	48
Ensayo 8	500	1529	6,5	1	0,327	2,0	0,2838	193
Ensayo 7	500	5350	6,5	1	0,093	7,0	0,2329	113
Ensayo 6	500	9172	6,5	1	0,055	12,0	0,1296	61
Ensayo 5	500	12994	6,5	1	0,038	17,0	0,0591	55
Ensayo 9	1000	12994	6,5	1	0,077	17,0	0,1665	106
Ensayo 10	1000	9172	6,5	1	0,109	12,0	0,2109	158
Ensayo 11	100	12994	6,5	2,5	0,008	17,0	0,0383	117
Ensayo12	1000	5350	6,5	1	0,187	7,0	0,4097	302

Tabla 19. Valores de área astillada y de astillado máximo para cada uno de los experimentos realizados.

El área astillada disminuye de manera rápida con la velocidad de corte y aumenta con la velocidad de avance.

El astillado máximo tiene una evolución similar al área astillada. En comparación con los resultados de Danglot sobre astillado máximo, las evoluciones son similares, aunque en función de la velocidad de corte, a velocidad de avance baja (100 mm/min) el daño es mínimo en nuestro caso; a velocidad de avance media (500 mm/min) los resultados son similares; y a velocidad de avance más alta (1000 mm/min) el astillado es mayor en nuestro caso.

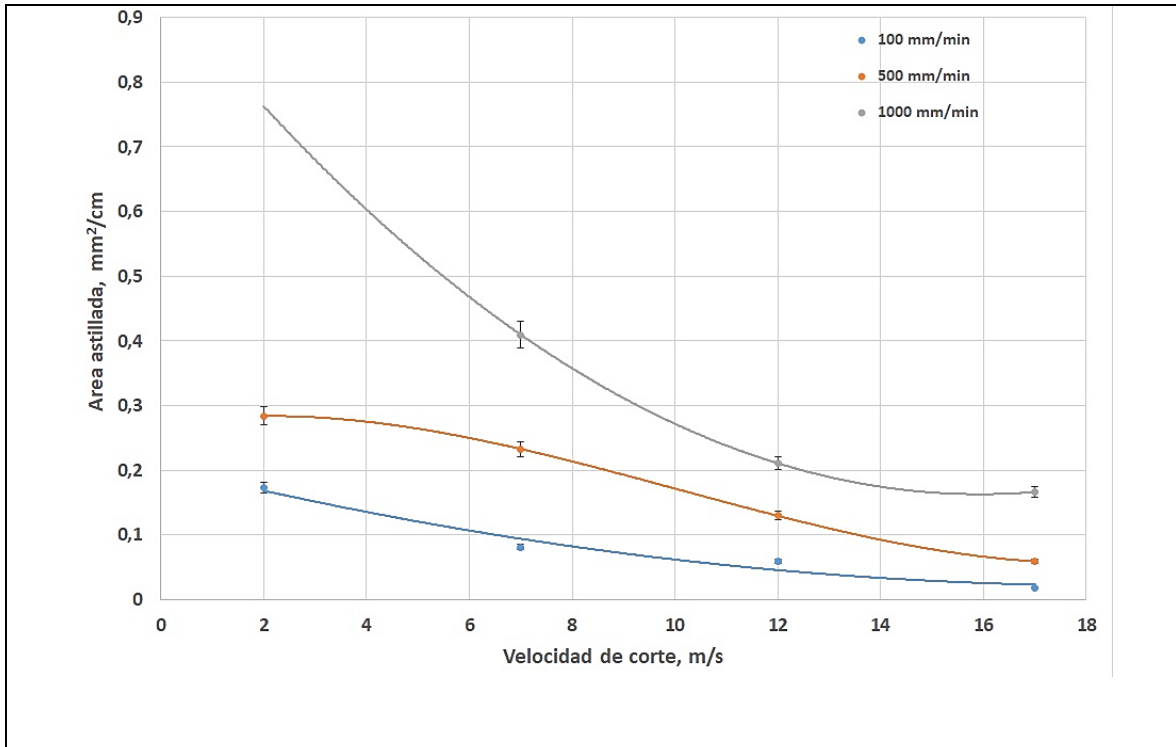


Gráfico 8. Evolución del área astillada en función de la velocidad de corte para diferentes velocidades de avance.

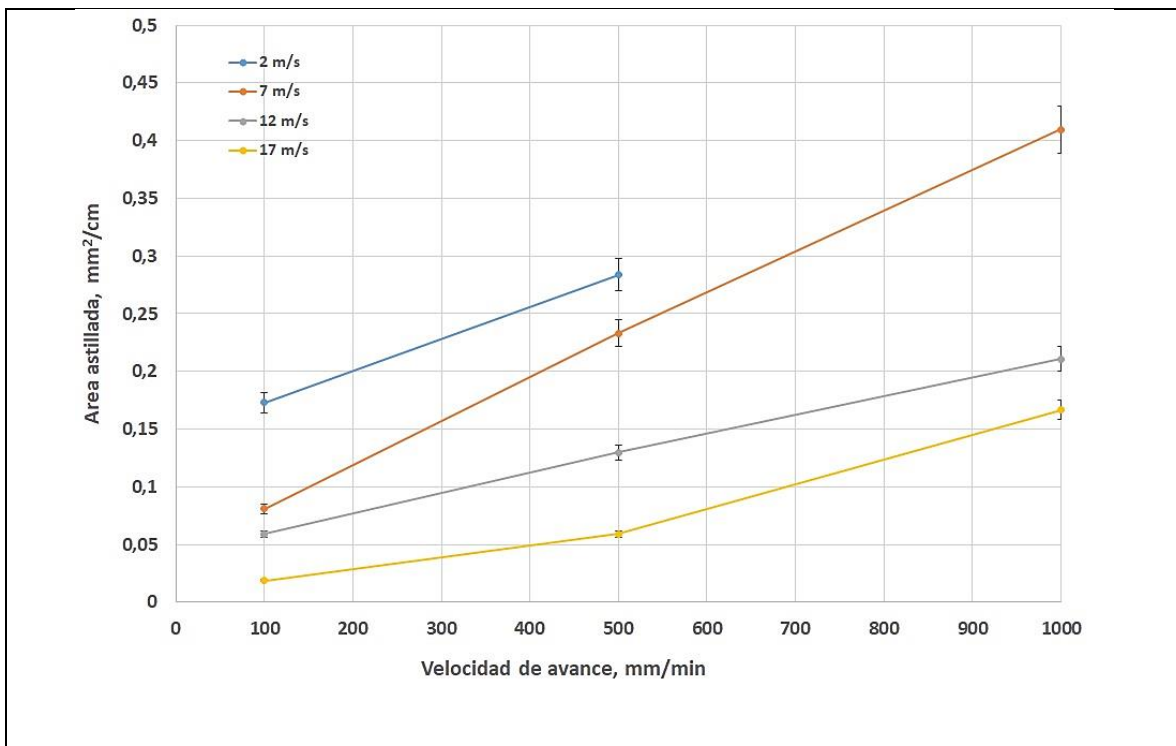
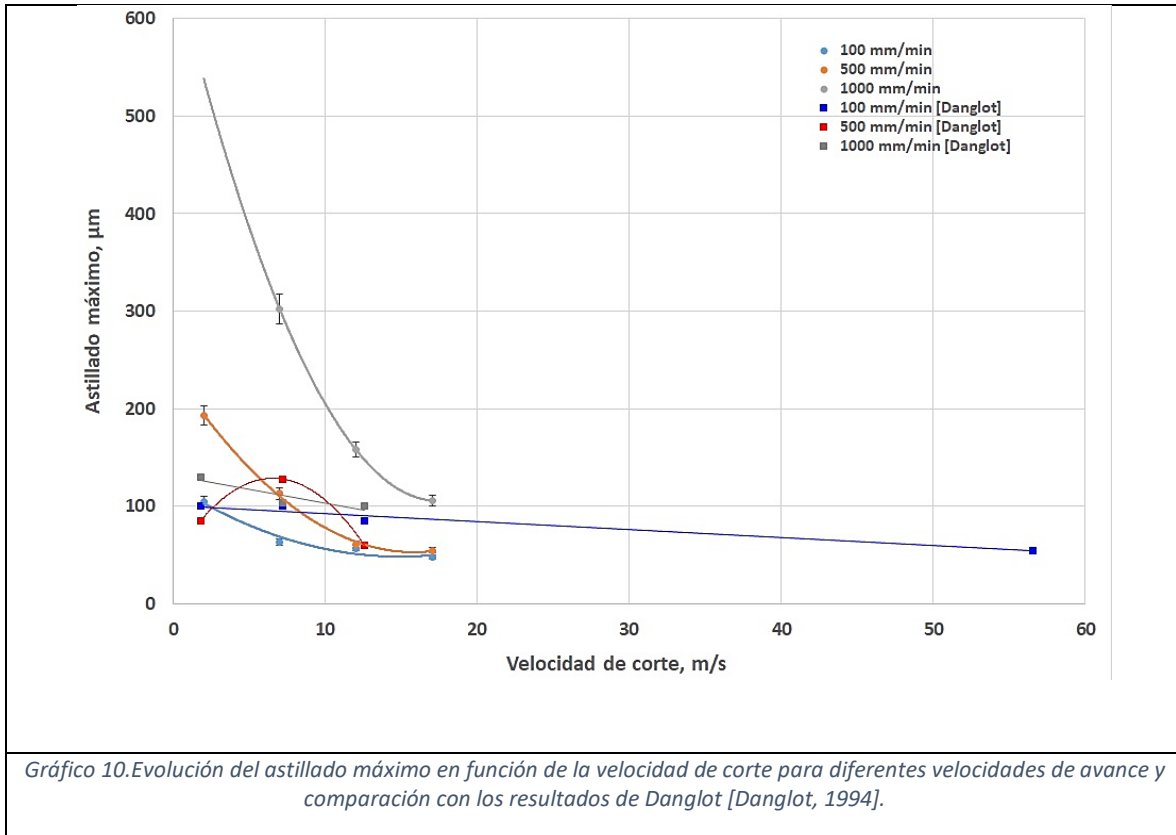
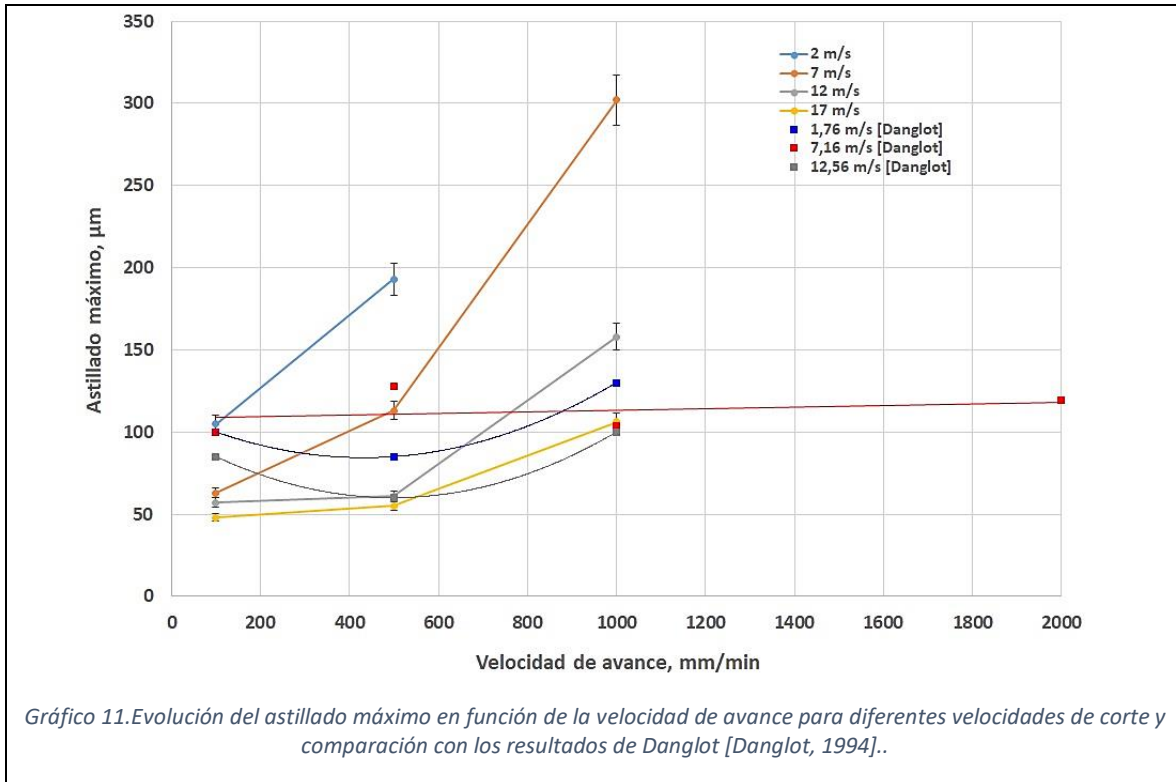
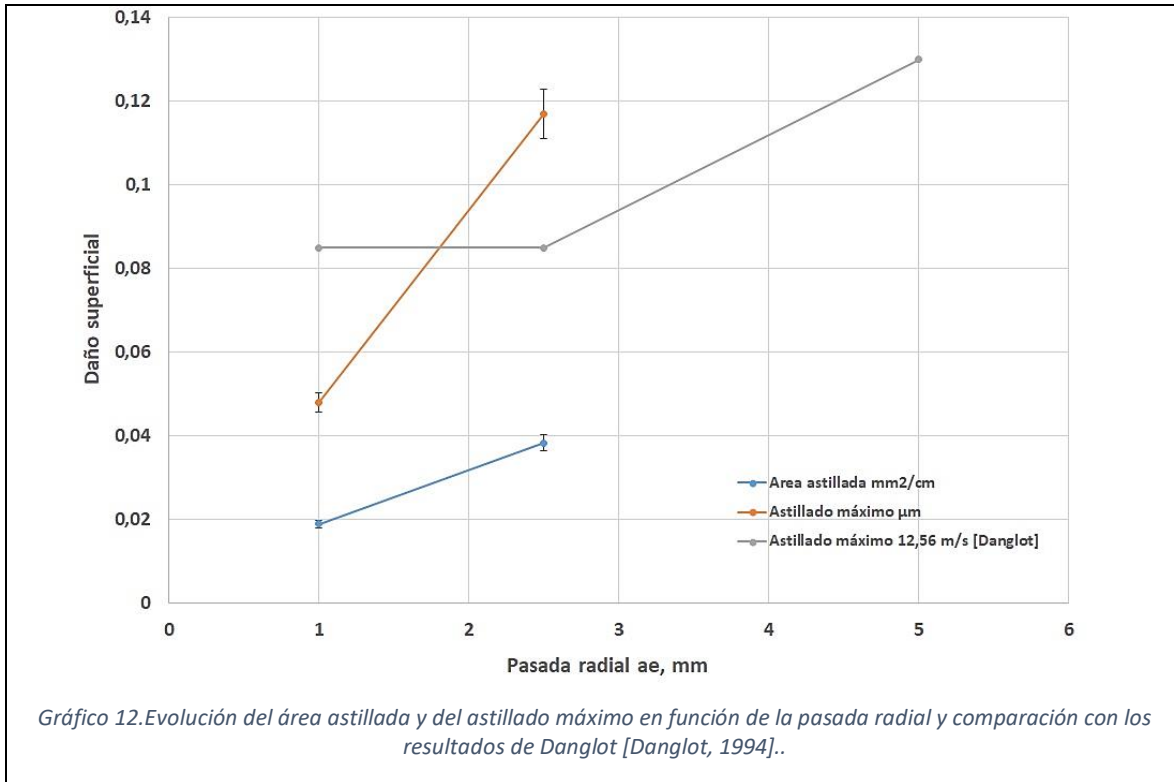


Gráfico 9. Evolución del área astillada en función de la velocidad de avance para diferentes velocidades de corte.





En función de la velocidad de avance, para velocidades de corte bajas (2 y 7 m/s), el astillado máximo es mucho mayor que para velocidades de corte más elevadas (12 y 17 m/s).



La evolución del daño superficial (área astillada y astillado máximo) con la pasada radial es similar a los resultados de Danglot: a mayor pasada radial mayor daño al material. Pero, para el astillado máximo, los valores obtenidos en nuestro caso son muy inferiores a los valores obtenidos por Danglot. Esa diferencia puede explicarse por la diferencia de tamaño de las partículas de diamante usadas en los dos experimentos: 125 μm en nuestro caso y 256 μm en el caso de Danglot.

Para determinar cuáles eran los parámetros de corte significativos, se ha realizado un análisis de varianza de los resultados de daño superficial en función de los parámetros del proceso.

Análisis de varianza del área astillada

La velocidad de avance, la pasada radial y la interacción de esos dos parámetros con la velocidad de corte son los parámetros significativos del proceso. El coeficiente de regresión es muy bueno ($r = 0,9928$) con un valor del test de Fisher muy alto. Eso significa que el modelo explica muy bien las variaciones del área astillada.

El test de normalidad de los residuos demuestra que la distribución es normal y que no hay parámetros olvidados que puedan explicar las variaciones del área astillada.

Análisis de varianza						
Variable	Coefficient	Ecart-Type	t Student	Confiance %	Risque %	Centrage
Vw	0,0004	0,0001	7,1943	99,99	0,01	Non
ae	0,1212	0,028	4,3279	99,75	0,25	Non
Vw * Vc	0	0	-3,9558	99,58	0,42	-
ae * Vc	-0,0067	0,0019	-3,595	99,3	0,7	-
Descomposición de la suma de cuadrados						
Source	mme des Carr	Ddl	Carrés Moyens	Fisher	Confiance %	Risque %
Régression	0,4306	4	0,1076	136,5755	100	0
Résidus	0,0063	8	0,0008			
Total	0,4369	12	0,0364			$r^2 = 0,9856$

Tabla 20. Resultados del ANOVA del área de astillado.

Area astillada			
Numero de datos	Media	Dispersión	DoF (grados de libertad)
12	-0,0011	0,0239	11
Test de Normalidad : SHAPIRO ET WILK			
Estadística Calculada	Ley	Confianza %	Riesgo (alpha)%
0,9685	NORMAL	15,8272	84,1728
La distribución no es significativamente diferente de la ley normal.			

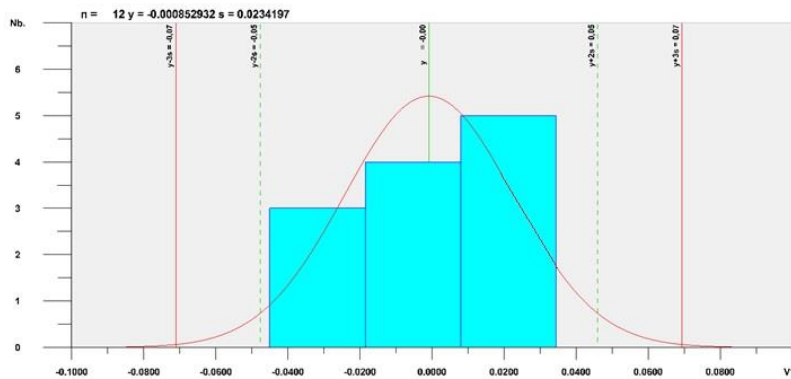


Gráfico 13. Resultado del ANOVA sobre el área de astillado.

Análisis de varianza del astillado máximo

Variable	Coefficient	Ecart-Type	t Student	Confiance %	Risque %	Centrage	
Vw	0,3479	0,0397	8,7664	100	0	Non	***
ae	42,0189	9,2241	4,5553	99,86	0,14	Non	***
Vw * Vc	-0,018	0,003	-5,9783	99,98	0,02	-	***
Décomposition de la somme de carrés							
Source	mme des Carr	Ddl	Carrés Moyens	Fisher	Confiance %	Risque %	
Régression	211242,877	3	70414,2922	88,4957	100	0	
Résidus	7161,1234	9	795,6804				
Total	218404	12	18200,3333			r² = 0,9672	

Tabla 21. ANOVA del astillado máximo

La velocidad de avance, la pasada radial y la interacción entre la velocidad de avance y la velocidad de corte son los parámetros significativos del proceso. El coeficiente de regresión es muy bueno ($r = 0,9835$) con un valor de la prueba de Fisher muy alto. Eso significa que el modelo explica muy bien las variaciones del astillado máximo.

Astillado máximo			
Numero de datos	Media	Dispersión	DoF (grados de libertad)
12	-0,977	25,4945	11
Test de Normalidad : SHAPIRO ET WILK			
Estadística Calculada	Ley	Confianza %	Riesgo (alpha)%
0,9559	NORMAL	32,8656	67,1344
La distribución no es significativamente diferente de la ley normal.			

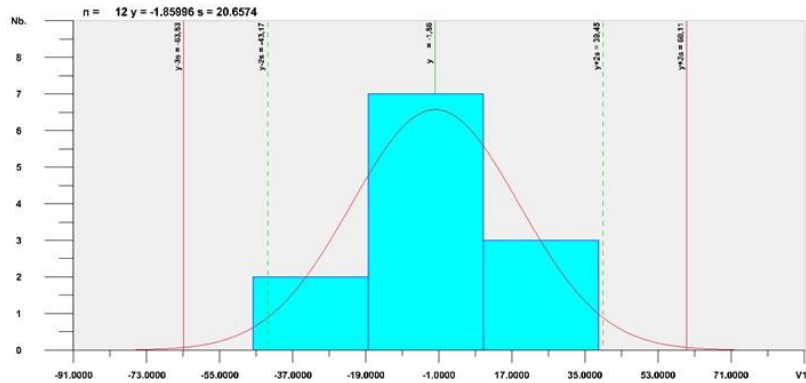


Gráfico 14. Resultado del ANOVA del astillado máximo

El test de normalidad de los residuos demuestra que la distribución es normal y que no hay parámetros olvidados que puedan explicar las variaciones de ese astillado máximo.

Minimización del daño

Optimización del Area astillada en el intervalo de variación de los parámetros de corte bajo las limitaciones del astillado máximo		
Variables	Objectifs	Valores Calculados
Astillado máximo	48.0000 <= Dma <= 302.00	53,4553
Area astillada	Minimizar	0,021
Parámetros	Valores Calculados	
Vw	101,9594 mm/min	
ae	1,1724 mm	
Vc	17,014 m/s	

Tabla 22. Minimización del daño.

Para los valores de los parámetros que minimizan la fuerza normal, se obtienen los siguientes valores de astillado máximo y de área astillada.

ae (mm)	Vw (mm/min)	Vc (m/s)	Astillado máximo (μm)	Area astillada (mm^2/cm)
1	100,0	15,5	48,86	0,0324

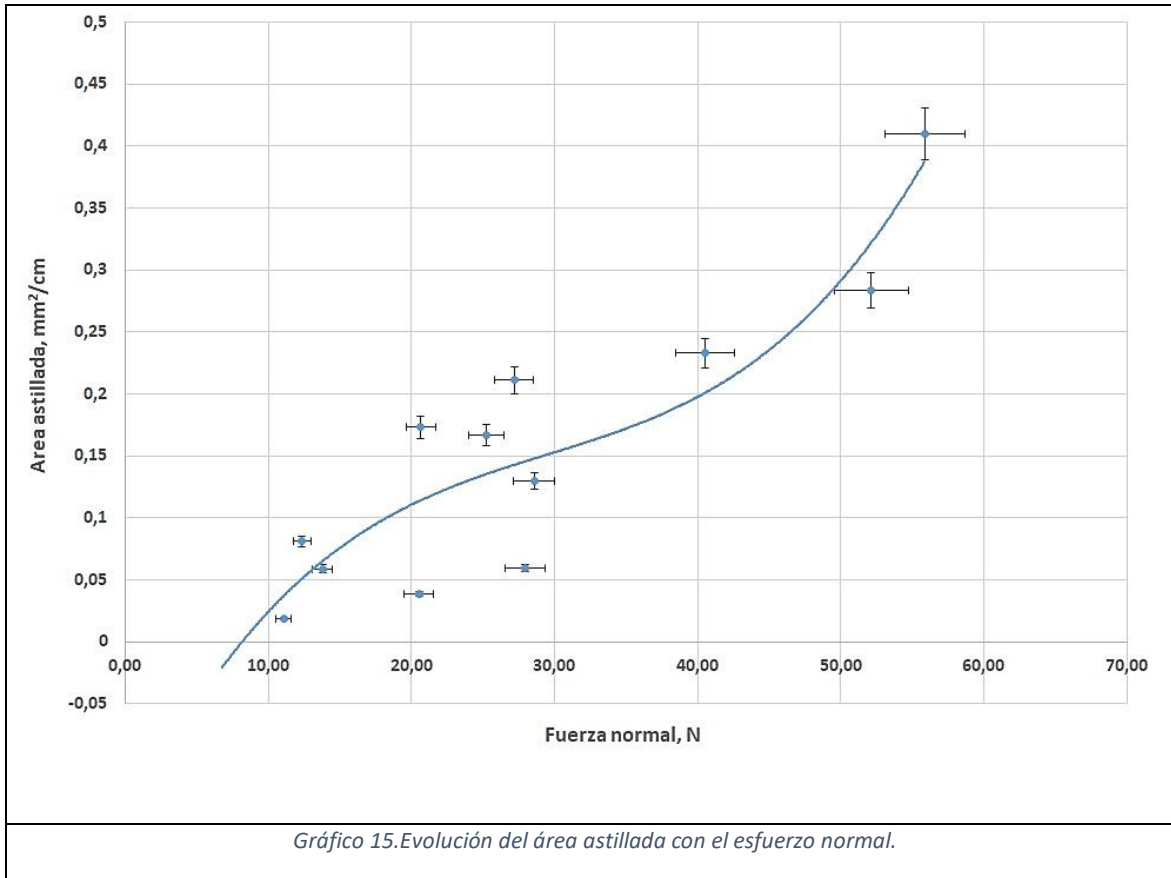
Tabla 23. Resultados de los parámetros donde se minimiza la fuerza normal

6.3 Relación entre el daño y la fuerza normal

Relación entre el área astillada y la fuerza normal

Parece que hay una relación polinomial para la evolución del área astillada con la fuerza normal. A más fuerza normal, mayor daño al material y mayor área astillada. El análisis de varianza confirma esa relación (valor del coeficiente del test de Fisher alto y confianza de la regresión de 99,75%), pero con un coeficiente de regresión no tan alto que para los análisis anteriores ($r = 0,9048$).

El test de normalidad de los residuos demuestra que la distribución es normal y que no hay parámetros olvidados que puedan explicar las variaciones de esa área astillada con la fuerza normal.



Regresión Polinomial del Área astillada

Síntesis sobre los Coeficientes

Variable	Coefficient	Ecart-Type	t Student	Confiance %	Risque %
Constante (a0)	-0,15226093	0,2134	-0,7136	50,42	49,58
Fn	0,02373074	0,0254	0,9332	62,2	37,8
Fn ²	-0,00068421	0,0009	-0,7643	53,34	46,66
Fn ³	0,00000774	0	0,8337	57,13	42,87

Análisis de Varianza

Source	mme des Carr	Ddl	Carrés Moyens	Fisher	Confiance %	Risque %
Régression	0,121	3	0,0403	12,0541	99,75	0,25
Résidus	0,0268	8	0,0033			
Total	0,1478	11	0,0134			r²= 0,8187

Gráfico 16. Resultados de la regresión polinomial..

Numero de datos	Media	Dispersión	DoF (grados de libertad)
12	0	0,0493	11
Test de Normalidad : SHAPIRO ET WILK			
Estadística Calculada	Ley	Confianza %	Riesgo (alpha)%
0,9496	NORMAL	41,5293	58,4707
La distribución no es significativamente diferente de la ley normal.			

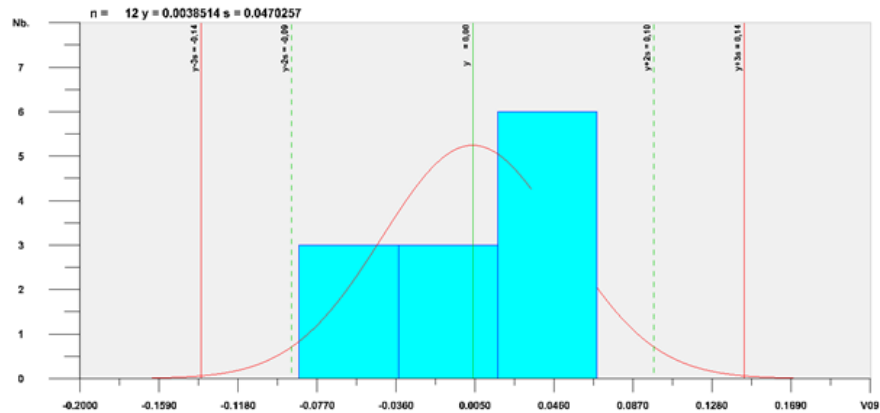


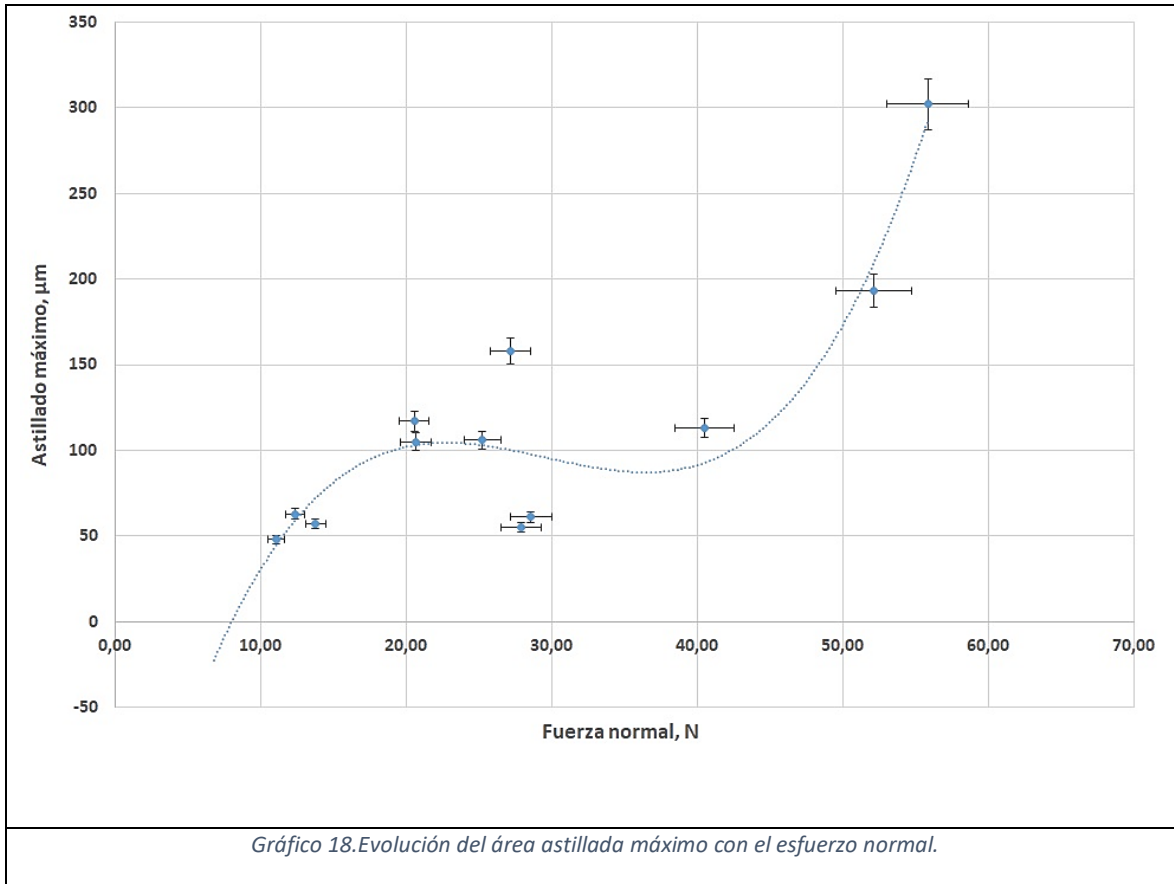
Gráfico 17. Resultados de la regresión

Relación entre el astillado máximo y la fuerza normal

De la misma manera, parece que hay una relación polinomial para la evolución del astillado máximo con la fuerza normal. A más fuerza normal, mayor daño al material y mayor valor del astillado máximo.

El análisis de varianza confirma esa relación (valor del coeficiente del test de Fisher alto y confianza de la regresión de 99,9%), pero con un coeficiente de regresión no tan alto que para los análisis anteriores ($r = 0,9326$).

El test de normalidad de los residuos demuestra que la distribución es normal y que no hay parámetros olvidados que puedan explicar las variaciones de esa área astillada con la fuerza normal.



Regresión Polinomial del Astillado máximo

Síntesis sobre los Coeficientes

Variable	Coefficient	Ecart-Type	t Student	Confiance %	Risque %	
Constante (a0)	-200,107161	115,4604	-1,7331	87,87	12,13	
Fn	33,8296153	13,7608	2,4584	96,06	3,94	**
Fn ²	-1,20824141	0,4844	-2,4943	96,27	3,73	**
Fn ³	0,01361863	0,005	2,7108	97,34	2,66	**

Análisis de Varianza

Source	omme des Carr	Ddl	Carrés Moyens	Fisher	Confiance %	Risque %
Régression	52322,8761	3	17440,9587	17,7951	99,93	0,07
Résidus	7840,7805	8	980,0976			
Total	60163,6667	11	5469,4242			r² = 0,8697

Tabla 24. Regresión Polinomial del Astillado máximo

Numero de datos	Media	Dispersión	DoF (grados de libertad)
12	0	26,6983	11
Test de Normalidad : SHAPIRO ET WILK			
Estadística Calculada	Ley	Confianza %	Riesgo (alpha)%
0,93	NORMAL	64,296	35,704
La distribución no es significativamente diferente de la ley normal.			

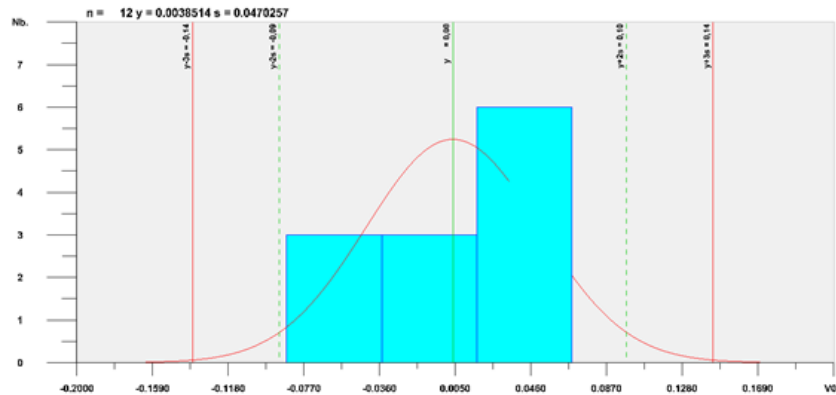


Gráfico 19. Resultados de la regresión del astillado máximo.

6.4 Evolución del desgaste de la herramienta

La evolución del desgaste de la herramienta se ha realizado determinando la dimensión fractal de la superficie de la herramienta de una zona desgastada y comparándola con la dimensión fractal de la parte de la herramienta que no ha mecanizado el CMC.

Los valores obtenidos, siguiendo la metodología descrita en el capítulo 4, están reflejados en la Tabla 25 a continuación. Se ha también calculado la variación de la dimensión fractal con respecto al ensayo anterior, variable que puede explicar como ocurre el desgaste. Como estamos tratando una superficie en 3D, la dimensión fractal tendrá un valor entre 2 y 3. Si el desgaste es homogéneo, ósea los granos se desgastan y tiene una superficie plana, la dimensión fractal debe disminuir y acercarse al valor 2.

Si por lo contrario, el desgaste se produce por ruptura de los granos por hendidura, la superficie de la herramienta será más rugosa y su dimensión fractal se alejara del valor 2.

# mecanizado de herramienta.	D_superficie	r ²	Fn (N)	ΔD
0	2,1896	0,9889	0	0
1	2,1902	0,9524	20,65	0,0006
2	2,1132	0,9532	12,35	-0,077
3	2,0982	0,9488	13,77	-0,015
4	2,1731	0,8761	11,06	0,0749
5	2,0594	0,9649	27,92	-0,1137
6	2,1228	0,9534	28,56	0,0634
7	2,1403	0,9043	40,53	0,0175
8	2,0427	0,9743	52,15	-0,0976
9	2,1068	0,9634	25,23	0,0641
10	2,1916	0,8921	27,17	0,0848
11	2,0815	0,9627	20,54	-0,1101
12	2,1336	0,9278	55,86	0,0521

Tabla 25. Valores de la dimensión fractal de la superficie de la herramienta en función del número del ensayo y de la fuerza normal aplicada a la herramienta.

La figura 52 detalla la evolución de la dimensión fractal con la fuerza normal aplicada a la herramienta. Se puede notar una evolución decreciente de la dimensión fractal con la fuerza normal, ósea que a más esfuerzo la dimensión fractal es menor traduciendo un mayor desgaste.

Aunque la tendencia sea esa, no hay una relación clara entre la dimensión fractal y la fuerza normal, ya que el coeficiente de regresión r^2 es muy bajo (0,198).

Sin embargo, si miramos a la variación acumulativa de la dimensión fractal con respecto al ensayo anterior, pueden aparecer cosas interesantes (fig. 53). En esa figura se pueden notar variaciones positivas o negativas. Las variaciones negativas se pueden asociar a una disminución de la dimensión fractal lo que corresponde a una superficie más lisa o un desgaste regular de los granos.

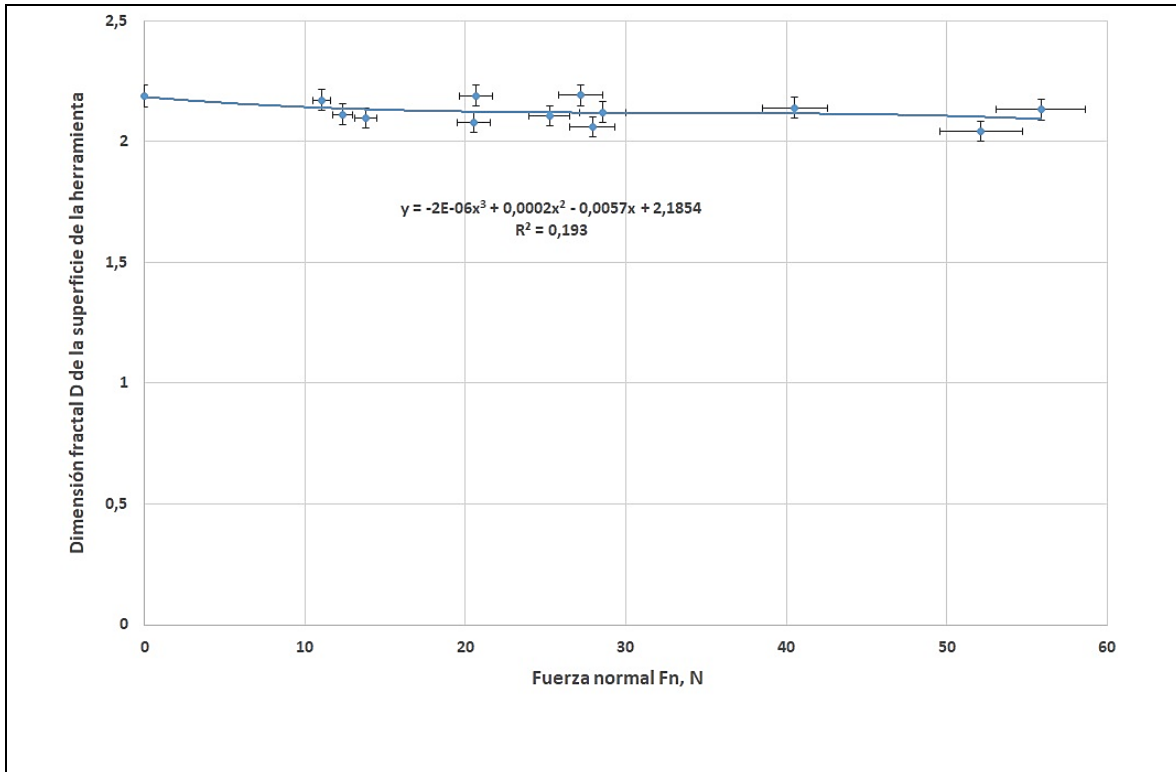
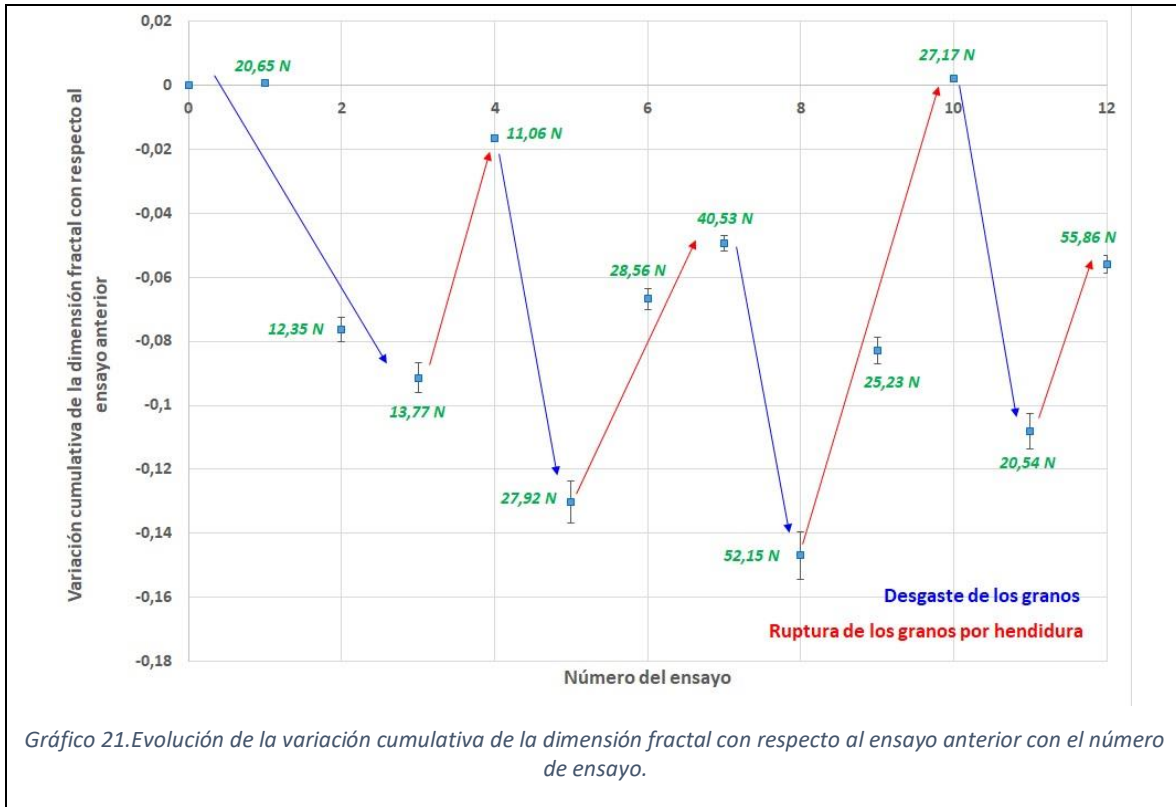


Gráfico 20. Evolución de la dimensión fractal de la superficie de la herramienta con la fuerza normal sobre la herramienta.



Las variaciones positivas se asocian a un incremento de la dimensión fractal ósea una superficie más rugosa o una ruptura de los granos. Se ha comprobado que, durante el desgaste de los granos, varios de ellos se agrietaban debido a una mala orientación cristalográfica del grano con respecto a las fuerzas de corte. Esas grietas conducen a la ruptura parcial del grano por hendidura por acumulación de desgaste (lo que ocurre en el ensayo 3) o por exceso de fuerza de corte (lo que ocurre en los ensayos 5 a 7, 8 a 10, y 11 a 12).

Regresión lineal múltiple de la dimensión fractal

Las tablas siguientes de análisis de varianza demuestran que la dimensión fractal de la superficie se puede explicar en parte por las variaciones de parámetros significativos como la velocidad de corte V_c , la pasada radial ae y la interacción de esos dos parámetros.

Síntesis sobre los coeficientes						
Variable	Coefficiente	Ecart-Type	t Student	Confianza %	Riesgo %	Centrado
Vc	0,0215	0,0069	3,0996	98,87	1,13	Non
ae	2,1252	0,3569	5,9545	99,99	0,01	Non
Vc * ae	-0,0215	0,0073	-2,9545	98,56	1,44	-
Descomposición de la suma de cuadrados						
Fuente	Suma de Cuadrados	DoF	Cuadrados Medios	Fisher	Confianza %	Riesgo %
Regresión	53,9913	3	17,9971	37,3545	100	0
Residuos	4,8177	10	0,4818			
Total	58,8093	13	4,5238		$r^2 = 0,9181$	

Tabla 26. Regresión lineal múltiple de la dimensión fractal.

Numero de observaciones	Media	Ecart-Type:	DoF
13	0,1684	0,6089	12
Test de Normalidad : SHAPIRO ET WILK			
Estadística Calculada	Ley	Confianza %	Riesgo %
0,3614	NORMAL	100	0
La distribución es significativamente diferente de una ley normal.			

Tabla 27. Resultados de la regresión lineal de la dimensión fractal.

6.5. Evolución de la rugosidad de la pieza

El análisis, que se ha realizado con el microscopio Leica, como se mencionó en la parte de la metodología, ha permitido obtener de forma rápida (aproximadamente 6 minutos para cada una de las superficies a analizar), un mapeo en 3D de las superficies mecanizadas. A continuación, se muestran los gráficos de rugosidad para las diferentes condiciones de mecanizado obtenidos a partir de las imágenes proporcionadas por el microscopio confocal. Se han determinado los parámetros Sa, Sz y Sq.

Sa es la altura media aritmética. Este parámetro es la extensión del parámetro Ra (altura media aritmética de una línea) a una superficie. Da la media aritmética, en

valor absoluto, de la diferencia de altura de cada punto con respecto al plano medio de la superficie. Este parámetro se utiliza generalmente para evaluar la rugosidad de la superficie.

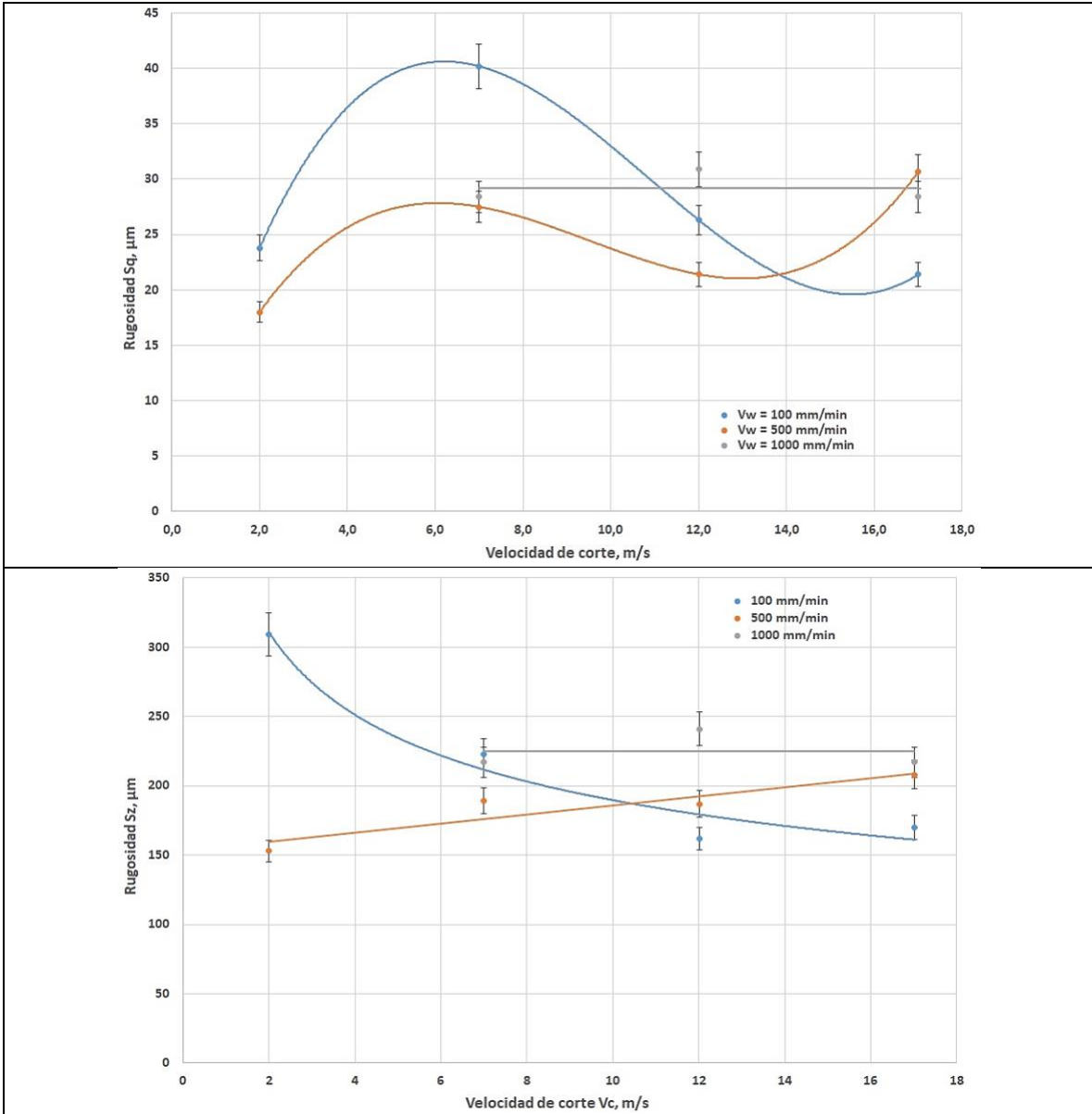
Sz representa la altura máxima. Este parámetro se define como la suma del valor de la altura máxima del pico y la mayor profundidad del pozo en el área definida.

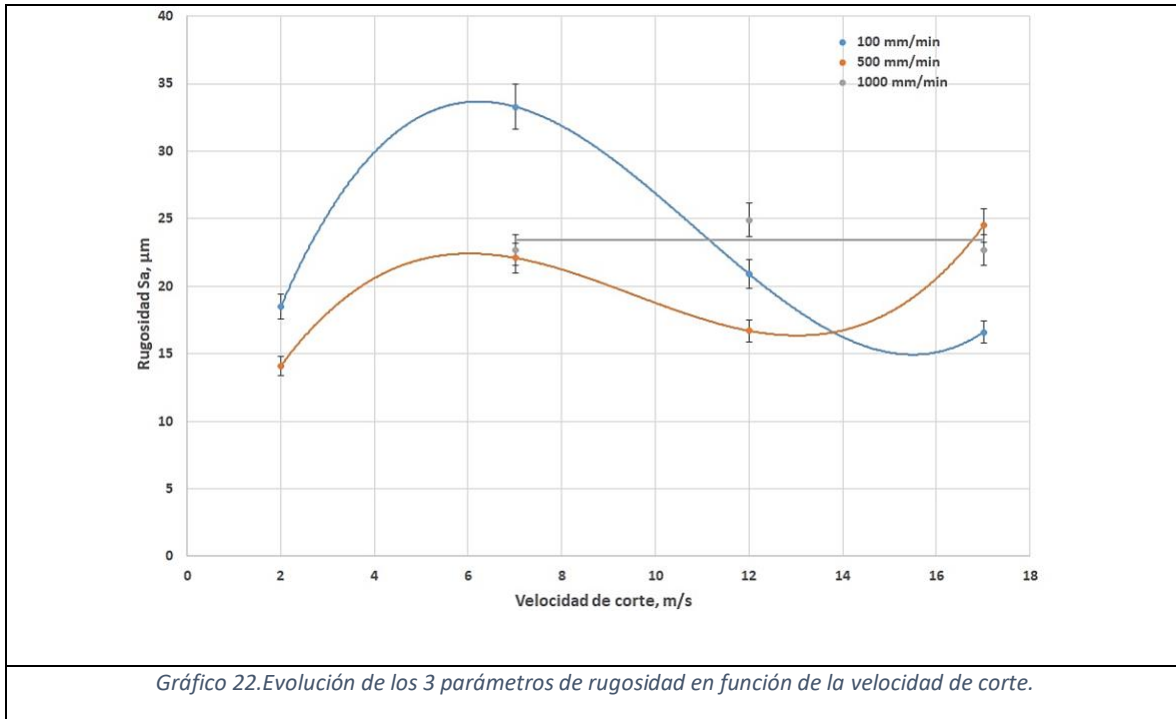
Sq es la media cuadrática de la altura. Este parámetro representa el valor de la media cuadrática de los valores de ordenadas en el área de definición. Es equivalente a la desviación estándar de alturas.

Los resultados de las medidas de rugosidad están detallados en la tabla 28 y las figuras a continuación.

Numero ensayo	Velocidad de avance mm/min	Velocidad de rotación rpm	Pasada axial ap mm	Pasada radial ae mm	Avance mm/rev	Velocidad de corte m/s	Rugosidad Sq μm	Rugosidad Sz μm	Rugosidad Sa μm
Ensayo 1	100	1529	6,5	1	0,065	2,0	23,8	309	18,5
Ensayo 2	100	5350	6,5	1	0,019	7,0	40,2	223	33,3
Ensayo 3	100	9172	6,5	1	0,011	12,0	26,3	162	20,9
Ensayo 4	100	12994	6,5	1	0,008	17,0	21,4	170	16,6
Ensayo 8	500	1529	6,5	1	0,327	2,0	18	153	14,1
Ensayo 7	500	5350	6,5	1	0,093	7,0	27,5	189	22,1
Ensayo 6	500	9172	6,5	1	0,055	12,0	21,4	187	16,7
Ensayo 5	500	12994	6,5	1	0,038	17,0	30,7	208	24,5
Ensayo 9	1000	12994	6,5	1	0,077	17,0	28,4	217	22,7
Ensayo 10	1000	9172	6,5	1	0,109	12,0	30,9	241	24,9
Ensayo12	1000	5350	6,5	1	0,187	7,0	28,4	217	22,7
Ensayo 11	100	12994	6,5	2,5	0,008	17,0	44	352	36,3

Tabla 28. Valores de rugosidad obtenidos en los diferentes ensayos realizados.



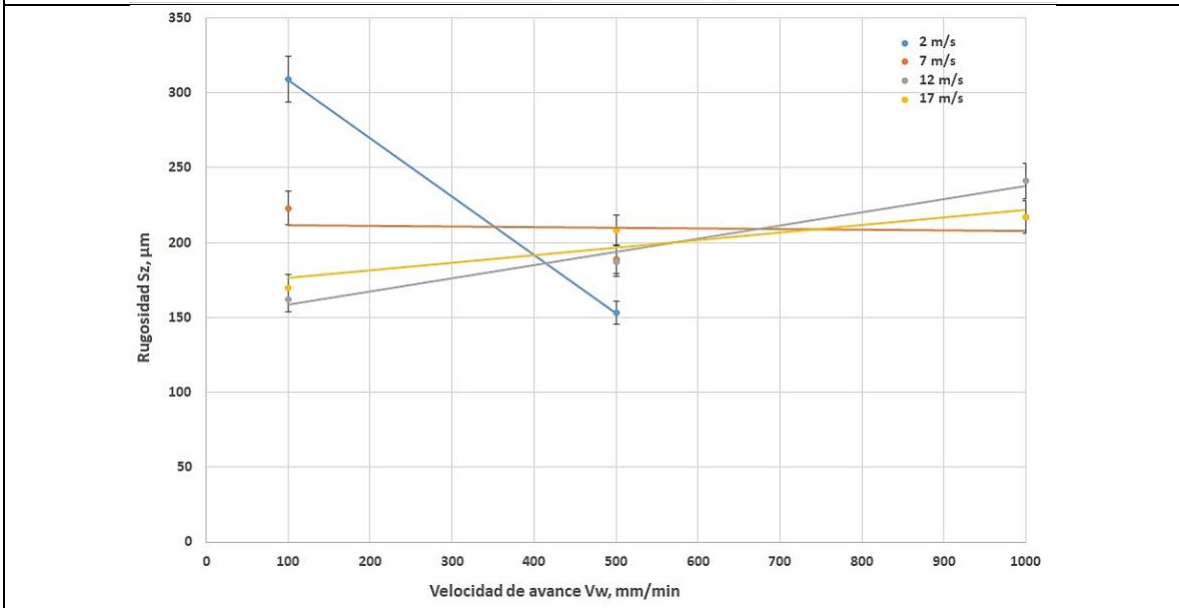
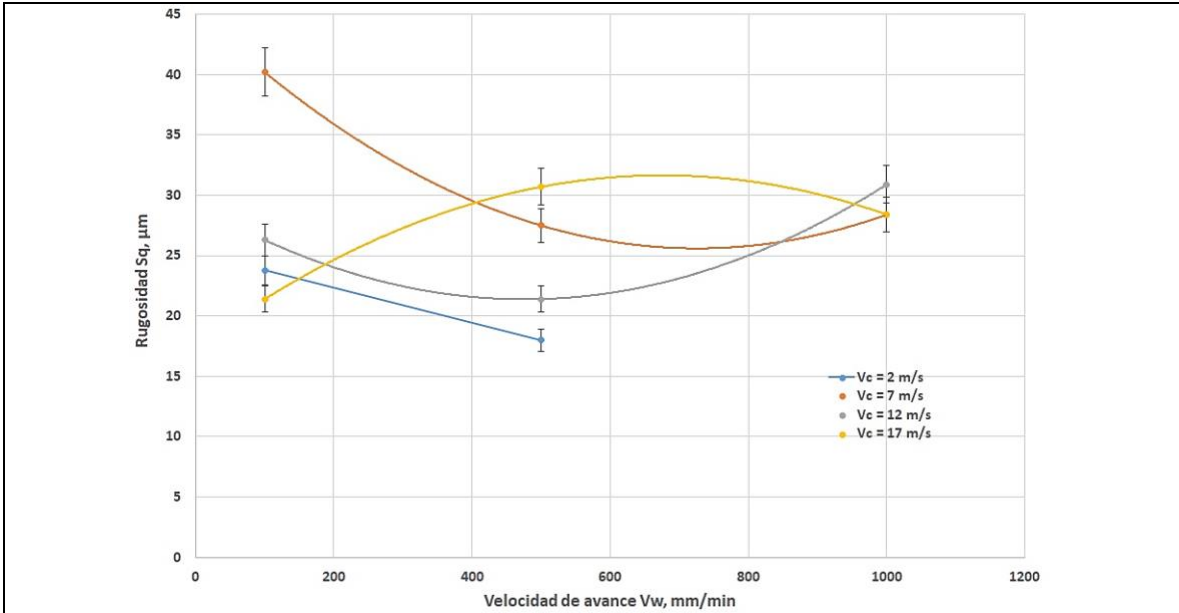


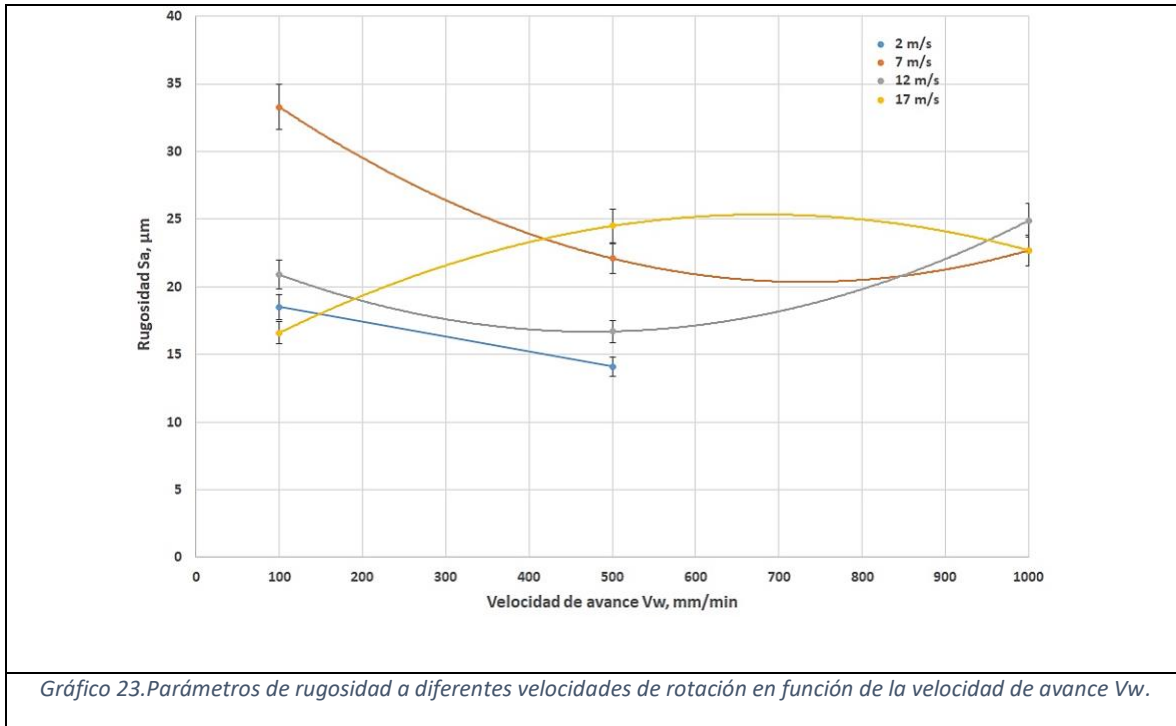
No hay un patrón destacable que relacione las rugosidades Sq, Sz o Sa con los parámetros del proceso, velocidad de corte o velocidad de avance.

A velocidad de avance de 1000 mm/min, los parámetros de rugosidad parecen constantes.

Las rugosidades Sq y Sa evolucionan de manera similar. Hasta una velocidad de corte de 14 m/s, esos parámetros Sq y Sa parecen disminuir cuando aumenta la velocidad de avance. Por encima de ese valor, el resultado es lo contrario.

La rugosidad Sz disminuye con la velocidad de corte a bajas velocidades de avance, pero aumenta con una velocidad de avance de 500 mm/min.





No hay tampoco un patrón claro de evolución de las rugosidades con la velocidad de avance.

A 100 mm/min y 1000 mm/min, los mejores resultados están asociados a una velocidad de corte de 17 m/s.

A 500 mm/min, las rugosidades se minimizan con una velocidad de corte baja (2 m/s).

Análisis de varianza de S_q

Las tablas siguientes de análisis de varianza demuestran que la rugosidad S_q se puede explicar en parte por las variaciones de parámetros significativos como la velocidad de avance V_w , la pasada radial ae y la interacción entre esos dos parámetros.

Variable	Coficiente	Desviación estandar	t Student	Confianza %	Riesgo %	Centrado	
Vw	0,1479	0,0633	2,3379	95,58	4,42	No	**
ae	26,3391	3,2486	8,1077	100	0	No	***
Vw * ae	-0,1465	0,0664	-2,2081	94,54	5,46	-	*
Descomposición de la suma de cuadrados							
Fuente	Suma de Cuadrados	DoF	Cuadrados Medios	Fisher	Confianza %	Riesgo %	
Regresión	9957,5174	3	3319,1725	83,1543	100	0	
Residuos	359,2426	9	39,9158				
Total	10316,76	12	859,73			r² = 0,9652	

Tabla 29. Datos para el desarrollo del ANOVA con respecto al parámetro de rugosidad Sq.

La velocidad de avance, la pasada radial y la interacción entre la velocidad de avance y pasada radial son los parámetros significativos del proceso. El coeficiente de regresión es muy bueno ($r = 0,9824$) con un valor de la prueba de Fisher muy alto. Eso significa que el modelo explica muy bien las variaciones del astillado máximo.

La prueba de normalidad de los residuos demuestra que la distribución es normal y que no hay parámetros olvidados que puedan explicar las variaciones de la rugosidad Sq.

Número de observaciones	Media	Desviación estandar	DoF
12	0	5,7148	11
Test de Normalidad : SHAPIRO ET WILK			
Eatdtistica Calculada	Ley	Confianza %	Riesgo %
0,9014	NORMAL	84,2113	15,7887
La distribución no es significativamente diferente de una ley normal.			

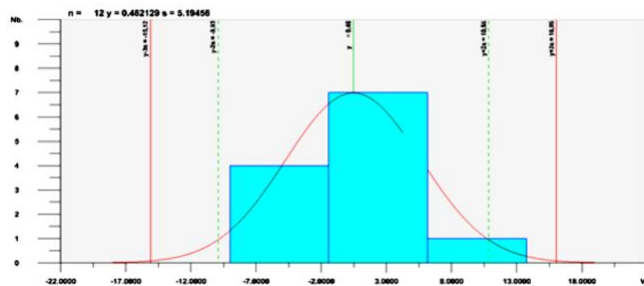


Gráfico 24. Resultado del análisis de ANOVA al parámetro Sq.

Análisis de varianza de Sz

Las tablas siguientes de análisis de varianza demuestran que la rugosidad Sz se puede explicar en parte por las variaciones de parámetros significativos como la velocidad de avance **Vw**, la pasada radial **ae** y la interacción entre esos dos parámetros.

Variable	Coficiente	Desviación estandar	t Student	Confianza %	Riesgo %	Centrado	
Vw	1,0428	0,4593	2,2704	95,07	4,93	Non	**
ae	202,4594	23,5864	8,5838	100	0	Non	***
Vw * ae	-1,0337	0,4819	-2,1452	93,95	6,05	-	*
Descomposición de la suma de cuadrados							
Fuente	Suma de Cuadrados	DoF	Cuadrados Medios	Fisher	Confianza %	Riesgo %	
Regresión	594943,217	3	198314,406	94,252	100	0	
Residuos	18936,7834	9	2104,087				
Total	613880	12	51156,6667			$r^2 = 0,9692$	

Tabla 30. Datos para el desarrollo del ANOVA con respecto al parámetro de rugosidad Sz.

La velocidad de avance, la pasada radial y la interacción entre la velocidad de avance y pasada radial son los parámetros significativos del proceso. El coeficiente de regresión es muy bueno ($r = 0,9845$) con un valor del test de Fisher muy alto. Eso significa que el modelo explica muy bien las variaciones del astillado máximo. El test de normalidad de los residuos demuestra que la distribución es normal y que no hay parámetros olvidados que puedan explicar las variaciones de la rugosidad Sz.

Número de observaciones	Media	Desviación estandar	DoF
12	0	41,4913	11
Test de Normalité : SHAPIRO ET WILK			
Eatdtistica Calculada	Ley	Confianza %	Riesgo %
0,8766	NORMAL	92,4441	7,5559
La distribución no es significativamente diferente de una ley normal.			

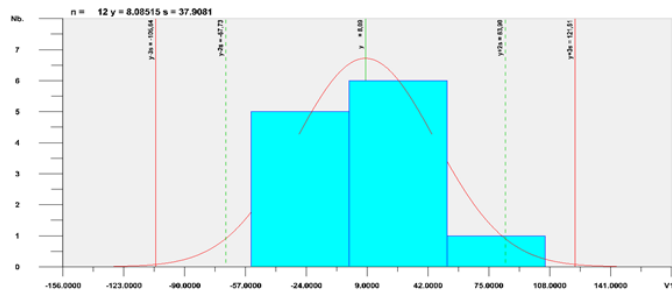


Gráfico 25. Resultado del análisis de ANOVA al parámetro Sq.

Análisis de varianza de Sa

Las tablas siguientes de análisis de varianza demuestran que la rugosidad Sq se puede explicar en parte por las variaciones de parámetros significativos como la velocidad de avance **Vw**, la pasada radial **ae** y la interacción entre esos dos parámetros.

Variable	Coeficiente	Desviación estandar	t Student	Confianza %	Riesgo %	Centrado	
Vw	0,1097	0,0551	1,9908	92,23	7,77	Non	*
ae	20,9855	2,8288	7,4186	100	0	Non	***
Vw * ae	-0,1085	0,0578	-1,8778	90,69	9,31	-	*
Descomposición de la suma de cuadrados							
Fuente	Suma de Cuadrados	DoF	Cuadrados Medios	Fisher	Confianza %	Riesgo %	
Regresión	6425,7702	3	2141,9234	70,7737	100	0	
Residuos	272,3798	9	30,2644				
Total	6698,15	12	558,1792				$r^2 = 0,9593$

Tabla 31. Datos para el desarrollo del ANOVA con respecto al parámetro de rugosidad Sa.

La velocidad de avance, la pasada radial y la interacción entre la velocidad de avance y pasada radial son los parámetros significativos del proceso. El coeficiente de regresión es muy bueno ($r = 0,9794$) con un valor del test de Fisher muy alto. Eso significa que el modelo explica muy bien las variaciones del astillado máximo. El test de normalidad de los residuos demuestra que la distribución es normal y que no hay parámetros olvidados que puedan explicar las variaciones de la rugosidad Sa.

Número de observaciones	Media	Desviación estándar	DoF
12	0	4,9761	11
Test de Normalité : SHAPIRO ET WILK			
Eatdtistica Calculada	Ley	Confianza %	Riesgo %
0,8871	NORMALE	89,655	10,345
La distribución no es significativamente diferente de una ley normal.			

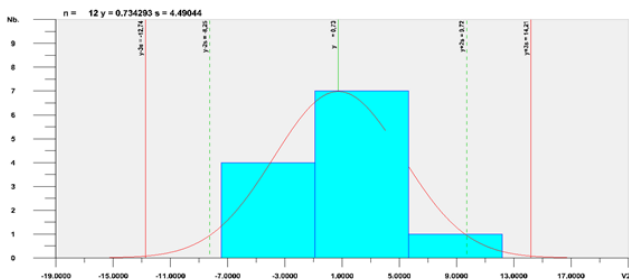


Gráfico 26. Resultado del análisis de ANOVA al parámetro Sa.

Al ser el SIGRASIC-LF un material fabricado por infiltración líquida y gaseosa, podría haber una relación entre la microestructura del material, y sobre todo las porosidades cerradas y reabiertas durante el mecanizado, y los resultados de medidas de rugosidades. La figura 54 siguiente presenta micrografías de la superficie mecanizada en la parte central del material donde se aprecian las porosidades reabiertas durante el mecanizado. No se aprecian diferencias de porosidad entre las diferentes condiciones de corte que podrían explicar los resultados de rugosidad y que se podría imputar a la calidad y microestructura del material.

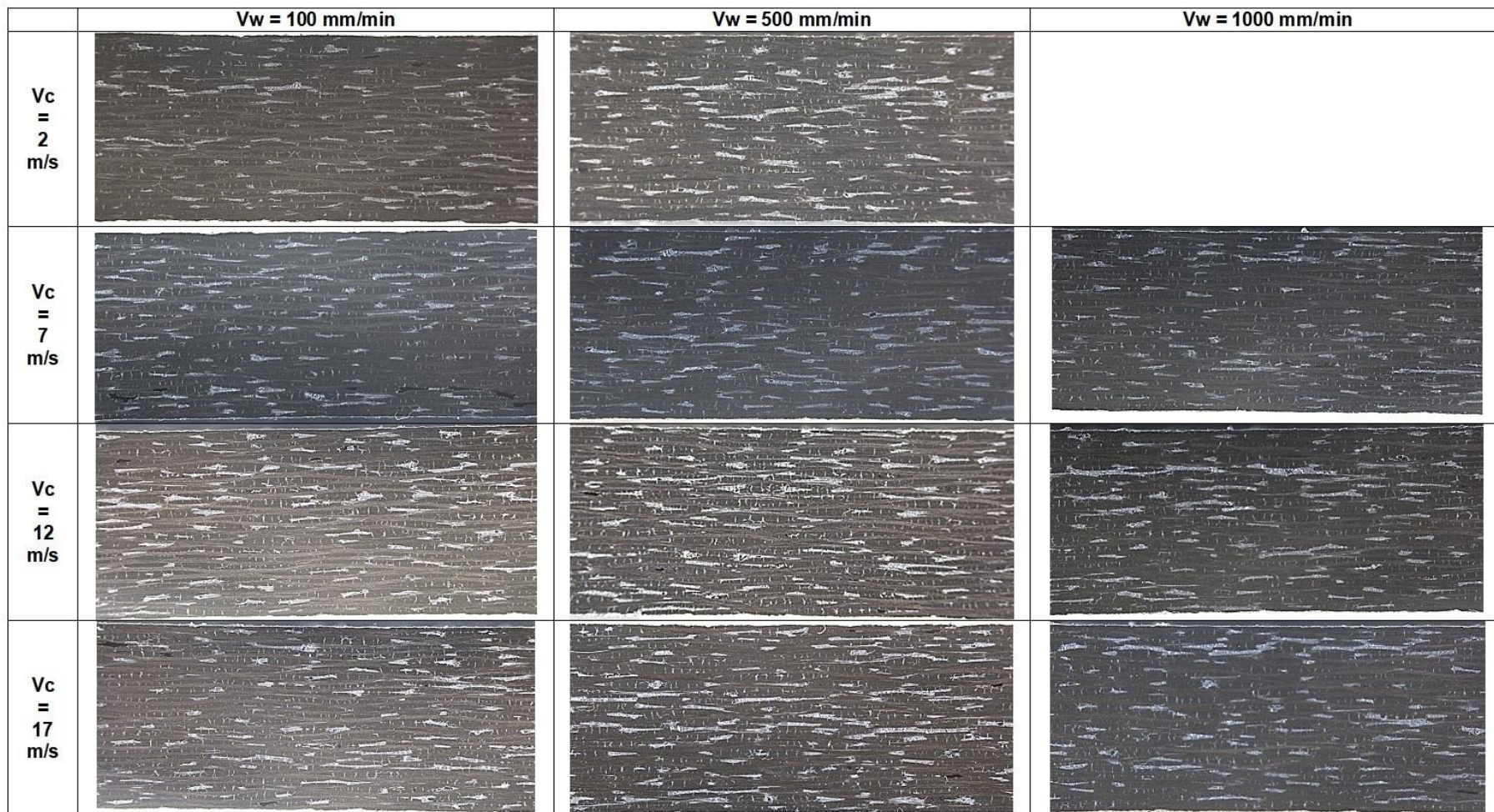


Figura 56. Micrografías de las superficies mecanizadas en función de los parámetros de corte ($a_2 = 1 \text{ mm}$; $a_p = 6,5 \text{ mm}$).

7. ASPECTOS ECONÓMICOS

Material SIGRASIC

Aunque se haya utilizado solamente una probeta de SIGRASIC-LF, se han comprado 10 probetas de 100 x 100 x 6,5 mm³ de cada uno de los tres grados de SIGRASIC, por el coste siguiente:

Material	Coste
SIGRASIC-MF	1.200,00 €
SIGRASIC-SF	1.200,00 €
SIGRASIC-LF	1.400,00 €
TOTAL MATERIALES Cf/SiC	3.800,00 €

Tabla 32. Costo de los CMC.

Herramientas

De la misma manera, se han comprado herramientas a dos proveedores, pero se ha utilizado únicamente una (MUELA DZY-N 25,0-10/12 D126).

Herramientas	Cantidad	Coste
Herramientas PFERD:		
MUELA DZY-N 15,0-10/10 D126	3	175,30
MUELA DZY-N 25,0-10/12 D126	3	274,46
MUELA BZY-N15,0-10/10 B126	3	187,25
DISCO D1A1 30-10-10 D151	3	212,45
DISCO B1A1 30-10-10 B151	3	253,91
Importe total Neto:		1.103,37
IVA:	21%	231,71
TOTAL:		1.335,08 €
Herramientas ETORKI:		
IAIW 30x15x4 Y=10x65 D-213 C50 - ITEM A	2	377,20
IAIW 30x15x4 Y=10x65 D-213 C100 - ITEM B	2	414,46
IAIW 30x15x4 Y=10x65 D-213 C150 - ITEM C	2	451,70
IAIW 30x15x4 Y=10x65 D-107 C-50 - ITEM D	2	377,20
IAIW 30x15x4 Y=10x65 D-107 C100 - ITEM E	2	414,46
IAIW 30x15x4 Y=10x65 D-107 C150 - ITEM F	2	451,70
Importe total Neto:		2.486,72

IVA:	21%	522,21
TOTAL:		3.008,93 €
TOTAL COSTE HERRAMIENTAS		4.344,01 €

Tabla 33. Costo de las herramientas a utilizar.

Mano de obra

Se tendrán en cuenta los gastos del personal comprometido directamente en el proyecto (investigadores, técnicos y personal auxiliar), incluyendo tanto los costes directos como indirectos, con la tarifa de los proyectos ELKARTEK del Gobierno Vasco:

Personal	Categoría	Coste horario	Horas	Total
Luis Hidrogo	Estudiante	0 €	1.000	0,00
Franck Girod	Ikerbasque	22,50 €	200	4.500,00
Unai Alonso	Profesor adjunto	22,50 €	100	2.250,00
Borja Izquierdo	Profesor agregado	22,50 €	50	1.125,00
Mario Renderos	Doctorando	22,50 €	50	1.125,00
TOTAL				9.000,00 €

Tabla 34. Costo de la mano de obra.

Uso de equipamientos

Se tienen en cuenta las tarifas SGiker en autoservicio.

Tipo de equipamiento	Coste horario	Horas	Total
Centro de mecanizado A6	100,00	25	2.500,00
Microscopio confocal Leika	10,00	25	250,00
Microscopio óptico	5,00	25	125,00
Dinamometro Kistler	10,00	25	250,00
TOTAL			3.125,00 €

Tabla 35. Costo del uso de los equipamientos para la elaboración del proyecto.

Coste del Proyecto

Tipo de gasto	Total
Materiales	3.800,00
Herramientas	4.344,01
Mano de obra	9.000,00
Uso de equipos	3.125,00
TOTAL	20.269,01 €

Tabla 36. Costo total del proyecto.

8. CONCLUSIONES

8.1 Sobre objetivos

A partir de lo expuesto en el trabajo de fin de máster podemos llegar a las siguientes conclusiones.

Los materiales de matriz cerámica están en un auge en los últimos años. Su información es muy limitada, ya que, no se han hecho estudios sistemáticos en los últimos años para analizar de forma correcta el mecanizado de esos materiales CMC.

Se ha hecho una revisión bibliográfica amplia sobre esos materiales teniendo en cuenta las diferentes familias (pero limitado a Cf/C, Cf/SiC y SiCf/SiC), sus procesos de fabricación, sus aplicaciones industriales y sus procesos de mecanizado. Se ha completado por tanto el **Objetivo #1 Revisión del estado del arte.**

Se ha analizado los diferentes procesos de mecanizado, los mecanismos de corte tanto con herramientas de corte como con herramientas abrasivas. Se ha analizado en detalle resultados anteriores de mecanizado con herramienta abrasiva y determinado los parámetros de corte y de la herramienta interesantes para una investigación sobre el mecanizado abrasivo de esos materiales. Por lo tanto, se ha completado el **Objetivo #2 Estudio de los procesos de mecanizado abrasivo.**

Se ha definido unas bases metodológicas para desarrollar los ensayos y poder obtener la mayor cantidad de información necesaria para sentar las bases de futuros ensayos o campaña experimental sobre esos materiales. Por lo cual, se ha logrado el **Objetivo #3 Definir la metodología de ensayos.**

Con los materiales y las herramientas seleccionados, se ha podido realizar una campaña de ensayos, necesaria para una campaña posterior más ambiciosa y completa. El **Objetivo #4 Realizar campaña de ensayos previos** se ha completado.

Además, el análisis de los resultados obtenidos de esos ensayos ha permitido llegar a las conclusiones siguientes.

8.2 La herramienta

La muela abrasiva es un factor fundamental para el mecanizado. La calidad del mecanizado depende de sus características y su reproducibilidad. La elección de granos debe limitarse a rangos con baja disparidad de tamaño de grano.

La realización de la herramienta por depósito químico con un crimpado normal debería permitir aumentar la vida útil de la herramienta en al menos un 30% por un costo de compra equivalente. Este nuevo crimpado debería mejorar la capacidad de corte de la herramienta, con bordes de corte más claros y mejor evacuación de viruta. Habrá que comprobar durante el primer mecanizado con este tipo de herramienta, que los granos de diamante no sean expulsados del aglomerante bajo la fuerza de corte, lo que reduciría la vida útil de la herramienta. Si limitamos el esfuerzo de corte, este fenómeno no debería ocurrir. Se ha realizado un pedido de herramientas en este sentido (herramientas ETORKI) y el mecanizado se iniciará en el último trimestre de 2021. Se estudiará la influencia de la cantidad de diamante, de su crimpado y de su tamaño.

El estudio de las herramientas no mostró ninguna variación significativa en el desgaste en función de los parámetros de corte. Excepto en el caso de alta fuerza de corte, donde los granos de diamante se rompen, eliminando la potencia de corte de la herramienta. Otro fenómeno debe tomarse en cuenta: la flexión de la herramienta. Esto no se observó en nuestro caso (diámetro del mango de la herramienta 12 mm). Por otro lado, Danglot lo había observado para fuerzas superiores a 100 N pero con un mango de 6 mm de diámetro.

El valor de la fuerza de corte debe limitarse para no dañar la herramienta.

Al momento de analizar los daños de las herramientas, existe una gran limitante que es el hecho que es muy complicado analizar la misma superficie, aunque se trató

de marcar de una forma no destructiva a la herramienta se complica la situación de analizar el mismo grano o conjunto de granos si existe un daño en el mismo.

Para facilitar ese análisis con el microscopio confocal, será necesario indexar la herramienta y su porta-herramienta para analizar siempre la misma zona activa y poder comparar el estado de los granos de diamante en función del número de ensayo. La dimensión fractal parece ser un buen indicador del desgaste de la herramienta siempre y cuando se analice la misma zona y que la superficie analizada tenga una dimensión suficiente y representativa. Es necesario también, tener buenas fotos de la zona analizada para poder determinar cómo se desgastan los granos (desgaste por abrasión, ruptura por hendidura...).

El análisis de varianza demuestra también que las variaciones de la dimensión fractal D no se pueden explicar únicamente con las variaciones de los parámetros de velocidad de corte V_c y de pasada radial a_e , ya que la distribución de los residuos del modelo no sigue una ley normal. Eso significa que hay otros parámetros significativos que no hemos tenido en cuenta, como por ejemplo la fuerza normal F_n . De la misma manera no se ha podido definir un modelo que explique las variaciones de la variación de la dimensión fractal ΔD con respecto al ensayo anterior.

8.3 El material

El análisis del material antes del mecanizado revela porosidades, pero sin fisuras múltiples de la matriz. El mecanizado de este material genera roturas de pequeñas porciones de material en superficie (astillado) y al final del mecanizado. No se han notado la presencia de grietas. Este astillado puede ser perjudicial para las características mecánicas del material.

El acabado de la superficie no cambia al aumentar la profundidad de corte. Mejora notablemente si la velocidad de rotación es alta. El acabado superficial obtenido puede considerarse como bastante bueno.

Las dimensiones del astillado medidas en la superficie del material aumentan si se aumenta la profundidad de corte y si disminuye la velocidad de rotación.

No se observó delaminación. Esto se explica por el hecho de que no hay esfuerzos en el sentido interlaminar.

Los parámetros de rugosidad o de acabado superficial son afectados directamente por la velocidad de avance y la velocidad de corte. El análisis de los parámetros de rugosidad concluye que los mejores acabados están presentes a velocidades de avance más bajas y velocidades de corte más altas.

8.4 Esfuerzos de corte

Las fuerzas de corte cambian según los parámetros. Su aumento lineal está ligado al aumento de la profundidad del pase y al aumento de la velocidad de avance. Disminuyen exponencialmente en función del aumento de la velocidad de corte de la herramienta. El rango de fuerzas registradas es amplio, desde unos N hasta 60 N.

La fuerza normal está relacionada principalmente con la velocidad de avance, la profundidad de corte y la interacción de la velocidad de avance con la velocidad de corte.

No se verifica el mecanizado con las condiciones de corte del rectificado (velocidad de rotación muy alta, avance muy rápido y profundidad de corte baja), preconizados por los fabricantes de herramientas para limitar la fuerza de corte.

El mecanizado con las condiciones de corte del fresado (velocidad de rotación moderada, avance limitado y alta profundidad de corte) permite un alto flujo de material para fuerzas de corte moderadas.

El uso de los resultados nos permite elegir una velocidad de corte entre 12 y 17 m/s, correspondiente a fuerzas inferiores a 50 N. Una velocidad inferior genera fuerzas demasiado elevadas. Una velocidad más rápida prácticamente ya no reduce los esfuerzos y requiere la compra de husillos T.G.V. (muy alta velocidad) que son

costosos y difíciles de usar industrialmente. Una velocidad de corte entre 12 y 17 m/s corresponde a las posibilidades de nuestras máquinas herramienta y debe recomendarse.

La fuerza tangencial es muy baja, sean cuales sean las condiciones de corte para un mecanizado en concordancia.

Se pudo comprobar lo planteado en la publicación de Danglot, que tanto el parámetro de velocidad de avance, velocidad de corte y profundidad de pasada, son fundamentales para el análisis de los mismo. Existe una distribución normal de los datos con una relación entre variables de 95% lo cual nos dice que la relación es directa entre cada una de las variables y cómo afecta los esfuerzos normales en la pieza.

Habrà que comprobar el efecto del mecanizado en oposición, aunque Danglot lo había descartado por fuerzas demasiado elevadas. En el caso del mecanizado en oposición, Danglot registró una fuerza tangencial multiplicada por 2 a 4. El mecanizado en concordancia debe utilizarse sistemáticamente para limitar las fuerzas de corte.

Parámetros de corte económicos

Representan la síntesis de los resultados obtenidos y se caracterizan por:

- una velocidad circunferencial del orden de 17 m/s. Este rango de velocidades corresponde a una velocidad de rotación compatible con las posibilidades de las máquinas-herramienta actuales, equipadas o no con multiplicadores de velocidad mecánicos.
- una velocidad de avance de 1000 mm/min.
- una profundidad de corte de 2,5 mm.

Estas condiciones de corte permiten una tasa de arranque de material de 15000 mm³/min. Este importante valor es treinta veces superior al indicado en la norma de los procesos de los fabricantes de muelas abrasivas.

Las fuerzas de corte son inferiores a 50 N. Esto nos asegura que no correremos ningún riesgo de dañar el material ni la herramienta. Se evitan los fenómenos de flexión de la herramienta y de ondulación de la superficie mecanizada.

9 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Dossier "L'industrie céramique en France", L'Industrie Céramique, n°872, 06/1992, p. 389-403.
- [2] Jacques Thébault et Pierre Olry, Les composites carbone/carbone, L'Actualité Chimique - mars-avril 2006 - n° 295-296, p. 47-51.
- [3] P. Morgan, Carbon fibers and their composites. CRC Press, Taylor and Francis Group, LLC, 2005.
- [4] Q. Zhou, S. Dong, Y. Ding, Z. Wang, Z. Huang, D. Jiang, Three-dimensional carbon fiber-reinforced silicon carbide matrix composites by vapor silicon infiltration, *Ceram. Inter.* 35 (2009) 2161-2169.
- [5] J.C. Margiotta, D. Zhang, D.C. Nagle, Microstructural evolution during silicon carbide (SiC) formation by liquid silicon infiltration using optical microscopy, *Int. J. Refrac. Met. Hard Mater.* 28 (2010) 191-197.
- [6] P. Sangsuwan, J.A. Orejas, J.E. Gatica, S.N. Tewari, M. Singh, Reaction-Bonded Silicon Carbide by Reactive Infiltration, *Ind. Eng. Chem. Res.* 40 (2001) 5191-5198.
- [7] A.S. Mukasyan, J.D.E. White, Electrically induced liquid infiltration for the synthesis of carbon/carbon-silicon carbide composite, *Ceram. Inter.* 35 (2009) 3291-3299.
- [8] J.C. Cavalier, A. Lacombe, J.M. Rouges, In developments in the science and technology of composite material, Elsevier, London, 1989, pp. 99-110.
- [9] M. Bahraini, J.M. Molina, M. Kida, L. Weber, J. Narciso, A. Mortensen, Measuring and tailoring capillary forces during liquid metal infiltration, *Current Opinion Solid State Mater. Sci.* 9 (2005) 196-201.
- [10] Y. Xu, Y. Zhang, L. Cheng, L. Zhang, J. Lou, J. Zhang, Preparation and friction behavior of carbon fiber reinforced silicon carbide matrix composites, *Ceram. Inter.* 33 (2007) 439-445.
- R.G. Joanna, Z. Antonios, Sintering activation by external electrical field, *Mater. Sci. Eng. A.* 287 (2000) 171-177.
- [11] Y. Wang, Z. Fu, Study of temperature field in spark plasma sintering. *Mater. Sci. Eng. B.* 90 (2002) 34-37.
- [12] A. Centeno, R. Santamaría, M. Granda, R. Menéndez, C. Blanco, Development of titanium-doped carbon/carbon composites, *J. Mater. Sci.* 44 (2009) 2525-2532.
- [13] James A. DiCarlo. Advances in SiC/SiC Composites for Aero-Propulsion. In *Ceramic Matrix Composites*, pages 217-235. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA, oct 2014.
- [14] Bernhard Heidenreich. C/SiC and C/C-SiC Composites. In *Ceramic Matrix Composites*, pages 147-216. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA, oct 2014.
- [15] Paolo Colombo, Gabriela Mera, Ralf Riedel, and Gian Domenico Soraru. Polymer-derived ceramics: 40 Years of research and innovation in advanced ceramics. *Journal of the American Ceramic Society*, 93(7):1805-1837, 2010.
- [16] See Hoon Lee, Markus Weinmann, and Fritz Aldinger. Processing and properties of C/Si-B-C-N fiber-reinforced ceramic matrix composites prepared by precursor impregnation and pyrolysis. *Acta Materialia*, 56(7):1529-1538, 2008.
- [17] Kent J. Probst, Theodore M. Besmann, David P. Stinton, Richard A. Lowden, Timothy J. Anderson, and Thomas L. Starr. Recent advances in forced-low, thermal-gradient CVI for refractory composites. *Surface and Coatings Technology*, 120-121:250-258, 1999.
- [18] Jacques Lamon. Chemical Vapor Infiltrated SiC/SiC Composites (CVI SiC/SiC). In Narottam P. Bansal, editor, *Handbook of Ceramic Composites*, chapter 3, pages 55-76. Kluwer Academic Publishers, 2005.

- [19] G. S. Corman and K. L. Luthra. Silicon Melt Infiltrated Ceramic Composites (HiPerComp™). In Narottam P. Bansal, editor, Handbook of Ceramic Composites, chapter 5, pages 99{115. Kluwer Academic Publishers US, 2005.
- [20] A. R. Bunsell and A. Piant. A review of the development of three generations of small diameter silicon carbide fibres. *Journal of Materials Science*, 41(3):823{839, 2006.
- [21] Bradley L. Wing and John W. Halloran. Microstress in the Matrix of a Melt-Infiltrated SiC/SiC Ceramic Matrix Composite. *Journal of the American Ceramic Society*, 38(1):42{49, 2017.
- [22] S Bertrand, C Droillard, R Pailler, X Bourrat, and R Naslain. TEM structure of (PyC/SiC). *Journal of the European Ceramic Society*, 20:1{13, 2000.
- [23] J. J. Brennan. Interfacial characterization of a slurry-cast melt-infiltrated SiC/SiC ceramic-matrix composite. *Acta Materialia*, 48(18-19):4619{4628, 2000.
- [24] J Pailler, Jacques L Lamon, and Roger R Naslain. Single- and Multilayered Interphases in SiC/SiC Composites Exposed to Severe Environmental Conditions : An Overview. *Applied Ceramic Technology*, 275:263{275, 2010.
- [25] Nasrin Al Nasiri, Niranjan Patra, Na Ni, Daniel D. Jayaseelan, and William E. Lee. Oxidation behaviour of SiC/SiC ceramic matrix composites in air. *Journal of the European Ceramic Society*, 36(14):3293{3302, 2016.
- [26] J. A. DiCarlo, H M. Yun, G. N. Morscher, and R. T. Bhatt. SiC/SiC Composites for 1200°C and Above. In Narottam P. Bansal, editor, Handbook of Ceramic Composites, chapter 4, pages 77{98. Kluwer Academic Publishers, 2005.
- [27] Savage G., Carbon/Carbon Composites, Chapman et Hall, 1993
- [28] Schmidt D.L., Davidson K.E., Theibert L.S., Unique applications of carbon/carbon composite materials, *Sampe Journal*, 1999, vol. 35 : Part 1, n° 3, p. 27-39 ; Part 2, n° 4, p. 51-63 ; Part 3, n° 5, p. 47-55.
- [29] J. Danglot, Usinage des matériaux composites thermostructuraux à matrice céramique, *Mémoire CNAM* n°258, 17 juin 1993.
- [30] F. Giroto, J.P. Lartigau, P. Cat, High speed abrasive milling of ceramic matrix composite materials, 1st French and German Conference on High Speed Machining, June 1997, Proceedings of the Conference, Editor J. Molinari, p. 351-355.
- [31] <https://imagej.nih.gov/ij/download.html>
- [32] Y.C. Li, X. Ge, H. Wang, Y.B. Hu, F.D. Ning, W.L. Cong, C.Z. Ren, Study of material removal mechanisms in grinding of C/SiC composites via single-abrasive scratch tests, *Ceram. Int.* 45 (4) (2019) 4729–4738.
- [33] K. Ding, Y.C. Fu, H.H. Su, X.B. Gong, Effect of C/SiC composites material structure on grinding forces and machined surface quality, *China Mech. Eng.* 24 (14) (2013) 1886–1890.
- [32] Staniewicz-Brudnik, B., Bączek, E., Skrabalak, G., 2015. The New Generation of Diamond Wheels with Vitrified (Ceramic) Bonds, *Sintering Techniques of Materials*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/59503>
- [33] Gavalda Diaz, O., Garcia Luna, G., Liao, Z., Axinte, D., 2019. The new challenges of machining Ceramic Matrix Composites (CMCs): Review of surface integrity. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 139, 24–36. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2019.01.003>
- [34] An, Q., Chen, J., Ming, W., Chen, M., 2021. Machining of SiC ceramic matrix composites: A review. *Chin. J. Aeronaut.* 34, 540–567. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2020.08.001>.

- [35] J. Liu, H.B. Li, X.Y. Zhang, Z.L. Hong, Z.B. He, Y. Zhang, Investigation of grinding characteristics and removal mechanisms of 2D-C/SiC in high speed deep grinding, *Acta Mater. Compos. Sin.* 29 (4) (2012) 113–118.
- [36] Q. Liu, G.Q. Huang, X.P. Xu, Surface forming mechanism of grinding 2D-C/SiC Composites, *J. Fuzhou Univ. (Nat. Sci. Ed.)* 46 (2) (2018) 228–233.
- [36] Attanasio, A., Ceretti, E., Giardini, C., 2013. Analytical Models for Tool Wear Prediction During AISI 1045 Turning Operations. *Procedia CIRP*, 14th CIRP Conference on Modeling of Machining Operations (CIRP CMMO) 8, 218–223. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.06.092>.
- [37] Polini, W., Turchetta, S., 2005. Evaluation of diamond tool wear. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 26, 959–964. <https://doi.org/10.1007/s00170-004-2091-x>
- [38] Ardashev, D.V., 2015. Mathematic Model of the Blunting Area of an Abrasive Grain in Grinding Processes, with Account of Different Wear Mechanisms. *Procedia Eng.*, International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2015) 129, 500–504. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.049>
- [39] Twardowski, P., Wiciak-Pikuła, M., 2019. Prediction of Tool Wear Using Artificial Neural Networks during Turning of Hardened Steel. *Materials* 12, 3091. <https://doi.org/10.3390/ma12193091>
- [40] Huang, Z., Zhu, J., Lei, J., Li, X., Tian, F., 2021. Tool Wear Monitoring with Vibration Signals Based on Short-Time Fourier Transform and Deep Convolutional Neural Network in Milling. *Math. Probl. Eng.* 2021, e9976939. <https://doi.org/10.1155/2021/9976939>
- [41] Palanisamy, P., Rajendran, I., Shanmugasundaram, S., 2008. Prediction of tool wear using regression and ANN models in end-milling operation. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 37, 29–41. <https://doi.org/10.1007/s00170-007-0948-5>
- [42] Alajmi, M.S., Almeshal, A.M., 2020. Predicting the Tool Wear of a Drilling Process Using Novel Machine Learning XGBoost-SDA. *Materials* 13, 4952. <https://doi.org/10.3390/ma13214952>
- [43] Xiang, J., Pang, S., Xie, L., Gao, F., Hu, X., Yi, J., Hu, F., 2018. Mechanism-Based FE Simulation of Tool Wear in Diamond Drilling of SiCp/Al Composites. *Materials* 11, 252. <https://doi.org/10.3390/ma11020252>
- [44] Sahoo, P., Barman, T., Davim, J.P., 2011. Fractal Analysis in Machining, *SpringerBriefs in Computational Mechanics*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-17922-8>
- [45] Zahouani, H., Vargiolu, R., Loubet, J.-L., 1998. Fractal models of surface topography and contact mechanics. *Math. Comput. Model., Recent Advances in Contact Mechanics* 28, 517–534. [https://doi.org/10.1016/S0895-7177\(98\)00139-3](https://doi.org/10.1016/S0895-7177(98)00139-3)
- [46] Shelberg, M., Lam, N., Moellering, H., 1983. Measuring the Fractal Dimensions of Surfaces 11.
- [47] Clarke, K.C., 1986. Computation of the fractal dimension of topographic surfaces using the triangular prism surface area method. *Comput. Geosci.* 12, 713–722. [https://doi.org/10.1016/0098-3004\(86\)90047-6](https://doi.org/10.1016/0098-3004(86)90047-6)
- [48] Dubuc, B., Zucker, S.W., Tricot, C., Quiniou, J.F., Wehbi, D., Berry, M.V., 1989. Evaluating the fractal dimension of surfaces. *Proc. R. Soc. Lond. Math. Phys. Sci.* 425, 113–127. <https://doi.org/10.1098/rspa.1989.0101>

- [49] Zahouani, H., Vargiolu, R., Loubet, J.-L., 1998. Fractal models of surface topography and contact mechanics. *Math. Comput. Model., Recent Advances in Contact Mechanics* 28, 517–534. [https://doi.org/10.1016/S0895-7177\(98\)00139-3](https://doi.org/10.1016/S0895-7177(98)00139-3)
- [50] Zuo, X., Zhu, H., Zhou, Y., Li, Y., 2015. A new method for calculating the fractal dimension of surface topography. *Fractals* 23, 1550022. <https://doi.org/10.1142/S0218348X1550022X>
- [51] Clarke, K.C., 1986. Computation of the fractal dimension of topographic surfaces using the triangular prism surface area method. *Comput. Geosci.* 12, 713–722. [https://doi.org/10.1016/0098-3004\(86\)90047-6](https://doi.org/10.1016/0098-3004(86)90047-6)
- [52] Li, H., Qiu, L., Zhang, S., Tan, J., Wang, Z., Liu, X., 2020. A surface modeling method for product virtual assembly based on the root mean square of the regional residuals. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.* 234, 229–242. <https://doi.org/10.1177/0954405419856764>
- [53] Schepers, H.E., van Beek, J.H.G.M., Bassingthwaighe, J.B., 2002. Four Methods to Estimate the Fractal Dimension from Self-Affine Signals. *IEEE Eng. Med. Biol. Mag. Q. Mag. Eng. Med. Biol. Soc.* 11, 57–64. <https://doi.org/10.1109/51.139038>
- [54] Shen, J., Gong, Y., Meng, H., Yang, J., 2018. The Fractal Characterization of Mechanical Surface Profile Based on Power Spectral Density and Monte-Carlo Method. *E3S Web Conf.* 38, 04013. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20183804013>
- [55] Schepers, H.E., van Beek, J.H.G.M., Bassingthwaighe, J.B., 2002. Four Methods to Estimate the Fractal Dimension from Self-Affine Signals. *IEEE Eng. Med. Biol. Mag. Q. Mag. Eng. Med. Biol. Soc.* 11, 57–64. <https://doi.org/10.1109/51.139038>
- [56] Zahouani, H., Vargiolu, R., Loubet, J.-L., 1998. Fractal models of surface topography and contact mechanics. *Math. Comput. Model., Recent Advances in Contact Mechanics* 28, 517–534. [https://doi.org/10.1016/S0895-7177\(98\)00139-3](https://doi.org/10.1016/S0895-7177(98)00139-3)
- [57] Pareja, G., 1984. Fitting a logistic curve to population size data. *Retrospect. Theses Diss.* <https://doi.org/10.31274/rtid-180813-5377>
- [58] Zahouani, H., Vargiolu, R., Loubet, J.-L., 1998. Fractal models of surface topography and contact mechanics. *Math. Comput. Model., Recent Advances in Contact Mechanics* 28, 517–534. [https://doi.org/10.1016/S0895-7177\(98\)00139-3](https://doi.org/10.1016/S0895-7177(98)00139-3)
- [59] Zuo, X., Zhu, H., Zhou, Y., Li, Y., 2015. A new method for calculating the fractal dimension of surface topography. *Fractals* 23, 1550022. <https://doi.org/10.1142/S0218348X1550022X>
- [60] Li, H., Qiu, L., Zhang, S., Tan, J., Wang, Z., Liu, X., 2020. A surface modeling method for product virtual assembly based on the root mean square of the regional residuals. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.* 234, 229–242. <https://doi.org/10.1177/0954405419856764>
- [61] Clarke, K.C., 1986. Computation of the fractal dimension of topographic surfaces using the triangular prism surface area method. *Comput. Geosci.* 12, 713–722. [https://doi.org/10.1016/0098-3004\(86\)90047-6](https://doi.org/10.1016/0098-3004(86)90047-6)
- [62] Li, H., Qiu, L., Zhang, S., Tan, J., Wang, Z., Liu, X., 2020. A surface modeling method for product virtual assembly based on the root mean square of the regional residuals. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.* 234, 229–242. <https://doi.org/10.1177/0954405419856764>
- [63] Schepers, H.E., van Beek, J.H.G.M., Bassingthwaighe, J.B., 2002. Four Methods to Estimate the Fractal Dimension from Self-Affine Signals. *IEEE Eng. Med. Biol. Mag. Q. Mag. Eng. Med. Biol. Soc.* 11, 57–64. <https://doi.org/10.1109/51.139038>

ANEXO I: Las propiedades mecánicas del SIGRABOND® Standard y sus precios.

Las propiedades mecánicas y el coeficiente de expansión del SIGRABOND® Standard aparecen en la Tabla 7.

Typical properties	Units	Standard
Density	g/cm ³	1.5
Flexural strength	MPa	150
Flexural modulus	GPa	60
Tensile strength	MPa	350
Interlaminar shear strength	MPa	8
Ash content	ppm	1000
Ash content (purified grade)	ppm	< 10
Max. application temperature	°C [°F]	2000 [3600] in vacuum or inert gas

Tabla 37. Propiedades del SIGRABOND® Standard

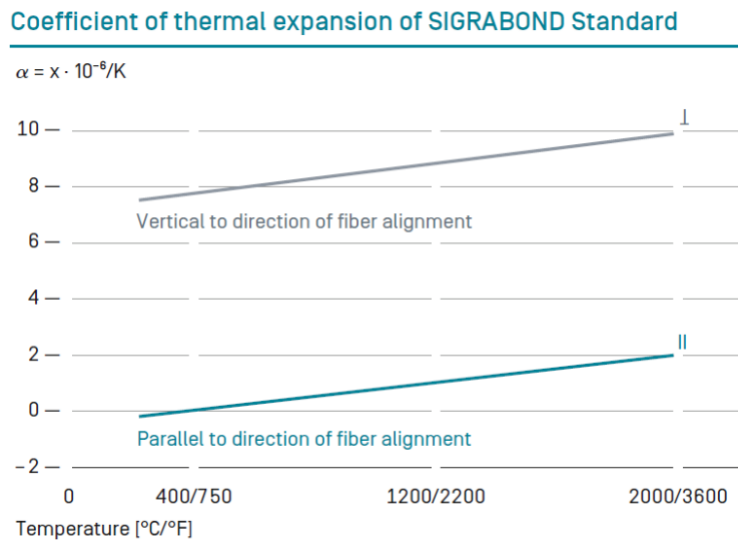


Gráfico 27. Propiedades del SIGRABOND® Standard

At a glance

SIGRASIC products derive their extraordinary properties from carbon fiber-reinforced silicon carbide (C/SiC) – a composite material that combines carbon fibers within a ceramic matrix to maximize the properties of both materials.

- Hard and ductile instead of being brittle
- High resistance to most corrosive and abrasive media
- Near net shape processing by in situ joining
- Adjustable properties to meet specific customer requirements
- High thermal-mechanical fatigue and high thermal shock resistance



- High heat resistance – up to 1200 °C
- Technology established within automotive serial production of brake disks

Figura 57. Propiedades globales del SIGRASIC® y proceso de fabricación.

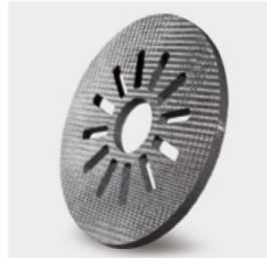
Application examples for our C/SiC



↑ NASA sensor carrier; designed for low weight, high precision and high stiffness



↑ Pump impeller for highly corrosive and abrasive media



↑ [High performance] clutch disk mass produced for cars/vehicles with excellent wear and strength properties



↑ Ballistic protection with complex shaped designs and high hardness properties

Manufacturing route

C/SiC is manufactured by infiltrating a carbon fiber-reinforced carbon body with silicon. Due to near net shape processing, complex machining can be performed cost-effectively early in

the process. Final ceramic grinding can be used locally when tight tolerances are required. By suitable adjustment of the material and process parameters, the product characteristics can be matched to the intended use of the SIGRASIC component.



Figura 58. Propiedades globales del SIGRASIC® y proceso de fabricación.

Material data and microstructure of the different SIGRASIC® material types

Typical properties	Units	Milled fibers [MF]	Short fibers [SF]	Long fibers [LF]
Density	g/cm ³	2.7 – 3.0	2.1 – 3.0	1.8 – 2.2
Bending strength	MPa	130 – 350	50 – 90	150 – 230
Young's modulus	GPa	150 – 330	30 – 60	50 – 80
Elongation at break	%	0.01 – 0.05	0.3 – 0.5	0.4 – 0.6
Thermal conductivity [20 °C]	W/(mK)	110 – 160	20 – 60	13 – 20
Thermal expansion [20 – 200 °C]	µm/(mK)	2.9 – 3.5	1.8 – 2.3	0.3 – 0.5
Temperature resistance*	°C	1400	1400	1400

* in non-oxidizing environments

- Technical properties are customizable for individual purposes
- Base materials can be designed with the relevant content and type of carbon fibers



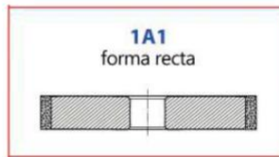
Tabla 38. Diferentes tipos de SIGRASIC® y propiedades mecánicas y físicas asociadas.

Los precios de las diferentes versiones de SIGRASIC® para planchas de 100 mm x 100 mm x 6,5 mm son de:

- SIGRASIC® MF: 120 €
- SIGRASIC® SF: 120 €
- SIGRASIC® LF: 140 €

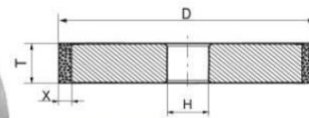
ANEXO II: Ejemplos de herramientas propuestas por ETORKI para este estudio, diagrama de la herramienta y precios.

<p>M7-00</p>	<p>Ligante metálico innovador. Para el rectificado profundo de piezas y herramientas de metal duro y acero rápido en máquinas CNC solo en húmedo. Recomendado para fabricación de herramientas de corte. El ligante tiene las más altas propiedades de corte, de durabilidad y de mantenimiento del perfil de nuestros ligantes metálicos.</p>	<p>Velocidad de la muela: Muela de diamante $V_c=15 \dots 25$ m/s muela de CBN $V_c=$ hasta 35 m/s Avance longitudinal $V_f=0,05$ m/min Profundidad de rectificado $a_e =$ hasta 6,0 mm</p>
<p>M7-01</p>	<p>Ligante metálico innovador. Para el rectificado profundo de piezas y herramientas de metal duro y acero rápido en máquinas CNC solo en húmedo. Recomendado para fabricación de herramientas de corte. El ligante tiene las más altas propiedades de corte, de durabilidad y de mantenimiento del perfil de nuestros ligantes metálicos. Trabaja con mayor avance que el ligante M7-00.</p>	<p>Velocidad de la muela: Muela de diamante $V_c=15 \dots 25$ m/s muela de CBN $V_c=$ hasta 35 m/s Avance longitudinal $V_f=0,05 - 0,08$ m/min Profundidad de rectificado $a_e =$ hasta 6,0 mm</p>

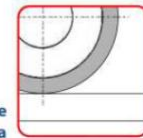


Aplicación:

- Rectificado de ranuras de herramienta de corte de metal duro
- Corte de las enclavaduras en la fabricación de herramientas de corte de metal duro
- Mecanización de superficies cilíndricas, cónicas y planas, y agujeros cónicos

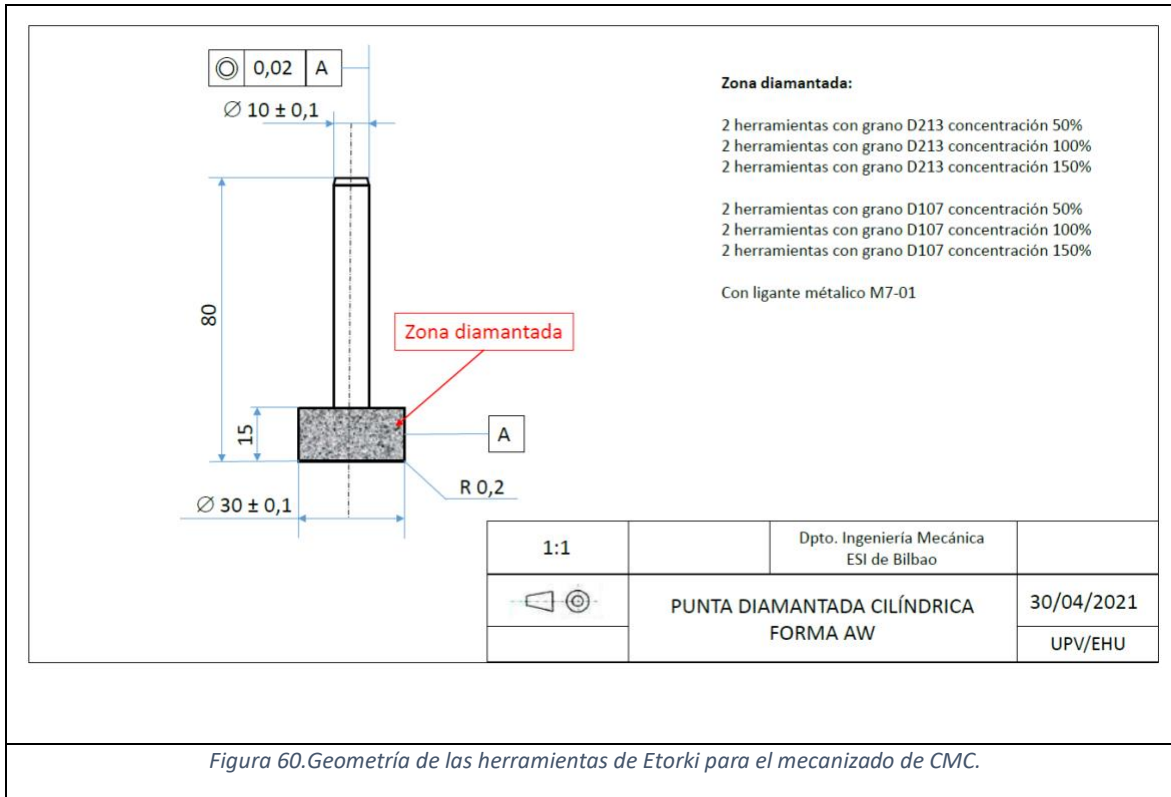


1A1 D*T*X*H



Procesamiento de la superficie plana

Figura 59. Muelas por utilizar.

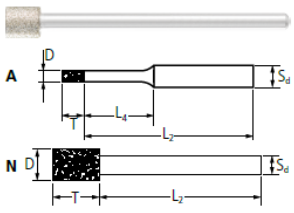


La empresa nos ha hecho la oferta siguiente, con un plazo de entrega de 5 semanas.

Referencia herramienta	Precio sin IVA
1A1W 30x15x4 D-213 C50	188,60 €
1A1W 30x15x4 D-213 C100	207,23 €
1A1W 30x15x4 D-213 C150	225,85 €
1A1W 30x15x4 D-107 C50	188,60 €
1A1W 30x15x4 D-107 C100	207,23 €
1A1W 30x15x4 D-107 C150	225,85 €

Figura 61. Coste de las herramientas.


ANEXO III: Herramienta de diamantar las herramientas de la empresa PFERD



Forma cilíndrica ZY

La forma cilíndrica ZY es adecuada para el desbaste de orificios, radios y contornos en el uso estacionario y el trabajo manual. Las muelas con un diámetro a partir de 8 mm tienen una cavidad en la parte delantera.

A = Mango rebajado
N = Mango no rebajado








Recomendaciones de uso:

- Amolado seco: 8–18 m/s
- Amolado húmedo: 15–25 m/s

Nota para pedido:

- Por favor, indicar el tamaño de grano.

PFERDVALUE:

D x T [mm]	S _d [mm]	L ₂ [mm]	L ₁ [mm]	Grano				Referencia	
				D 64	D 91	D 126	D 181		
				EAN 4007220					
ø mango 6 mm									
6,0 x 6	6	54	19	-	260920	119259	260937	1	DZY-A 6,0-6/6 ...
7,0 x 8	6	52	-	-	-	119266	-	1	DZY-N 7,0-8/6 ...
8,0 x 8	6	52	-	-	260968	119273	260975	1	DZY-N 8,0-8/6 ...
9,0 x 8	6	52	-	-	-	258040	-	1	DZY-N 9,0-8/6 ...
10,0 x 8	6	52	-	-	260982	119280	260999	1	DZY-N 10,0-8/6 ...
12,0 x 8	6	52	-	-	261002	119297	261019	1	DZY-N 12,0-8/6 ...
15,0 x 10	6	50	-	-	-	119303	-	1	DZY-N 15,0-10/6 ...
18,0 x 10	6	50	-	-	-	258163	-	1	DZY-N 18,0-10/6 ...
20,0 x 10	6	50	-	-	-	258194	-	1	DZY-N 20,0-10/6 ...
ø mango 10 mm									
15,0 x 10	10	110	-	-	-	355091	-	1	DZY-N 15,0-10/10 ...
ø mango 12 mm									
25,0 x 10	12	110	-	-	-	355138	-	1	DZY-N 25,0-10/12 ...

Figura 62. Muelas diamantadas con granos de diamante y ligante galvánico de la empresa PFERD y dimensiones existentes.

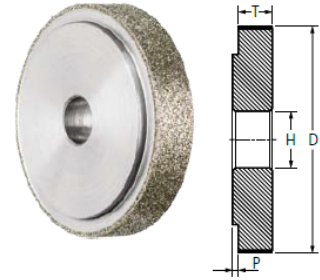
Discos de amolar 1A1

Los discos de amolar de diamante se utilizan de forma estacionaria. A partir de un diámetro exterior de 18 mm tienen un diámetro de referencia que permite la alineación y el montaje exacto en el husillo de la máquina. Con la elección de un mandril de sujeción estable, es posible un mecanizado óptimo de agujeros profundos o grandes longitudes de agujero.

Recomendaciones de uso:

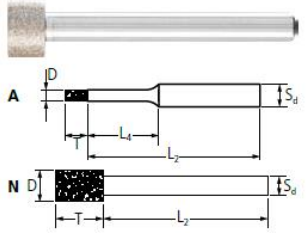
- Amolado seco: 8–18 m/s
- Amolado húmedo: 15–25 m/s

PFERDVALUE:



D x T [mm]	H [mm]	P [mm]	Grano		Referencia
			D 151		
			EAN 4007220		
12,0 x 10	8	-	665893	1	D1A1 12-10-8 D 151
14,0 x 10	8	-	665961	1	D1A1 14-10-8 D 151
16,0 x 10	8	-	665978	1	D1A1 16-10-8 D 151
18,0 x 10	8	2	665992	1	D1A1 18-10-8 D 151
20,0 x 10	8	2	354629	1	D1A1 20-10-8 D 151
30,0 x 10	10	2	354636	1	D1A1 30-10-10 D 151
40,0 x 10	10	2	354643	1	D1A1 40-10-10 D 151
50,0 x 10	10	2	354131	1	D1A1 50-10-10 D 151


Figura 63. Discos de amolar 1A1 con granos de diamante y ligante galvánico de la empresa PFERD y dimensiones existentes.



Forma cilíndrica ZY

La forma cilíndrica ZY es adecuada para el desbaste de orificios, radios y contornos en el uso estacionario y el trabajo manual. Las muelas con un diámetro a partir de 8 mm tienen una cavidad en la parte delantera.

A = Mango rebajado
N = Mango no rebajado




Recomendaciones de uso:

- Amolado seco: 15–25 m/s
- Amolado húmedo: 20–40 m/s

Nota para pedido:

- Por favor, indicar el tamaño de grano.

PFERDVALUE:




D x T [mm]	S _d [mm]	L ₂ [mm]	L ₄ [mm]	Grano			Referencia
				B 64	B 126		
				EAN 4007220			
ø mango 6 mm							
6,0 x 6	6	54	19	354919	119389	1	BZY-A 6,0-6/6 ...
7,0 x 8	6	52	-	-	119396	1	BZY-N 7,0-8/6 ...
8,0 x 8	6	52	-	-	119402	1	BZY-N 8,0-8/6 ...
9,0 x 8	6	52	-	-	258408	1	BZY-N 9,0-8/6 ...
10,0 x 8	6	52	-	-	119419	1	BZY-N 10,0-8/6 ...
12,0 x 8	6	52	-	-	119426	1	BZY-N 12,0-8/6 ...
13,0 x 10	6	50	-	-	258460	1	BZY-N 13,0-10/6 ...
14,0 x 10	6	50	-	-	258491	1	BZY-N 14,0-10/6 ...
15,0 x 10	6	50	-	-	119433	1	BZY-N 15,0-10/6 ...
18,0 x 10	6	50	-	-	258521	1	BZY-N 18,0-10/6 ...
20,0 x 10	6	50	-	-	258552	1	BZY-N 20,0-10/6 ...
ø mango 10 mm							
15,0 x 10	10	110	-	-	355145	1	BZY-N 15,0-10/10 ...

Figura 64. Muelas diamantadas con granos de CBN y ligante galvánico de la empresa PFERD y dimensiones existentes. Muelas diamantadas con granos de CBN y ligante galvánico de la empresa PFERD y dimensiones existentes.

Herramienta	Costo (€/unidad sin IVA)
Muela Ø15 mm	58,43
Muela Ø25 mm	91,49
Muela Ø15 mm	62,42
Disco Ø30 mm	106,23

Tabla 39. Coste de las herramientas.