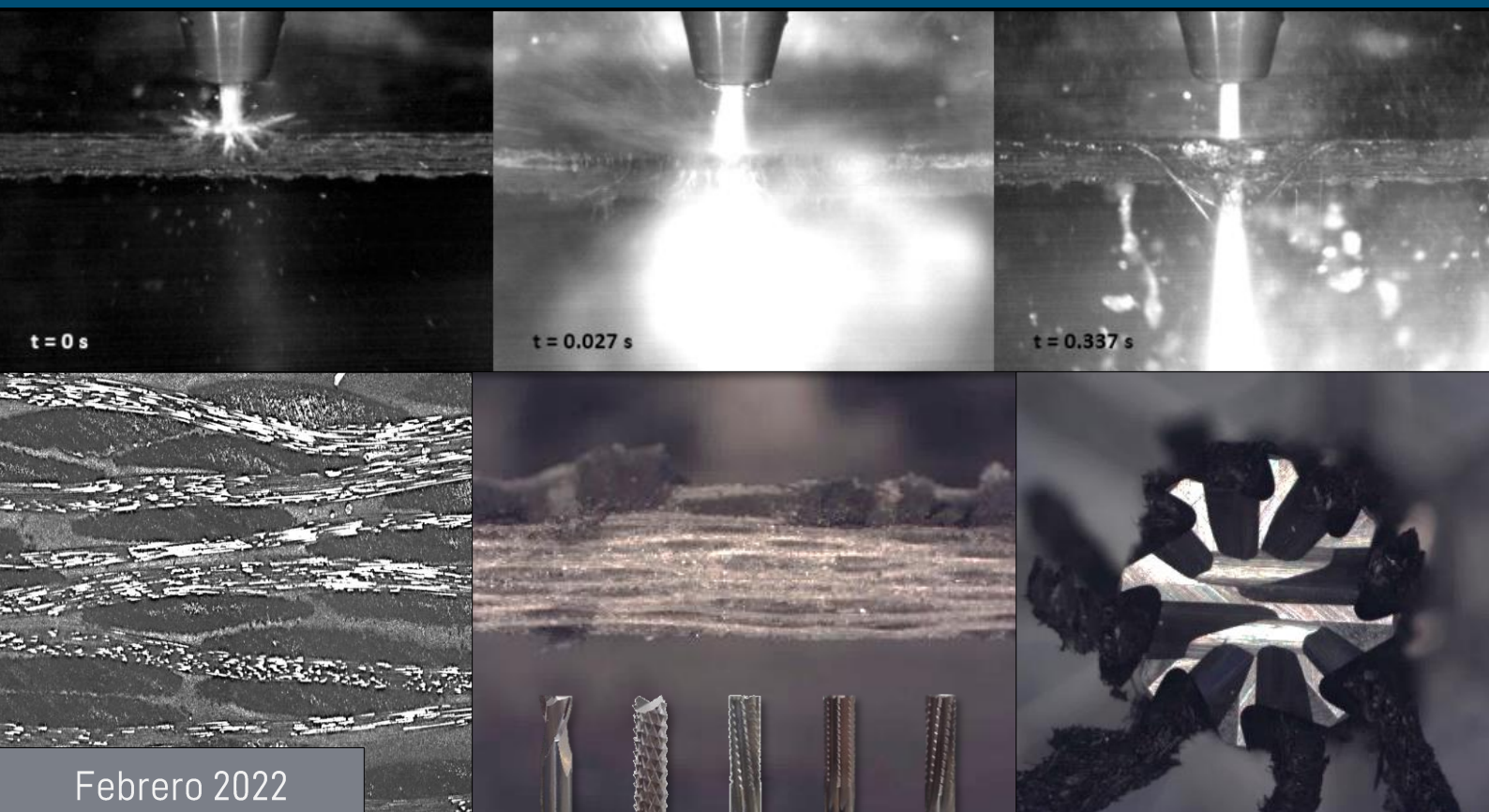


Universidad de **Cádiz**

Análisis, evaluación y propuesta de mejora del rendimiento del mecanizado de materiales compuestos de naturaleza termoplástica



TESIS DOCTORAL

Escuela de Doctorado de la Universidad de Cádiz
Programa de Doctorado en Fabricación, Materiales e Ingeniería Ambiental

D. Alejandro Sambruno Ladrón de Guevara

Directores: Dr. D. Moisés Batista Ponce

Dr. D. Bartolomé Simonet Suau



Escuela de Doctorado de la Universidad de Cádiz

Programa de Doctorado en Fabricación, Materiales e Ingeniería Ambiental

Departamento de Ingeniería Mecánica y Diseño Industrial

Análisis, evaluación y propuesta de mejora del rendimiento del mecanizado de materiales compuestos de naturaleza termoplástica

Memoria presentada por

Alejandro Sambruno Ladrón de Guevara

Para optar al título de Doctor

Febrero 2022

Directores: Dr. D. Moisés Batista Ponce

Dr. D. Bartolomé Simonet Suau

Agradecimientos

Son muchas las personas e instituciones que se han visto implicadas en el desarrollo de este trabajo. Indicar que esta tesis ha sido desarrollada y financiada dentro de un programa de Tesis Industrial en colaboración entre la Universidad de Cádiz (Grupo TEP-027) y la empresa Nanotures S.L. a través del Vicerrectorado de Transferencia e Innovación Tecnológica de la Universidad de Cádiz.

Gracias a mis directores. Al Dr. D. Moisés Batista Ponce por su saber estar y su infinita paciencia conmigo. Al Dr. D. Bartolomé Simonet por acercarme a la industria y apoyarme en el camino.

Gracias a Dr. D. Antonio Juan Gámez, por estar siempre que se le necesita.

A la Escuela Superior de Ingeniería, al laboratorio Labcyp y, en especial, al Departamento de Ingeniería Mecánica y Diseño Industrial, por ofrecer los servicios necesarios que han hecho posible llegar hasta aquí.

Gracias a todas las compañeras y compañeros del grupo de investigación por los consejos, ánimos y apoyo en este largo camino de investigación. En especial a Fermín, mi mano derecha, el que más me ha hecho fumar de toda la Escuela en reiterados intentos de arreglar una ínfima parte de esta precaria vida universitaria de la que formamos parte.

Gracias a mis padres, Sisa y Nuno, por enseñarme los valores necesarios con los que he luchado, luchado y lucharé, aunque el camino se ponga cuesta arriba.

Gracias a mi otro yo, la hermana de Ale Sambruno, también conocida como María. Por ayudarme a remar, siempre.

A mis queridos Ignacio, Titi, Popo y Nachete. Vuestro humor me ha salvado infinitas veces.

A Germán, por ser mi red del trapecista. Gracias por una amistad tan verdadera.

Gracias a Laura por haberme robado ese hielo bendito, cargado de amor. Sin ti no hubiera sido posible.

A mis hijos Índigo y Agua. Cuando seáis grandes os enseñaré estas líneas para que sepáis que tan solo ver vuestra carita me ha hecho llegar hasta aquí.

Con especial cariño a Mariano,

*Impar y primo.
Dos manos zurdas
en la ciudad del tanguillo
y la convidá.
Hoy es siempre todavía.*

Resumen

En este trabajo se ha analizado el comportamiento de materiales compuestos de resina de poliuretano termoplástico reforzada con fibras de carbono (CFRTP) frente a diversos procesos de acabado (postprocesado) sustractivos, convencionales y no convencionales. El interés de esta investigación radica en la tendencia ascendente al uso de los materiales compuestos de matriz polimérica, entre los cuales se encuentra el poliuretano termoplástico. Las resinas termoplásticas presentan una serie de ventajas respecto a las termoestables, entre ellas su facilidad de procesamiento y su reciclaje. Esto ha permitido que el conformado de esta resina junta a fibras de carbono lleve a los CFRTPs a presentarse como una alternativa viable a los materiales compuestos más empleados en la industria.

No obstante, el peso principal de este trabajo recae en el postprocesado de dichos materiales, entendiendo como postproceso aquellas operaciones secundarias capaces de obtener la geometría final, acabados y tolerancias requeridas. En esta ocasión, tras reiteradas revisiones de la literatura científica y experimentos llevados a cabo, se ha desarrollado el análisis del CFRTP en cuestión, frente a las tecnologías de fresado y chorro de agua con abrasivo.

Abstract

In this investigation, the behavior of carbon fiber reinforced thermoplastic polyurethane resin composites (CFRTP) has been analyzed in relation to various subtractive, conventional and non-conventional finishing (post-processing) processes. The interest of this research is based on the increasing trend towards the use of polymer matrix composites, among which is thermoplastic polyurethane. Thermoplastic resins have a series of advantages over thermosetting, such as their facility of processing and their recyclability. Thanks to this, CFRTPs have become a viable alternative to the composite materials most commonly employed in the industry.

However, the main weight of this investigation focuses on the post-processing of these materials, understanding as post-processing those secondary operations capable of obtaining the final geometry, finishes and required tolerances. On this occasion, following several reviews of the scientific literature and experiments carried out, the analysis of the proposed CFRTP has been developed, compared to the milling and abrasive water jet technologies.

INDICE

Capítulo 1. Introducción.....	1.1
1.1. <i>Introducción y justificación</i>	1.1
1.2. <i>Objetivos e hipótesis.....</i>	1.3
Capítulo 2. Estado del arte de los materiales compuestos de matriz termoplástica	2.1
2.1. <i>Introducción.....</i>	2.1
2.2. <i>Materiales compuestos de matriz polimérica</i>	2.3
2.2.1. <i>Matrices para materiales compuestos de matriz polimérica.....</i>	2.5
2.2.2. <i>Refuerzos para materiales compuestos de matriz polimérica</i>	2.9
2.3. <i>Materiales compuestos termoplásticos de fibra de carbono (CFRTP).....</i>	2.16
2.4. <i>Postprocesado de los CFRTP</i>	2.21
2.5. <i>Postprocesado de los CFRTP mediante fresado periférico.....</i>	2.24
2.5.1. <i>Características de una herramienta para fresado</i>	2.25
2.5.2. <i>Parámetros de corte en fresado</i>	2.26
2.5.3. <i>Defectología asociada al fresado de CFRTP</i>	2.28
2.6. <i>Postprocesado de los CFRTP mediante chorro de agua con abrasivo</i>	2.36
2.6.1. <i>Funcionamiento del sistema de corte por chorro de agua con abrasivo</i>	2.36
2.6.2. <i>Mecanismos de eliminación por chorro de agua con abrasivo</i>	2.40
2.6.3. <i>Parámetros de corte del chorro de agua con abrasivo</i>	2.41
2.6.4. <i>Defectología asociada en chorro de agua con abrasivo de CFRTP</i>	2.42
2.7. <i>Conclusiones</i>	2.52
2.8. <i>Referencias</i>	2.56
Capítulo 3. Metodología experimental.....	3.1
3.1. <i>Introducción.....</i>	3.1
3.2. <i>Caracterización del material empleado durante el experimento</i>	3.3
3.2.1. <i>Propiedades de los CFRTP empleados</i>	3.3
3.2.2. <i>Cálculo del porcentaje de resina y fibra de un compuesto.....</i>	3.5
3.3. <i>Metodología experimental seguida para el postprocesado mediante fresado periférico... </i>	3.9
3.3.1. <i>Selección de herramientas.....</i>	3.10
3.3.2. <i>Selección de parámetros y realización de ensayos</i>	3.11
3.3.3. <i>Protocolo de evaluación de los ensayos de fresado</i>	3.13

3.4. Metodología experimental seguida para el postprocesado mediante chorro de agua	3.15
3.4.1. Selección de parámetros y realización de ensayos	3.16
3.4.2. Diseño del postprocesado comparativo por chorro de agua con abrasivo	3.18
3.4.3. Diseño del postprocesado final	3.20
3.4.4. Protocolo de evaluación de los ensayos de chorro de agua con abrasivo	3.21
3.5. Conclusiones	3.27
3.6. Referencias	3.31
Capítulo 4. Resultados	4.1
4.1. Introducción.....	4.1
4.2. Análisis del postprocesado mediante fresado periférico en CFRTP	4.1
4.2.1. Análisis de la calidad superficial obtenida en el fresado periférico	4.2
4.2.2. Conclusiones sobre el postprocesado mediante el fresado periférico	4.11
4.3. Análisis del postprocesado mediante chorro de agua con abrasivo en CFRTP	4.13
4.3.1. Análisis del ángulo de conicidad obtenido	4.13
4.3.2. Análisis de la calidad superficial obtenida	4.24
4.3.3. Conclusiones sobre el postprocesado mediante el AWJM	4.34
4.4. Comparativa de postprocesados: fresado periférico frente a chorro de agua con abrasivo	4.37
4.4.1. Análisis de las variables de salida ponderadas.....	4.39
4.5. Estudio extendido del postprocesado AWJM: Influencia de la configuración del material	4.44
4.5.1. Análisis de la defectología obtenida en función de la configuración del material ..	4.45
4.5.2. Análisis preliminar de los resultados obtenidos.....	4.47
4.5.3. Análisis del parámetro Ra.....	4.53
4.5.4. Análisis del ángulo de conicidad	4.60
4.6. Conclusiones	4.67
4.7. Referencias	4.73
Capítulo 5. Conclusiones.....	5.1
5.1. Introducción.....	5.1
5.2. Conclusiones	5.1
5.3. Líneas Futuras	5.7
Capítulo 6. Referencias.....	6.1

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Diagrama demostrativo, en función del tiempo, de la importancia de las cuatro clases de materiales: cerámicas, composites, polímeros y metales. Escala de tiempo no lineal (Adaptada de [2]).....	2.2
Figura 2.2. Imagen al microscopio de la fibra de vidrio (Adaptado de [3]).....	2.3
Figura 2.3. Evolución de la producción mundial de MMC por sectores (Adaptada de [14]).....	2.7
Figura 2.4. Producción mundial de Aluminio desde 1976 a 2016 (Adaptada de [16]).....	2.11
Figura 2.5. Evolución anual de producción Aluminio, período 1973 a 2016 (Adaptada de [16]).....	2.12
Figura 2.6. Tipos de aleaciones de la matriz de Aluminio en los MMC's	2.15
Figura 2.7. Clasificación de los Materiales Compuestos de Matriz Metálica (Adaptada de [20])	2.16
Figura 2.8. Algunas presentaciones de refuerzos en MMC's (Adaptada de [10, 21])	2.16
Figura 2.9. Distribución de los tipos de refuerzo en los MMC's de base Aluminio	2.19
Figura 2.10. Tipología de los refuerzos en los MMC's	2.20
Figura 2.11. Concentraciones de los refuerzos en los MMC's	2.20
Figura 2.12. a) Tamaño de las partículas de refuerzo en los MMC's. b) Imagen microscópica de los distintos tamaños de las partículas (Adaptada de [22]).....	2.21
Figura 2.13. Tipología de la producción de MMC's (Adaptada de [24])	2.22
Figura 2.14. Pre procesos empleados en los MMC's de Aluminio	2.23
Figura 2.15. Proceso final en los MMC's de Aluminio	2.23
Figura 2.16. Métodos de producción de los MMC's de Aluminio, (Adaptada de [26])	2.24
Figura 2.17. Proceso de Infiltración por presión (Adaptada de [28])	2.26
Figura 2.18. Cristalización de los MMC's (Adaptada de [18]).....	2.26
Figura 2.19. Proceso de Stir Casting (Adaptada de [28]).....	2.27
Figura 2.20. Microestructuras de Al-7wt%Si/ZOvol%SiC, a) fundición (enfriamiento lento) y b) fundición por presión (enfriamiento rápido) (Adaptada de [38]).....	2.29
Figura 2.21. Imágenes de diferentes métodos de fundición de MMC's (Adaptada de [32])	2.35
Figura 2.22. Tipos de mecanizado empleados en los MMC's.	2.40
Figura 2.23. Velocidades de corte seleccionadas para el mecanizado de MMC's.....	2.41
Figura 2.24. Velocidades de corte en el torneado de MMC's	2.41
Figura 2.25. Velocidades de rotación en el taladrado de MMC's.....	2.42
Figura 2.26. Rango de avances en el mecanizado de MMC's	2.42
Figura 2.27. Profundidad de Corte en el mecanizado de MMC's	2.43
Figura 2.28. Imagen de la formación de a) viruta continua y b) “dientes de sierra” (Adaptada de [61])	2.45
Figura 2.29. Comparación de la microdureza de las herramientas más comunes (A) frente a la dureza del refuerzo del MMC (B) (Adaptada de [66]).....	2.46
Figura 2.30. a) Desgaste de la herramienta con la temperatura de corte y b) Detalle de los fenómenos de adhesión primaria y secundaria (Adaptada de [67,68]).....	2.47
Figura 2.31. Herramientas empleadas en el mecanizado de MMC's	2.48
Figura 2.32. SEM del desgaste de las brocas a $V_c = 1.300 \text{ rpm}$ y avance = $0,16 \text{ mm/r}$, ángulo de punta a) 90° y b) 130° (Adaptada de [26])	2.50
Figura 2.33. Distribución bianual de trabajos acerca de los MMC's de Aluminio.....	2.50
Figura 2.34. Distribución bianual de trabajos acerca del mecanizado de los MMC's de Aluminio	2.51
Figura 2.35. Distribución bianual de trabajos acerca del mecanizado de los MMC's de Aluminio, reforzados con SiC	2.51
Figura 2.36. Distribución bianual de trabajos acerca del mecanizado de los MMC's de Aluminio, con mención de la herramienta.....	2.52
Figura 2.37. Contenidos de las publicaciones acerca de los MMC's.....	2.53
Figura 3.1. Desarrollo de las dos fases de la experimental.....	3.2
Figura 3.2. Ensayos y técnicas utilizadas en la fase experimental	3.2
Figura 3.3. Procedimiento General para la caracterización del MMC objeto de estudio	3.3
Figura 3.4. Imagen fotográfica de la plancha de MMC	3.4
Figura 3.5. Espectrómetro de emisión óptica Spectrolab M12. Adaptada de [2]	3.5
Figura 3.6. Protocolo para la caracterización microestructural del MMC	3.6
Figura 3.7. a) Cortadora Metalográfica Labotom-3 de Struers. b) Sistema de fijación empleado	3.6
Figura 3.8. Selección del disco de corte para el MMC de Aluminio (Adaptado de [5])	3.7
Figura 3.9. Muestras ya embutidas y posición de las mismas en el espacio	3.8

Figura 3.10. Embutidora en caliente Labo Press – 3 de Struers. Detalle del pistón y embutidor	3.8
Figura 3.11. Muestras de MMC obtenidas tras la embutición de las pastillas de resina	3.9
Figura 3.12. Equipo de esmerilado y pulido TegraPol – 11 de Struers.....	3.9
Figura 3.13. Material a) sin revelar y b) después del revelado Keller	3.11
Figura 3.14. Microscopio óptico estereoscópico Nikon SMZ 800	3.12
Figura 3.15. Imagen utilizada para el cálculo del área que ocupan los refuerzos en el MMC. a) antes y b) después de su procesamiento.....	3.13
Figura 3.16. Imagen del indentador sobre la superficie del material (Adaptada de [11]).....	3.13
Figura 3.17. Imagen de la huella del indentador sobre la superficie del material (Adaptada de [11]).	3.14
Figura 3.18. a) Microdurómetro Shimadzu HMV-2. b) Detalle de una de las pantallas del microdurómetro con datos seleccionados para el experimento	3.15
Figura 3.19. Muestra del MMC de Aluminio. a) Antes de la indentación y b) después de la indentación	3.16
Figura 3.20. Diagrama de flujo del ensayo de inmersión del MMC en solución salina.....	3.17
Figura 3.21. Cubeta y sistema de sujeción de las muestras para el experimento de inmersión	3.18
Figura 3.22. a) Esquema de una celda electroquímica (Adaptado de [17]). b) Celda electroquímica de ensayo de polarización cíclica. c) Potenciostato/Galvanostato Autolab PGSTAT302N.....	3.20
Figura 3.23. Procedimiento para la elaboración de la polarización cíclica.....	3.21
Figura 3.24. Diagrama del proceso de mecanizado	3.22
Figura 3.25. Vista general de la cepilladora emplazada para los ensayos ubicada en la ENSAM Centro Burdeos-Talence.....	3.23
Figura 3.26. a) Herramienta H13A de Sandvik. b) Vista lateral de la herramienta. c) Vista en planta. d) Características geométricas de la herramienta. e) Montaje de la herramienta en el Portaherramientas.....	3.25
Figura 3.27. Aplicación del Método de las Cuadrículas	3.26
Figura 3.28. a) Microscopio Electrónico de Barrido Hitachi SU1510. b) Software de procesado EDS.....	3.27
Figura 3.29. a) Microscopio Electrónico de Barrido Quanta. b) Detalle de la mesa de muestras	3.27
Figura 3.30. Cabezal de la cepilladora-limadora con el dinamómetro Kistler acoplado y detalle.....	3.28
Figura 4.1. Sección de la plancha de MMC de Aluminio fabricada por ALSIC, imagen obtenida por Microscopía Óptica Metalográfica	4.2
Figura 4.2. Muestras de MMC tras el ensayo de espectrometría de emisión óptica	4.3
Figura 4.3. Imagen SOM de una muestra de MMC de Aluminio-SiC tras el proceso metalográfico.....	4.5
Figura 4.4. Imagen SOM de la muestra de MMC de Al reforzada con SiC.....	4.6
Figura 4.5. Muestras en las que aparecen refuerzos con un área superior a la centésima parte del área total	4.7
Figura 4.6. Número de refuerzos superiores al mínimo detectable en las cuatro muestras de MMC's ...	4.7
Figura 4.7. Área cubierta, en %, por las partículas de tamaño superior al mínimo detectable	4.8
Figura 4.8. Porcentaje de área ocupada por partículas de refuerzo de tamaño superior a los a la centésima parte del área total.....	4.8
Figura 4.9. Muestras de MMC después de la indentación (HMV)	4.10
Figura 4.10. Valores de microdureza de las muestras medidas en 1) el refuerzo, 2) la matriz, 3) la intercara y 4) la matriz	4.10
Figura 4.11. Imágenes de la muestra transcurridas 0, 24, 48 y 168 horas desde la inmersión	4.12
Figura 4.12. a) Análisis del refuerzo marcado. Imágenes de la muestra tratadas por Image J [8]. b) Imagen de una muestra de MMC de matriz de Aluminio tras el proceso de inmersión en solución salina.	4.15
Figura 4.13. Variación del área de un refuerzo, en %, tras distintos periodos temporales	4.16
Figura 4.14. Circuito equivalente o de Randles que simula un metal en corrosión (Adaptada de [9]).	4.16
Figura 4.15. Diagrama de Polarización cíclica a) E vs logi b) i vs E	4.17
Figura 4.16. Diagrama de Impedancia Nyquist	4.18
Figura 4.17. Diagrama de Impedancia Bode, Módulo	4.19
Figura 4.18. Diagrama de Impedancia Bode, Fase.....	4.19
Figura 4.19. Imagen de la viruta Vc= 20 m/min, 1 pasada, t= 10 s y p= 0,2 mm.....	4.20
Figura 4.20. Viruta Vc= 30 m/min, 3 pasadas, t= 10 s y p= 0,2 mm	4.21
Figura 4.21. Viruta Vc= 50 m/min, 3 pasadas, t= 10 s y p= 0,2 mm	4.21
Figura 4.22. Virutas obtenidas en los ensayos de limado de MMC a una pasada. a) Vc= 20 m/min; b) Vc= 30 m/min; c) Vc= 40 m/min; d) Vc= 50 m/min	4.23
Figura 4.23. Virutas obtenidas en los ensayos de limado de MMC a tres pasadas. a) Vc= 20 m/min; b) Vc= 30 m/min; c) Vc= 40 m/min; d) Vc= 50 m/min.....	4.23
Figura 4.24. Virutas del MMC obtenidas a Vc= 20 m/min tras una pasada.....	4.24
Figura 4.25. Virutas del MMC obtenidas a Vc= 20 m/min tras la tercera pasada	4.25

Figura 4.26. Virutas del MMC obtenidas a $V_c = 20$ m/min tras la tercera pasada	4.25
Figura 4.27. Perfiles de las virutas a distintas velocidades de corte, tras 1 y 3 pasadas a profundidad constante de 0,2 mm	4.26
Figura 4.28. Medición del radio sobre un arco virtual aproximado al perfil de la viruta	4.26
Figura 4.29. Radios de curvatura de las virutas obtenidas en los distintos ensayos de a 1 y 3 pasadas a profundidad constante de 0,2 mm.....	4.27
Figura 4.30. Medición del ángulo del plano de deslizamiento sobre la imagen del mecanizado.....	4.28
Figura 4.31. Medición del ángulo del plano de deslizamiento sobre la imagen del mecanizado.....	4.29
Figura 4.32. Medición del ángulo de cizalladura sobre la imagen del proceso de mecanizado	4.29
Figura 4.33. Defectología de la viruta. Aparición de dientes de sierra en los extremos de la viruta.....	4.30
Figura 4.34. Cara exterior de la viruta de MMC. a) Imagen SEM a 56X; b) Imagen SEM a 278X. c) y d) EDS a $V_c = 50$ m/min, $p = 0,2$ mm y 3 pasadas en dos zonas distintas de la viruta.....	4.31
Figura 4.35. Cara interior de la viruta de MMC. a) Imagen SEM a 38X; b) Imagen SEM a 214X. c) EDS a $V_c = 50$ m/min, $p = 0,2$ mm y 3 pasadas en dos zonas distintas de la viruta	4.32
Figura 4.36. Cara interior de la viruta de MMC. a) Imagen SEM a 855X; b) Imagen SEM a 1062X. c) EDS a $V_c = 50$ m/min, $p = 0,2$ mm y 3 pasadas en dos zonas distintas de la viruta	4.33
Figura 4.37. Una de las herramientas y desgaste del filo a simple vista	4.33
Figura 4.38. Herramientas empleadas en el mecanizado caras de desprendimiento e incidencia, a 20X, $V_c = 30$ a 50 m/min, a 1 y 3 pasadas y $p = 0,2$ mm	4.34
Figura 4.39. Vista Lateral de las herramientas a 63X, $V_c = 30, 40$ y 50 m/min, a 1 y 3 pasadas $p = 0,2$ mm	4.35
Figura 4.40. Vista Lateral del desgaste de flanco de la herramienta tras tres pasadas ($V_c = 30$ m/min y $p = 0,2$ mm).....	4.36
Figura 4.41. Medición de la longitud de contacto herramienta-viruta. ($V_c = 30$ m/min, $p = 0,2$ mm y 1 pasada).....	4.37
Figura 4.42. Comparativa de la zona de contacto herramienta-viruta. ($p = 0,2$ mm y 1 pasada)	4.38
Figura 4.43. Estudio comparativo de material adherido en función de la velocidad de corte y el número de pasadas.....	4.38
Figura 4.44. Análisis SEM/EDS de la cara de desprendimiento de la herramienta ($V_c = 40$ m/min, $p = 0,2$ mm y 3 pasadas).....	4.40
Figura 4.45. a) Imagen SEM de una herramienta idéntica a la estudiada tras el cepillado de la aleación UNS A92024 tras 7 minutos de mecanizado (Adaptada de [18]); b) Imagen SEM de una herramienta de torneado mecanizando UNS A92024 tras unos segundos de mecanizado (Adaptada de [17]).....	4.40
Figura 4.46. Análisis SEM de la cara de desprendimiento de la herramienta ($V_c = 40$ m/min, $p = 0,2$ mm y 3 pasadas). Detalle del material adherido	4.41
Figura 4.47. a) Imagen SEM de una broca tras el taladrado en seco de CFRP (Adaptada de [19]); b) Imagen SEM de una broca tras el taladrado de un apilado CFRP-Al.....	4.41
Figura 4.48. Imagen SEM de los elementos de desgaste de una herramienta tras proceso de limado de un apilado CFRP-Ti ((Adaptada de [20]).....	4.42
Figura 4.49. Análisis SEM/EDS del flanco de la herramienta ($V_c = 40$ m/min, $p = 0,2$ mm y 3 pasadas)	4.42
Figura 4.50. Análisis SEM/EDS del flanco de la herramienta ($V_c = 50$ m/min, $p = 0,2$ mm y 3 pasadas).....	4.43
Figura 4.51. Análisis SEM/EDS del flanco de la herramienta ($V_c = 50$ m/min, $p = 0,2$ mm y 1 pasada)	4.43
Figura 4.52. Análisis SEM/EDS de la cara de desprendimiento de la herramienta ($V_c = 50$ m/min, $p = 0,2$ mm y 1 pasadas).....	4.44
Figura 4.53. Análisis SEM/EDS de la cara de desprendimiento de la herramienta con la distancia al filo ($V_c = 50$ m/min, $p = 0,2$ mm y 3 pasadas)	4.45
Figura 4.54. Composición de imágenes SEM de la cara de incidencia de la herramienta con la distancia al filo ($V_c = 50$ m/min, $p = 0,2$ mm y 3 pasadas)	4.45
Figura 4.55. SEM a 467X del perfil. Desgaste de filo y material adherido a distintas V_c y pasadas	4.46
Figura 4.56. Desgastes medidos en las imágenes SEM del perfil de la herramienta. a) ángulo. b) flanco.....	4.47
Figura 4.57. a1) SEM del filo de la herramienta, b1) espectros del Al (amarillo) y Si/W (azul), c1) espectros del Al, Si/W y C (rojo)	4.48
Figura 4.58. Análisis composicional del filo de la herramienta y cara de desprendimiento ($V_c = 20$ m/min, 1 pasada).....	4.49
Figura 4.59. Máquina herramienta con dinamómetro Kistler y cámara de alta velocidad.....	4.50
Figura 4.60. Proceso de alineación de las señales estableciendo offsets iniciales	4.51
Figura 4.61. Fuerzas de Corte tras el procesado inicial	4.51

Figura 4.62. Fuerzas de Corte en función de la velocidad de corte para distintas pasadas de mecanizado.....	4.52
Figura 4.63. Fuerzas de Corte (F_c y F_y) en función del tiempo de mecanizado para distintas velocidades de corte.....	4.52

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Principales MMC's (Adaptada de [7])	2.7
Tabla 2.2. Propiedades de algunos MMC's (Adaptada de [7])	2.8
Tabla 2.3. Comparativa de propiedades mecánicas de los composites de Aluminio con la matriz (Adaptada de [9]).....	2.9
Tabla 2.4. Designaciones de las aleaciones de Aluminio forjado (Adaptada de [7, 9]).....	2.13
Tabla 2.5. Propiedades Mecánicas de las aleaciones de Aluminio (Adaptada de [9]).....	2.13
Tabla 2.6. Propiedades de las fibras de refuerzo de los MMC's (Adaptada de [9])	2.19
Tabla 3.1. Secuencia de las fases de lijado y pulido de las pastillas con las muestras embutidas de MMC's. En rojo las diferencias con el procedimiento estándar. (Adaptado de [3,8])	3.11
Tabla 4.2. Parámetros de mecanizado del MMC de aleación de Aluminio reforzado con SiC	3.24
Tabla 4.1. Composición y algunas propiedades del material (Adaptado de [1])	4.3
Tabla 4.2. Composición del Aluminio A356.2 (Adaptado de [3, 4]).....	4.3
Tabla 4.3. Resultados de la espectrometría de emisión óptica	4.4
Tabla 4.4. Propiedades de la matriz de Al vs. MMC (Adaptada de [1 y 4])	4.4
Tabla 4.5. Áreas ocupadas por los refuerzos mayores de la centésima y por el total de refuerzos	4.6
Tabla 4.6. Microdureza de las muestras del MMC de Aluminio.....	4.9
Tabla 4.7. Mediciones de los refuerzos contenidas en las muestras analizadas tras ensayos de inmersión salina en diferentes periodos temporales	4.12
Tabla 4.8. Variaciones experimentadas por las áreas de refuerzo en las muestras analizadas tras ensayos de inmersión salina en diferentes periodos temporales.....	4.13
Tabla 4.9. Mediciones de las áreas del refuerzo transcurridas 24, 48 y 168 horas.....	4.13
Tabla 4.10. Radios de las virutas ($V_c = 20$ a 50 m/min a 1 y 3 pasadas).....	4.27
Tabla 4.11. Valores de los elementos característicos de la viruta y del Espesor medio de la viruta (E_m) en función de la velocidad de corte.....	4.28
Tabla 4.12. Cuantificación del Material adherido, en %, a distintas velocidades y tiempos de mecanizado.....	4.37
Tabla 4.13. Valores del ángulo de desgaste según los parámetros de corte del ensayo	4.47
Tabla 4.14. Valores medios de las fuerzas de corte obtenidas en los ensayos de mecanizado	4.50

Análisis, evaluación y propuesta de mejora del rendimiento del mecanizado de materiales compuestos de naturaleza termoplástica CF RTP

Capítulo 1

Introducción

Tesis Doctoral

Alejandro Sambruno Ladrón de Guevara

Capítulo 1. Introducción

1.1. Introducción y justificación

En este trabajo se ha analizado el comportamiento de materiales compuestos de resina de poliuretano termoplástico reforzada con fibras de carbono (CF RTP) frente a diversos procesos de acabado (postprocesado) sustractivos, convencionales y no convencionales. Esto ha sido posible gracias a la colaboración de la empresa Nanotures S.L., empresa especializada en la fabricación de este tipo de materiales y al programa de Tesis Industriales de la Universidad de Cádiz que han dado soporte al presente trabajo de investigación. Esta colaboración ha permitido generar conocimiento en lo referente al procesamiento de estos materiales mediante la elaboración de una aproximación al estado del arte de los compuestos de matriz polimérica, el establecimiento de una metodología experimental y la generación de resultados y su discusión que ha dado lugar a una serie de conclusiones de alto interés industrial y alto valor que permite llenar un vacío en el conocimiento científico existente sobre los CF RTP.

El interés que rodea a la investigación de estos materiales, se ha expresado en multitud de ocasiones mediante diversos trabajos de investigación, así como por el interés suscitado en aquellos sectores industriales más distinguidos en el ámbito de la ingeniería. Así, se ha denotado una tendencia ascendente al uso de los materiales compuestos de matriz polimérica, dentro de los cuales se encuentran las matrices termoestables y termoplásticas.

Si bien es sabido que la mayoría de compuestos de fibra de carbono se conforman con resina termoestable, las resinas termoplásticas presentan una serie de ventajas que se deben tener en cuenta, entre ellas su facilidad de procesamiento y de reciclaje. Por ello se espera que, en un futuro no demasiado lejano, este tipo de materiales sustituyan paulatinamente los de matriz termoestable. Entre las matrices termoplásticas más extendidas se encuentra el poliuretano termoplástico (TPU), el cual debido a sus altas prestaciones mecánicas presenta un gran rendimiento en servicio. Además, su excelente relación peso/propiedades mecánicas, así como su facilidad de reciclado ha ocasionado que la demanda mundial de este polímero termoplástico se encuentre en torno al 10%,

siendo capaz de ser implantado en multitud de sectores industriales. Esto ha permitido que el conformado de esta resina junto a fibras de carbono lleve a los CF RTPs a presentarse como una alternativa viable a los materiales compuestos más empleados en la industria.

No obstante, cabe señalar que casi todos los materiales compuestos requieren de algún tipo de acabado o postprocesado tras su fase de conformado, entendiendo como postproceso aquellas operaciones secundarias capaces de obtener la geometría final, acabados y tolerancias requeridas. Por ello, en este trabajo se ha analizado el efecto de diversos postprocesados sustractivos convencionales y no convencionales en un CF RTP, teniendo en cuenta que las tecnologías más empleadas industrialmente de cara al uso de compuestos poliméricos son el corte por cizallamiento, láser, fresado y chorro de agua con abrasivo.

El análisis de estos procesos se ha llevado a cabo gracias a una amplia revisión de la literatura científica y a la cuantificación de defectos y calidades generados en la pieza final mecanizada. Para ello, ha sido necesario estudiar los defectos generalmente ocasionados en compuestos poliméricos donde destacan las delaminaciones internas, el deshilachado de fibras y la pérdida de matriz. Todos ellos se ven acrecentados si la temperatura generada durante el postprocesado es elevada, debido a la sensibilidad que tienen los compuestos poliméricos frente a dicha temperatura. La temperatura de transición vítrea del polímero es uno de los parámetros más influyentes de cara a la generación de defectos en la pieza final mecanizada.

Este efecto ha ocasionado que se deba realizar un análisis bibliográfico del comportamiento de compuestos poliméricos frente a los postprocesados mencionados anteriormente. Gracias a ello, se ha podido comprobar como la energía térmica aplicada en láser puede llegar a deteriorar en gran medida el material compuesto. Además, el contacto herramienta-pieza que presentan métodos convencionales como el corte por cizallamiento y fresado también pueden provocar un aumento de la temperatura el proceso. No obstante, el efecto de la temperatura no ocurre en gran medida a la hora de postprocesar mediante chorro de agua con abrasivo, el cual adquiere una gran ventaja de partida frente al resto de postprocesados a analizar.

Con el fin de llevar a la práctica y analizar el comportamiento frente a diversas tecnologías de los compuestos termoplásticos, se ha desarrollado una metodología experimental que incluye los procedimientos seguidos, abordando aspectos básicos como la caracterización del material empleado, diseño del proceso, selección de parámetros y caracterización y cuantificación de los defectos generados. Así, y en base a lo ya comentado, se ha estudiado el postprocesado mediante fresado y chorro de agua con abrasivo en CF RTPs.

En primer lugar, en cuanto al postprocesado mediante fresado se refiere, se ha analizado el efecto de diversas geometrías de herramientas y combinaciones de parámetros de corte en el mecanizado de ranuras rectilíneas. En el postprocesado por chorro de agua con abrasivo se ha analizado el efecto de la presión hidráulica, la velocidad de avance y el caudal de abrasivo en el mecanizado de ranuras rectilíneas. Con los datos obtenidos, se han elaborado modelos predictivos capaces de predecir el comportamiento del procesado de estos materiales.

1.2. Objetivos e hipótesis

El postprocesado de materiales compuestos de matriz termoplástica reforzados con fibras de carbono supone un reto debido al gran número de variables existentes, desde el conformado de un material novedoso y su caracterización, hasta las condiciones y estrategias de postprocesados, así como los parámetros tecnológicos empleados.

Por ello, a través de una amplia revisión bibliográfica y la experiencia del Grupo de Investigación “Ingeniería y Tecnologías de Materiales y Fabricación” donde se enmarca la Tesis Doctoral, el presente trabajo de investigación pretende satisfacer el siguiente objetivo principal:

Estudiar la influencia de postprocesados convencionales y no convencionales, normalmente aplicados a materiales compuestos poliméricos de resina termoestable, en compuestos termoplásticos de fibra de carbono.

Con el fin de satisfacer dicho objetivo, se plantean las siguientes hipótesis:

- Una caracterización exhaustiva de los materiales facilitará el análisis y discusión de los resultados obtenidos en el postprocesado.
- En función a la naturaleza de los termoplásticos reforzados con fibras, las operaciones de postprocesado influirán en distinta forma.
- Las diferentes configuraciones en el conformado del material compuesto pueden llegar a influir en el postprocesado de los mismos, obteniéndose resultados completamente diferentes.
- La temperatura de transición vítrea del polímero será uno de los factores más determinantes al poder ser superada durante el postprocesado del material termoplástico.
- Tecnologías no convencionales pueden ser influyentes en la reducción de la defectología originada por los postprocesos convencionales de materiales compuestos, así como, los tiempos de ejecución y, por ende, los costes del proceso.
- La elaboración de modelos predictivos que relacionen los parámetros de entrada con las variables de salida permitirá corroborar las discusiones realizadas sobre los postprocesados.

Análisis, evaluación y propuesta de mejora del rendimiento del mecanizado de materiales compuestos de naturaleza termoplástica CF RTP

Capítulo 2

Estado del arte de los materiales compuestos de matriz termoplástica

Tesis Doctoral

Alejandro Sambruno Ladrón de Guevara

Capítulo 2. Estado del arte de los materiales compuestos de matriz termoplástica

2.1. Introducción

En los últimos años, una de las principales tareas de los diferentes sectores de la ingeniería está siendo la búsqueda de materiales que mejoren el rendimiento de los ya existente. Esta labor no es tarea fácil debido a la gran cantidad de materiales que se utilizan en la industria actual.

Si se toman todos estos materiales, una de las clasificaciones que se puede tener en cuenta para categorizarlos, es en función a su naturaleza. De esta forma se pueden encontrar materiales cerámicos, poliméricos, metálicos y compuestos. El uso de un tipo de material u otro ha ido evolucionando a lo largo de la historia (Figura 2.1). Al principio la humanidad utilizaba los materiales que podía extraer directamente de la naturaleza o mezcla de ellos. Destaca el uso de materiales cerámicos y compuestos debido principalmente al empleo de técnicas de fabricación manuales donde la artesanía tenía un papel fundamental. Es en torno al año 1800 cuando el acero empieza a cobrar importancia de la mano de la primera revolución industrial, junto a la introducción de la energía hidráulica y de vapor en los equipos que se iban desarrollando. Desde entonces y, hasta la actualidad, se han ido desarrollando diferentes aleaciones metálicas capaces de otorgar cualidades específicas a los materiales que hasta el momento no se habían logrado.

Por otro lado, se encuentran los materiales poliméricos y compuestos. Aunque la compatibilidad de este tipo de materiales en empresas siderúrgicas y metalúrgicas era prácticamente inviable. De esta forma, las máquinas herramientas empiezan a tener interés en la industria gracias a los metales puros y las aleaciones metálicas.

No obstante, existe una tendencia desarrollada desde principio del siglo XXI, que consiste en introducir materiales compuestos con refuerzos poliméricos en diferentes aplicaciones industriales. Es por ello que los materiales compuestos son una fuente de innovación en la industria actual. Existen multitud de aplicaciones para todos ellos,

desde los más usuales como los polímeros reforzados con fibras de vidrio o carbono hasta los más especiales, como los metales reforzados con whiskers.

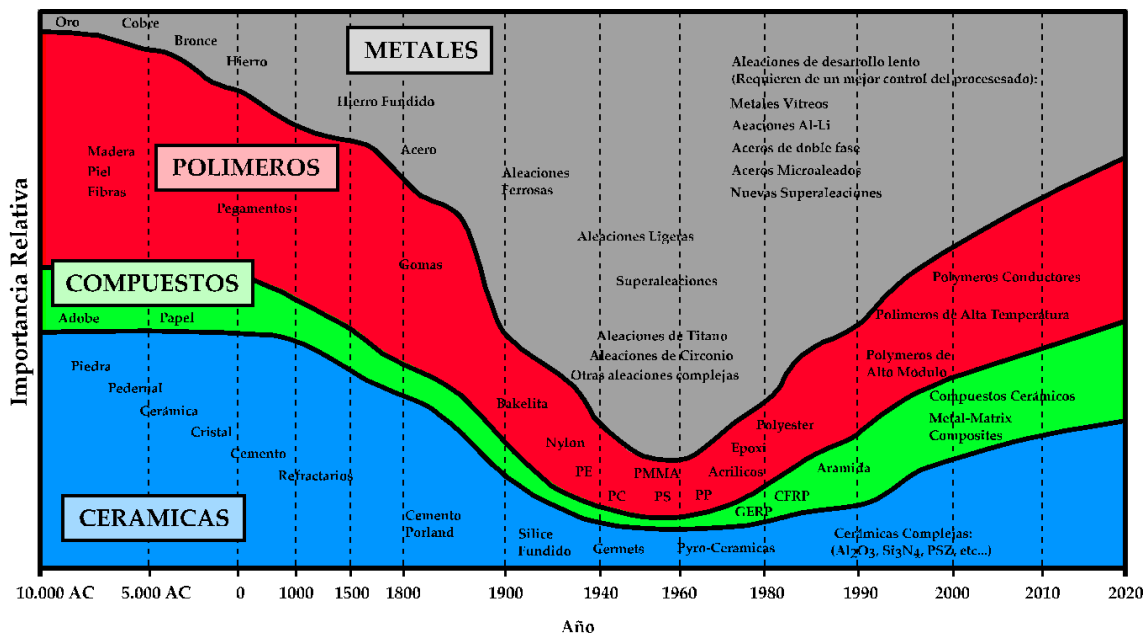


Figura 2.1. Diagrama demostrativo, en función del tiempo, de la importancia de las cuatro clases de materiales: cerámicas, compuestos, polímeros y metales. Escala de tiempo no lineal (Adaptada de [1])

La inclusión en la industria de este tipo de materiales poliméricos reforzados con fibras, provocó un auge de estos materiales y el interés por su aplicación industrial. Esto se puede apreciar en el número de publicaciones registradas desde el inicio del siglo XXI (Figura 2.2) donde se puede ver un notable aumento de los estudios relativos a compuestos y los polímeros, los cuales se están abriendo paso en diferentes industrias de ingeniería, llegando a igualar a la familia de metales tan empleada a lo largo de la historia.

Sin embargo, de la mano de este auge, apareció una nueva problemática como es el conformado de esta amplia familia de materiales. Ya que si bien, la obtención de una preforma es una tecnología conocida y utilizada, el conformado final, o postprocesado resulta complejo y más si se desea obtener una pieza con una amplia variabilidad geométrica. Por ello, el principal objetivo de la tesis es el estudio de las distintas posibilidades de postprocesado de los materiales compuestos de matriz termoplástica, en concreto, haciendo uso de procesos de eliminación de material o mecanizado. Por ello, en este capítulo se realizará una aproximación al estado del arte de los materiales compuestos, haciendo especial hincapié en los de matriz termoplástica, así como las dificultades que se plantean durante su procesado final por eliminación de material. Debido a la componente industrial de esta tesis, este capítulo se enfocará hacia los elementos que más interés suscitan a nivel industrial, comparándolo con lo estudiado a nivel científico.

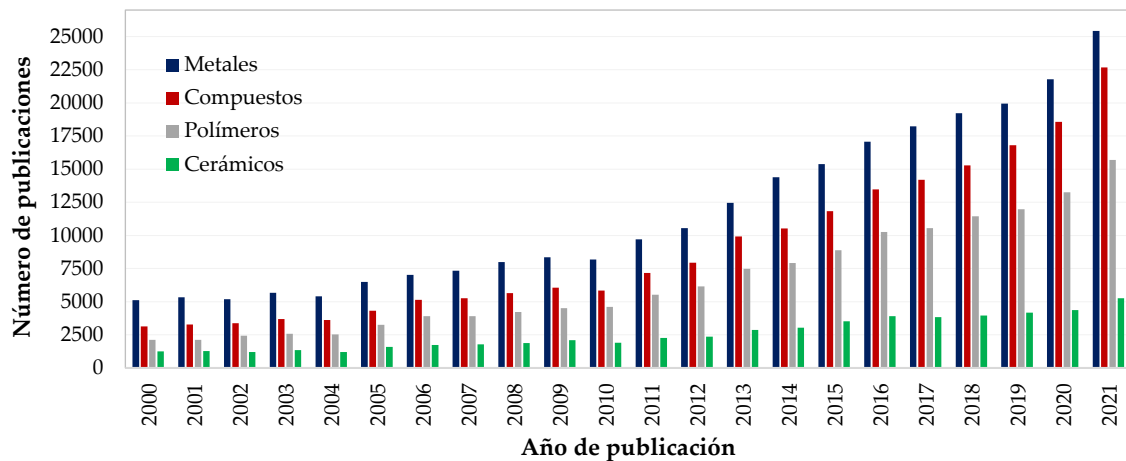


Figura 2.2. Análisis bibliométrico de la evolución de los estudios referidos a las diferentes familias de materiales en el campo de la Ingeniería

2.2. Materiales compuestos de matriz polimérica

Desde un punto de vista general, se podría entender un material compuesto (MC) –también denominado coloquialmente *composite*– como una combinación de dos o más materiales diferentes, cuya unión presenta unas propiedades mejores que las de los materiales de partida de forma aislada. Normalmente, esta combinación de materiales se da de forma sinérgica, de manera que uno de ellos actúa como matriz –aglomerante o ligante del material compuesto– y el resto actúan como refuerzo dotando a la unión de propiedades mejoradas, principalmente mecánicas. No obstante, las propiedades al conjunto final pueden ser moduladas añadiendo otros aditivos, logrando propiedades específicas (eléctricas, térmicas o medioambientales, por ejemplo). Debido a esto, actualmente, se optimiza la fabricación de materiales compuestos hasta el punto de nivelar sus propiedades de cara a la aplicación a la que vaya a ser empleado [2–4], lo que provoca que existan una enorme cantidad de posibles combinaciones de matrices-refuerzos, en distintos porcentajes de uso.

Esta gran variabilidad hace necesaria una categorización. Una primera gran división de los materiales compuestos podría realizarse en función de la naturaleza de la matriz. De esta forma se obtienen los materiales compuestos de matriz polimérica (PMC o *Polimeric matrix composites*), de matriz metálica (MMC o *Metal matrix composites*) y de matriz cerámica (CMC o *Ceramic matrix composites*). En general, los compuestos de matriz polimérica, conocidos coloquialmente como compuestos poliméricos, son mucho más fáciles de fabricar que los de matriz metálica o cerámica, independientemente del tipo de polímero utilizado (tanto si es termoestable como si es termoplástico). Esta facilidad de fabricación es debida a las relativamente bajas temperaturas de procesamiento requeridas para la fabricación del compuesto [3].

Si se analiza la investigación referida a los tipos materiales compuestos clasificados en función a la naturaleza de la matriz (Figura 2.3) se puede ver cómo desde inicios del siglo XXI existe un aumento en el empleo de materiales compuestos independientemente de la naturaleza de dicha matriz con la que se conforma el material. Si bien, los materiales compuestos con matriz cerámica se ven menos potenciados que el resto de materiales. Se aprecia, además, como la investigación de compuestos de matriz polimérica empieza a destacar a partir de la primera década del siglo. Esto se debe principalmente a la facilidad de procesamiento comentada anteriormente para este tipo de materiales.

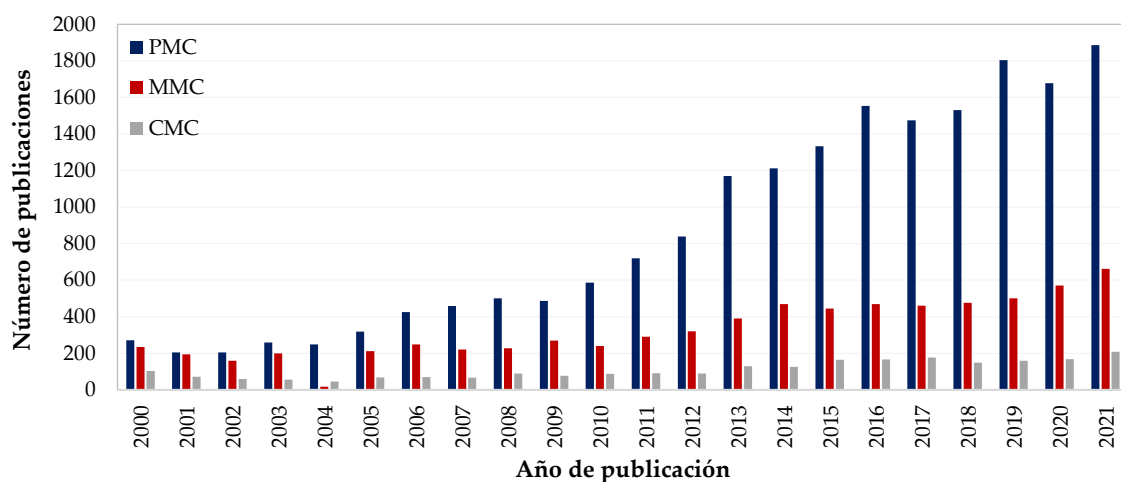


Figura 2.3. Análisis bibliométrico de la evolución de los estudios referidos a las diferentes familias de materiales compuestos en función a la naturaleza de la matriz en el campo de la Ingeniería

En 2016, la industria de los materiales compuestos alcanzó los 27400 millones de dólares, siendo el desglose de valor por sectores el representado en la Figura 2.4 para el caso del material compuesto con matriz polimérica reforzado con fibra de carbono como material más representativo de esta familia.

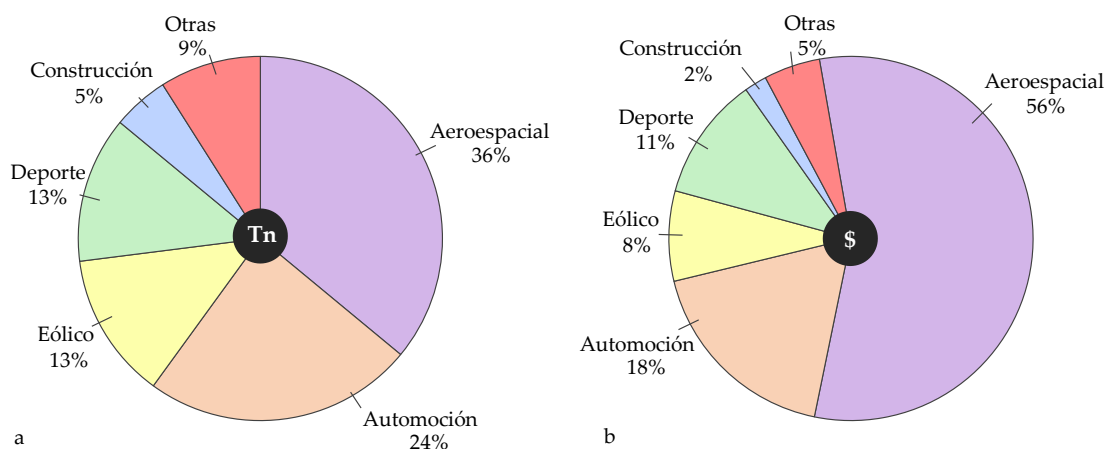


Figura 2.4. Distribución de la demanda global de consumo de material compuesto polimérico reforzado con fibra de carbono en diferentes sectores: **a.** toneladas; **b.** dólares; (Adaptada de [5])

Cabe destacar el auge que ha tenido este tipo de material en las industrias automoción y aeroespacial [6,7]. En estos sectores el consumo se ha visto influenciado por el ratio peso/propiedades mecánicas, sustituyendo materiales más pesados como pueden ser diferentes aleaciones metálicas por este tipo de material [8].

Además, si se toma uno de los refuerzos más comúnmente utilizados como es la fibra de carbono, en los últimos años, composites fabricados con matriz polimérica han destacado sobre otro tipo de compuestos (Figura 2.5). En concreto, los *Carbon fiber reinforced polymeric* o CFRP (fabricados con resina termoestable) han adquirido una gran posición de mercado entre todos los compuestos de fibra de carbono (71.2%). No obstante, los composites fabricados con una matriz termoplástica han aumentado sus aplicaciones consiguiendo un 28.8% de la demanda global de composites de carbono.

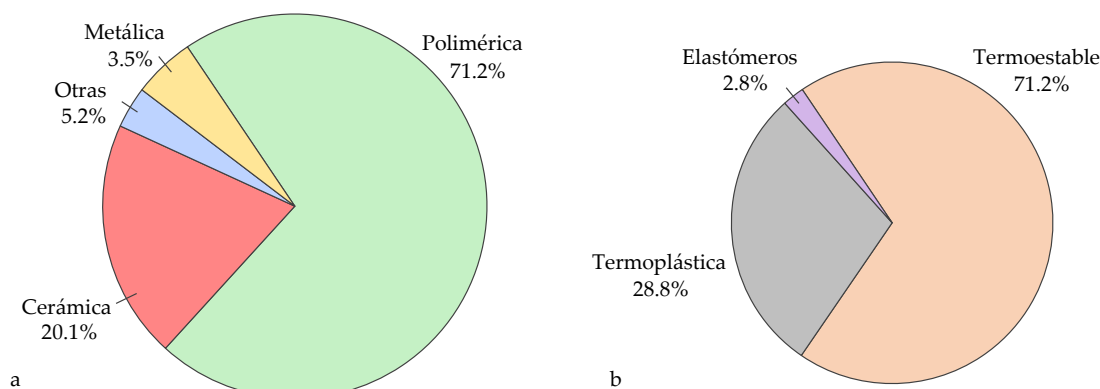


Figura 2.5. a. Distribución de la demanda global de material compuesto reforzado con fibra de carbono en función a la matriz; **b.** Distinción, dentro de las matrices poliméricas, en termoestable, termoplástica o elastómero (Adaptada de [5])

Debido a este interés general y dado que el presente trabajo se centra en los PMC, se continuará realizando una descripción general de los distintos tipos de materiales para refuerzos y matrices que más interés tienen a nivel industrial para estos materiales.

2.2.1. Matrices para materiales compuestos de matriz polimérica

Como ya se ha comentado, una de las clasificaciones más generales de los materiales compuestos es la realizada en función al material de la matriz que la conforma, siendo la matriz polimérica una de las que más interés ha generado en los últimos años [9]. Dentro de las matrices poliméricas o plásticas se pueden encontrar las matrices termoestables (poliéster, viniléster, epoxi, fenólica, etc.) y las termoplásticas (polietileno, polipropileno, poliamida, etc.); que se dividen en termoplástico puro y termoplástico elastómero (TPE).

En los inicios de la industria de los materiales compuestos, las matrices solían ser de poliésteres insaturados, los cuales se encuentran en estado líquido y reactivo. Esto ocasiona flexibilidad en las propiedades de la resina las cuales pueden ser modificadas

para satisfacer necesidades específicas a la hora de realizar su curado. Posteriormente, se desarrollaron otro tipo de termoestables, además de algunos termoplásticos cuyo desarrollo es más rápido que el de los compuestos termoestables. Actualmente, el consumo de plásticos para matrices de compuestos se estima en un 65-75% termoestables y un 25-35% termoplásticos [9], por lo que los compuestos termoestables presentan un uso industrial más extendido.

Esto concuerda con la literatura consultada, donde, tal y como se puede ver en la Figura 2.6, a simple vista, destaca el aumento de materiales compuestos termoplásticos, pareciendo el material más empleado entre los 3 presentados. Sin embargo, se debe tener en cuenta que durante muchos años los compuestos de matriz termoestable han sido llamados “compuestos de matriz polimérica”, ya que, el uso de otro tipo de polímeros en este tipo de materiales no era muy extendido. Esto ha ocasionado que la cantidad y evolución de los artículos relaciones con matrices termoestables parezca aún menor que los de matrices termoplásticas.

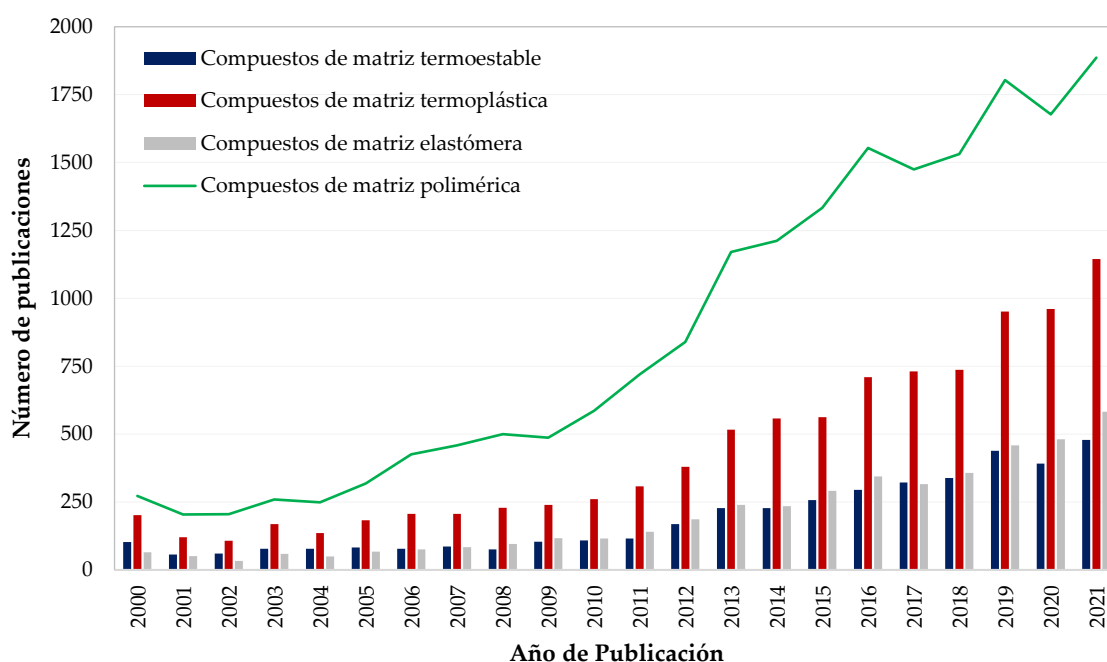


Figura 2.6. Análisis bibliométrico de la evolución de los estudios referidos a los materiales compuestos poliméricos en función al tipo de matriz en el campo de Ingeniería

Esta falta de significación, hace necesario definir convenientemente los conceptos y principales características tanto de los termoplásticos como de los termoestables, así como los diferentes polímeros, o plásticos, que se encuentran dentro de cada familia [10–12].

En primer lugar, un termoestable, antes de ser endurecido, contiene macromoléculas independientes al igual que los termoplásticos. En este caso, en su estado final, consiguen una estructura 3D obtenida por enlaces químicos que se produce

después o durante el proceso de endurecimiento (Figura 2.7.b). Los enlaces creados entre las cadenas de estos materiales limitan su movilidad y la posibilidad de desplazamiento relativa. Entre las ventajas de este tipo de material se pueden encontrar:

- Infusibilidad: Los termoestables son degradados por el calor sin pasar por el estado líquido.
- Esto mejora algunos aspectos del comportamiento al fuego: a excepción de caso particulares, no gotean durante un incendio proporcionando un efecto barrera.
- Cuando la temperatura aumenta, la retención del módulo es mejor debido a la estructura 3D.
- Mejor comportamiento de termofluencia: los enlaces entre las macromoléculas restringen los desplazamientos relativos.
- Herramientas y procesos más sencillos para algunos materiales trabajados manualmente en estado líquido.

De igual manera, algunos inconvenientes serían:

- La reacción química del enlace lleva un tiempo relativamente largo que alarga los ciclos de producción y a menudo requiere de un calentamiento lo que supone un gasto adicional.
- El procesado es más difícil de monitorizar debido a la necesidad de obtener un equilibrio preciso entre la reacción de los enlaces y la forma del plástico.
- Algunos polímeros liberan gases, en particular vapor de agua, durante el endurecimiento.

Este tipo de ventajas ha ocasionado que, tal y como se ha comentado anteriormente, los compuestos realizados con una matriz termoplástica hayan aumentado sus aplicaciones consiguiendo entre un 25 y 35% de la demanda global de composites de carbono.

Existen muchos tipos diferentes de termoestables, entre los más empleados se encuentran: las resinas epoxis con una amplia gama de propiedades que les permiten ser utilizadas en compuestos de alta tecnología, los poliésteres insaturados cuya ventaja se encuentra en el estado líquido del material el cual le permite definir las propiedades en función a la aplicación a la que vaya a ser destinado.

Sin embargo, el reciclaje de desechos es complejo para los termoestables y sus materiales compuestos debido a los enlaces y la presencia de fibras rotas durante el reciclaje. Para solucionar este problema el reciclaje debe ser considerado en la etapa de diseño con el fin de elegir las mejores soluciones para la pieza al final de su vida útil [9].

Por otro lado, los materiales termoplásticos tienen la estructura molecular más simple, con macromoléculas químicamente independientes (Figura 2.7.a). Al calentarlos, superan la temperatura de transición vítrea, luego se conforman, se consolidan y se solidifican al enfriarse. Se pueden repetir múltiples ciclos de calentamiento y

enfriamiento, lo que permite su reprocesamiento y reciclaje. Se estima que el termoplástico sigue siendo óptimo para operaciones en servicio hasta que el número de ciclos realizados disminuya sus propiedades mecánicas (en especial el módulo elástico que desciende fácilmente con el empleo de temperatura) a menos de un 80% de las obtenidas en el termoplástico antes de ser reconvertido. Entre sus ventajas se encuentran las siguientes:

- El ablandamiento o fusión por calentamiento permite la soldadura y el termoconvertido.
- Los ciclos de procesado son muy cortos debido a la ausencia de reacción química en los enlaces.
- En este tipo de material solo hay una transformación física.
- Si son correctamente secados antes del procesado, los termoplásticos no desprenden gases ni vapor de agua.
- Los desperdicios son parcialmente reutilizables como materia prima debido a la reversibilidad de la fusión y el ablandamiento físico.

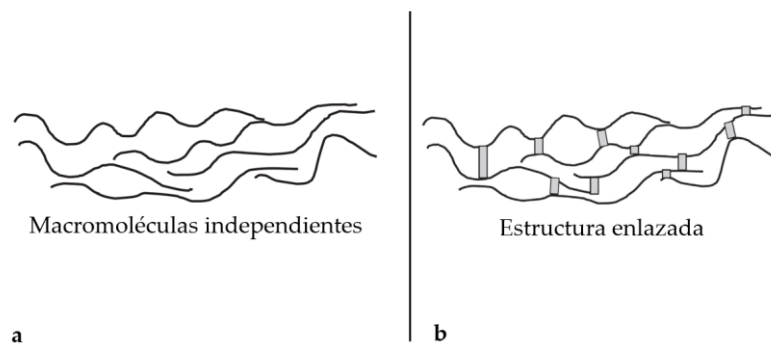


Figura 2.7. Enlaces de los materiales plásticos: **a.** Termoplásticos; **b.** Termoestables (Adaptada de [9])

Entre los termoplásticos más empleados se encuentran los polietilenos, polipropilenos, poliestirenos y PVCs, materiales económicos y versátiles capaces de encajar en una gran variedad de aplicaciones industriales. No obstante, cabe señalar el alto rendimiento en servicio que otorga el poliuretano termoplástico (TPU, *thermoplastic PolyUrethane*). Este consiste en un elastómero que, al igual que el resto de su familia, es elástico y procesable por fusión. Además, puede ser procesado en extrusión, así como en equipos de moldeo por inyección, soplado y compresión.

En concreto, el poliuretano termoplástico será el empleado a lo largo de este trabajo, por lo que es necesario hacer especial hincapié en él para detallar sus principales características y propiedades.

Este tipo de plástico es apreciado por sus altas prestaciones mecánicas, así como por, su tenacidad y su excelente resistencia a la abrasión [10]. Contempla una alta gama de módulos elásticos y durezas que descienden hasta 60 Shore A. Los TPUs tienen una

atractiva relación precio/propiedad, así como buenos comportamientos con aceites, combustibles e hidrocarburos alifáticos. Conserva una buena resistencia a la fatiga por flexión, gran facilidad de reciclado y amplias posibilidades de coloración. Sirve como aislante eléctrico y tiene un buen comportamiento a bajas temperaturas (hasta -70°C).

Como inconvenientes, los TPUs se ven perjudicados por una menor elasticidad que los cauchos convencionales [9]. Pueden llegar a tener riesgos de termofluencia cuanto mayor sea la temperatura, además de riesgos de hidrólisis y contemplan un comportamiento térmico limitado.

Cabe señalar que la demanda mundial de polímeros termoplásticos fue estimada en 2017 en 47 millones de toneladas, con una previsión de un aumento comprendido entre el 4 y 5% anual. Dentro de esta demanda, un 10% corresponde al uso de TPUs. Son muchas las aplicaciones para las cuales es utilizado el poliuretano termoplástico. Entre otras, se encuentra el sector de automoción con elementos como molduras, botas de velocidad o soportes laterales, así como elementos para el sector deporte o sector de automoción [6].

El conformado de esta matriz junto a fibras da como resultado un compuesto flexible y adaptable a diversos usos, siendo de actual interés en varios sectores industriales. Por ejemplo, en el sector automotriz se conoce que los termoplásticos son empleados en más de 1000 piezas diferentes, entre ellas en un solo vehículo el 17% de las mismas está compuesto de TPU [9]. Otros sectores como la fabricación aditiva emplean TPU para fabricar las juntas de piezas funcionales sin necesidad de molde [13]. Además, este polímero puede someterse al reciclado químico conocido como quimiólisis, el cual constituye teóricamente el mejor rendimiento a la hora de reciclar un plástico [14].

Las características presentadas sobre este tipo de polímero, hacen interesante su conformado junto a refuerzos tipo fibra. No obstante, antes de incidir en mayor medida en los materiales compuestos con matriz de poliuretano termoplástico se van a resumir aspectos importantes sobre los principales refuerzos empleados en la fabricación de un material compuesto.

2.2.2. Refuerzos para materiales compuestos de matriz polimérica

Una vez analizadas las principales matrices y llegando a concretizar en el poliuretano termoplástico como matriz empleada en el presente trabajo, se analizarán los refuerzos más interesantes de cara a la fabricación de un material compuesto.

Desde un punto de vista mecánico, debido a sus mejores propiedades mecánicas respecto a la matriz, el objetivo del refuerzo es soportar la mayor parte de la función estructural del material compuesto [9]. Aunque existen distintas clasificaciones de

refuerzos, una de las clasificaciones más habituales, divide los refuerzos en función de su geometría o tipología o, dicho de otra forma, en función de las dimensiones necesarias para definir su geometría. Ahí se encuentran, los refuerzos de una dimensión o partículas (Figura 2.8.a), los de dos dimensiones o fibras (que pueden ser cortas o largas, Figura 2.8.b) y las de tres dimensiones o láminas o tejidos (Figura 2.8.c). Estos a su vez, podrían clasificarse en refuerzos continuos (fibras largas y tejidos) o discontinuos (fibras cortas, partículas y whiskers).

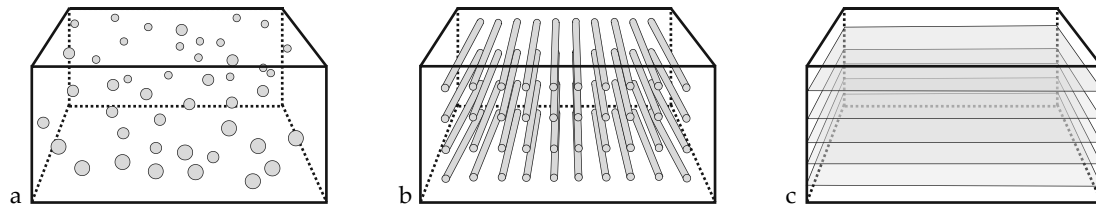


Figura 2.8. Esquema de los tipos de fibra empleados para refuerzos: a. partículas; b. fibras; c. láminas

Este trabajo se centra en materiales compuestos donde el refuerzo es continuo, concretamente tipo fibra. Las fibras pueden encontrarse en distintas configuraciones donde las que más destacan son las conocidas como *tow* en forma de tela o tubo (Figura 2.9.a.b), *felt* (Figura 2.9.c), en forma de trama, *mat* (Figura 2.9.d) o como hilo trenzado, *yarn* (Figura 2.9.e).

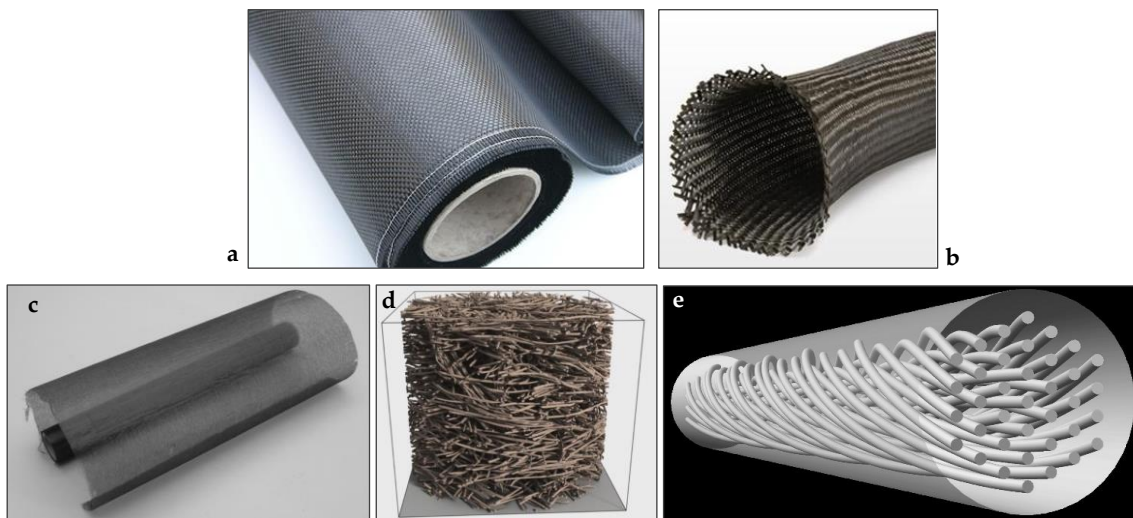


Figura 2.9. Diferentes disposiciones de fibras de carbono: a. Tela; b. Tubo; c. Felt; d. Mat; e. Yarn

El tejido se realiza en dos o más direcciones de modo que tenga las propiedades mecánicas de los filamentos en las direcciones requeridas. Normalmente se realiza en dos dimensiones, sin embargo, el tejido tridimensional es cada vez más común. Un compuesto hecho de un tejido de dos dimensiones es fuerte en el plano de la tela, pero débil en la dirección perpendicular a este plano. En cambio, una estructura tridimensional tejida es mecánicamente mejor en las tres direcciones en términos de propiedades mecánicas y conductividad.

Como ya se ha comentado, el refuerzo tipo fibra es uno de los más utilizados. Tanto es así que si se analizan las publicaciones referidas a materiales compuestos se observa como el refuerzo tipo fibra copa la mayoría de artículos publicados referidos a materiales compuestos de matriz poliméricos (Figura 2.10).

Por otro lado, existen multitud de clasificaciones para designar los diferentes tipos de fibra, tal y como se aprecia en la Figura 2.11. Según su origen se podrían clasificar en fibras naturales y sintéticas. Las fibras naturales son aquellas que se obtienen mediante el procesamiento de productos naturales como plantas, animales o minerales. Las fibras sintéticas se componen de miles de filamentos y englobarían todas aquellas cuyo origen no es natural [3].

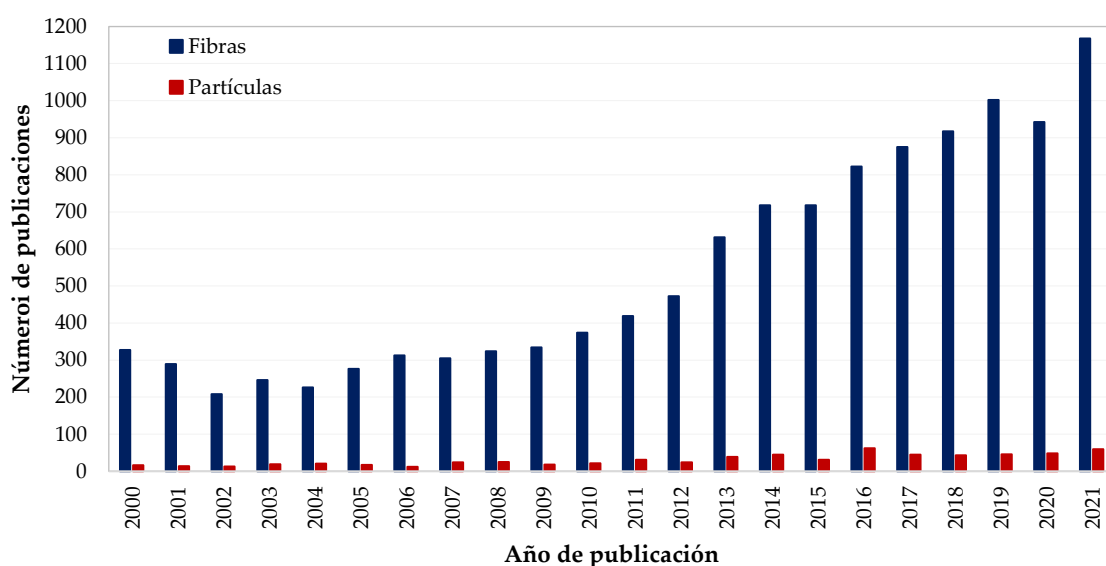


Figura 2.10. Análisis bibliométrico de la evolución de los estudios referidos a los materiales compuestos en función a la geometría del refuerzo en el campo de la Ingeniería

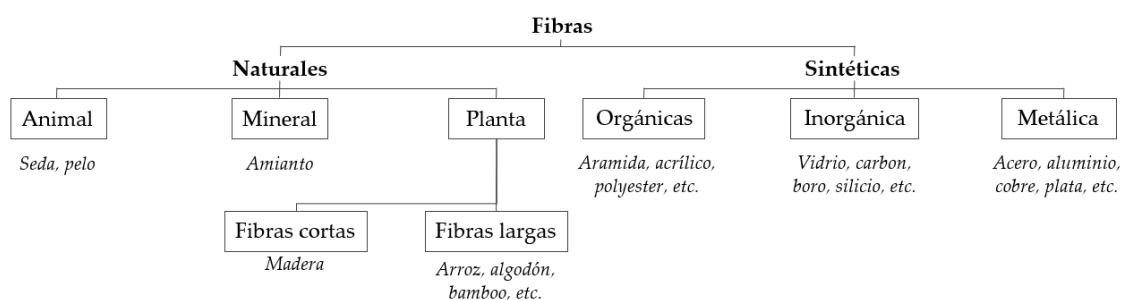


Figura 2.11. Clasificación general de los diferentes tipos de fibra utilizadas como refuerzos de PMC

Además, si se analiza la literatura referida a los diferentes tipos de fibras en función a su naturaleza que son empleados como refuerzo de materiales compuestos (Figura 2.12) se puede ver como las fibras de carbono cada vez son más empleadas para este tipo de conformado. **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Además, destaca la escasez de investigaciones sobre las fibras naturales y de aramida. Esto demuestra que, al menos en el ámbito de la ingeniería, el empleo de este tipo de fibras

no se encuentra tan industrializado. Por otro lado, cabe señalar la clara tendencia ascendente en materiales compuestos reforzados con fibras de vidrio, las cuales compiten con las de carbono en el conformado de compuestos poliméricos.

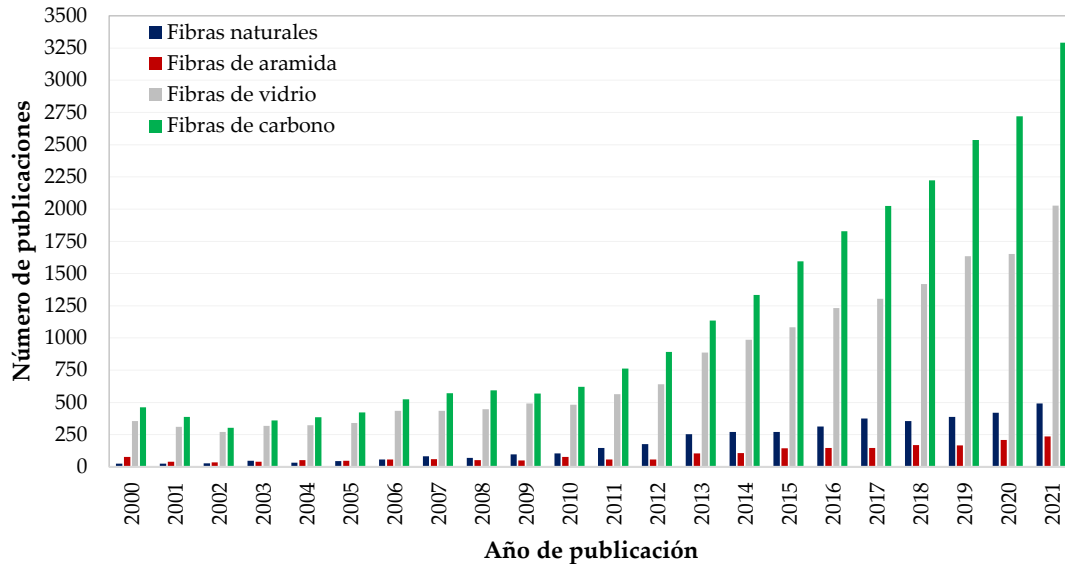


Figura 2.12. Análisis bibliométrico de la evolución de los estudios referidos a los tipos de fibras empleados en materiales compuestos en el campo de la Ingeniería

Generalmente, las fibras de carbono se emplean en compuestos avanzados, seguidas por las de aramida con los compuestos intermedios, siendo las de vidrio las que contemplan los compuestos genéricos, entendiendo por avanzado una mayor exigencia funcional y por genérico, una menor [10]. Para mencionar un ejemplo de aplicabilidad de estos tipos de fibras, en la Figura 2.13.a se puede ver una fábrica donde se empleó fibra de carbono con resina termoplástica fabricada por la compañía Komatsu Seiren Fabric Laboratory para la sustitución de varillas metálicas. La fibra contempla una elevada resistencia a la tracción de la mano de una gran ligereza estructural. La compañía japonesa denota que un equivalente metálico con la misma resistencia pesaría aproximadamente cinco veces más [15]. Por otro lado, en la Figura 2.13.b se puede ver el estadio olímpico de Montreal, el cual fue diseñado con techo replegable de fibra de aramida. Este techo reducía las pérdidas de calor y evitaba la condensación [16]. Por último, Figura 2.13.c arquitectos como Vivex y S-AR han diseñado módulos de vivienda contruidos con paneles de vidrio reciclados. Este material es capaz de aislar frente a temperaturas extremas [17].

A continuación, para un mejor entendimiento de las fibras más empleadas en compuestos poliméricos, se presentarán características, tipos y propiedades de las fibras de vidrio, aramida y carbono. Las fibras de vidrio son ampliamente empleadas como refuerzo debido a su equilibrio propiedades mecánicas/coste.

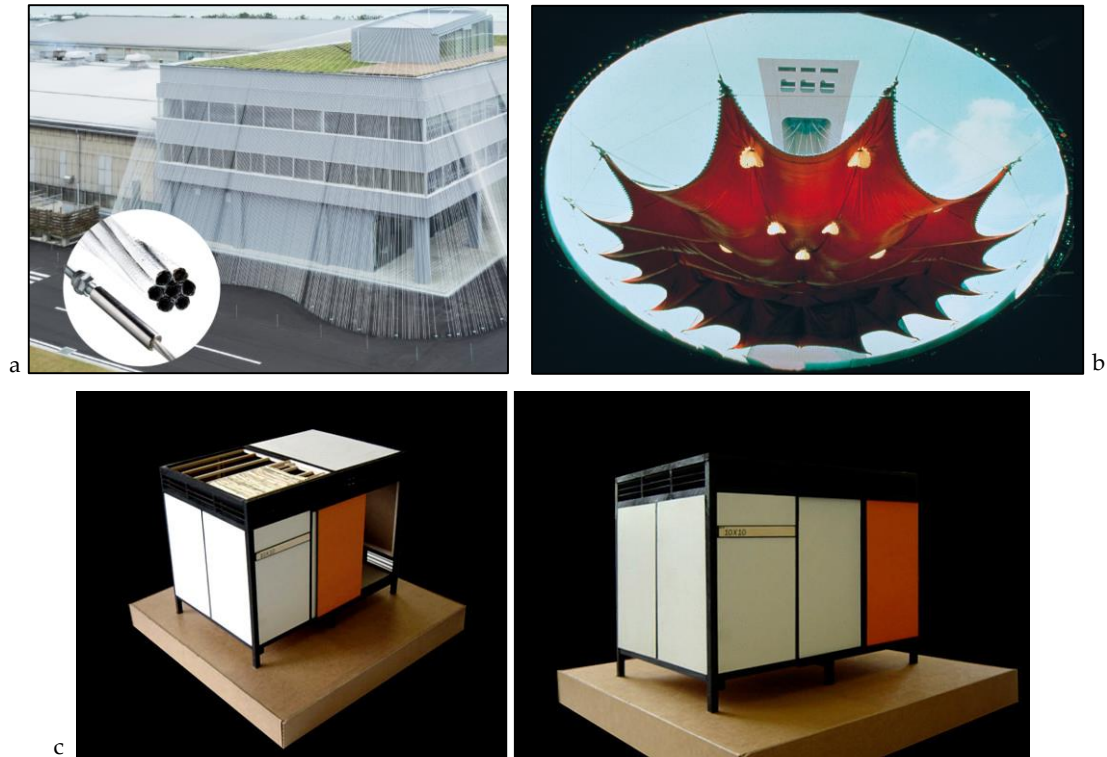


Figura 2.13. Ejemplos de aplicaciones de fibras: **a.** fibra de carbono termoplástica [15]; **b.** fibra de aramida [16]; **c.** fibra de vidrio [17]

Entre los tipos de fibras de vidrio más empleados se encuentran: el vidrio eléctrico, conocido comercialmente como vidrio-E, la fibra de vidrio más común debido a su bajo coste y su alta densidad; el vidrio estructural (S-2) que aporta una mayor resistencia en piezas que deben soportar altas presiones; el vidrio-D que cuenta con excelentes propiedades dieléctricas carbono [18] y los vidrios C y ECR que poseen resistencia a los ácidos [9]. Aunque haya varios tipos, las fibras de vidrio tienen en común los siguientes aspectos:

- Alta resistencia térmica.
- Propiedades aislantes.
- Módulo elástico más alto que las fibras poliméricas, aunque más bajo que las de carbono.
- Bajo coeficiente de expansión térmica.
- Alta densidad.
- Fragilidad frente a tensiones altas durante la fabricación.
- Propiedades abrasivas.

Por otro lado, las fibras de aramida son orgánicas, muy resistentes con una baja densidad y una gran tolerancia al impacto. A pesar de tener una elevada resistencia a tracción, presentan una debilidad en cuanto a compresión se refiere. Además, son sensibles a la luz ultravioleta y su uso a largo plazo debe limitarse en temperaturas en torno a 350 °C [18]. Las más conocidas son el Kevlar y el Twaron. Este tipo de fibras se

emplean especialmente en aplicaciones de medio-alto rendimiento funcional, tienen altas propiedades específicas y se utilizan por sus características atractivas como:

- Alta resistencia a tracción.
- Alto módulo elástico.
- Alta resistencia a la fatiga.
- Menor coste que la fibra de carbono.
- Densidad baja.
- Bajo coeficiente de fricción.
- Bajo coeficiente de expansión térmica.

Por último, las fibras de carbono son atractivas por su combinación de baja densidad, alto módulo elástico y alta resistencia. Además, poseen características singulares como su conductividad térmica, valiosa para la disipación de calor. Por otro lado, presentan conductividad eléctrica, lo que permite su uso para las interferencias electromagnéticas. El principal objetivo de este tipo de material es la sustitución de piezas estructurales metálicas con una mayor densidad, como por ejemplo las piezas de acero o titanio [19]. En la Tabla 2.1 se muestran las principales ventajas e inconvenientes de las fibras de carbono:

Tabla 2.1. Ventajas e inconvenientes de la fibra de carbono

Ventajas	Inconvenientes
Baja densidad	Anisotropía
Alto módulo elástico	Baja tensión de rotura
Bajo coeficiente de expansión térmica	Baja resistencia a compresión
Estabilidad térmica en ausencia de oxígeno	Tendencia a oxidarse
Estabilidad química	
Alta conductividad térmica	
Coste con tendencia decreciente.	

Las fibras de carbono pueden ser clasificadas de varias formas, por ejemplo, de acuerdo a las propiedades mecánicas, al precursor o a la temperatura final del tratamiento térmico. Una de las clasificaciones de los tipos de fibra de carbono es la formada de acuerdo a la resistencia y al módulo de Young (Figura 2.14). De este modo se clasifican en [19]:

- Fibras de módulo muy alto (*Ultra-High-Modulus, UHM*). Con módulo > 450 GPa.
- Fibras de alto módulo (*High-Modulus, HM*). Con módulo entre 350 y 450 GPa.
- Fibras de módulo intermedio (*Intermediate-Modulus, IM*). Con módulo entre 200 y 350 GPa.
- Fibras de bajo módulo y alta resistencia (*High Tenacity, HT*). Con módulo < 100 GPa y resistencia > 3.0 GPa.
- Fibras de resistencia muy alta (*Super High Tenacity, SHT*). Con resistencia > 4.5 GPa.

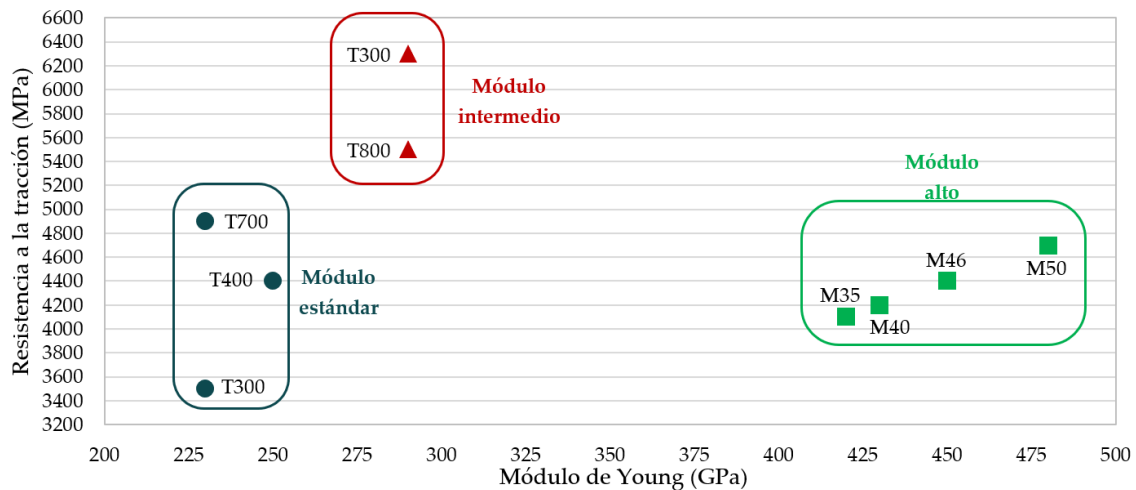


Figura 2.14. Tipos de fibra de carbono en función al módulo de Young (GPa) y la resistencia a la tracción (MPa)

Para poder ver, de manera cuantitativa, las diferencias principales entre propiedades de los tres tipos de fibras desglosados anteriormente (vidrio, aramida y carbono), en la Tabla 2.2 se muestra un desglose de las mismas frente al acero al carbono. La densidad de la fibra de carbono es menor que la de vidrio, pero mayor que la de aramida. Se aprecia cómo ninguno de los tres casos, tiene una densidad mayor a la del acero al carbono. El módulo de elasticidad específico de la fibra de carbono es mayor que el de vidrio y aramida. Se aprecia como el módulo de la fibra es ligeramente mayor que el del acero al carbono, siendo el módulo específico mucho más elevado. La resistencia a tracción y específica son equiparables entre las tres fibras y muy superiores a la del acero al carbono. En cuanto a la resistencia a compresión, el carbono presenta un valor más pequeño que el vidrio [4].

Se puede distinguir cómo las fibras de carbono muestran una resistencia a tracción mucho mayor que a compresión. Respecto al parámetro de ductilidad, el carbono presenta el menor de las tres fibras, seguido por aramida y vidrio, respectivamente. Por último, la fibra de carbono es claramente ventajosa en cuanto al coeficiente de expansión térmica (CTE) se refiere. Hay propiedades que no se han tenido en cuenta en la tabla y que son realmente ventajosas para la fibra de carbono como la alta resistencia a la temperatura en servicio, la resistencia química o la conductividad térmica y eléctrica [9].

Tras haber realizado la descripción de los elementos de la Tabla 2.2 es importante destacar algunas propiedades como la resistencia a la tracción y la resistencia a la tracción específica que muestran las fibras frente al acero. Durante muchos años, los metales puros y las aleaciones metálicas han destacado por su buen comportamiento en servicio en piezas estructurales que requieren de altas prestaciones mecánicas. Estos datos muestran cómo, sabiendo diseñar y fabricar el material compuesto de forma

correcta, es posible llegar a obtener propiedades similares o mejores que las comúnmente obtenidas por otro tipo de materiales, con una densidad de material mucho menor.

Tabla 2.2. Propiedades básicas de las fibras de carbono, vidrio y aramida; frente al acero al carbono (Adaptada de [3])

Propiedad	Fibra de carbono (T300)	Fibra de vidrio (S-2)	Fibra de aramida (49)	Acero al carbono
Densidad (g/cm ³)	1.76	2.46	1.45	7.85
Módulo elástico (GPa)	230	86.9	112	190-210
Módulo elástico específico (GPa)	131	35.3	77.2	24.2-26.8
Resistencia a tracción (GPa)	3.53	4.89	3.00	0.276-1.882
Resistencia a tracción específica (GPa)	2.010	11.990	2.070	0.035-0.24
Ductilidad (%)	1.5	5.7	2.4	10-32
Resistencia a compresión (GPa)	0.87	1.60	-	-
CTE (10 ⁻⁶ K ⁻¹)	-0.41	2.9	-6	11.0-16.6

Como ya se ha comentado, el refuerzo más importante y extendido parece ser el carbono en forma de fibra que unido a una matriz termoplástica como puede ser el TPU, forman un compuesto (CF RTP o Carbon Fiber Reinforced Thermoplastic Polymer) con unas excelentes propiedades y de gran proyección como se ha visto en los distintos análisis bibliográfico, por ello, a continuación, se van a comentar de forma más extendida algunas de las características más importantes de este material, así como otros aspectos relacionados con su rendimiento funcional.

2.3. Materiales compuestos termoplásticos de fibra de carbono (CF RTP)

Frente a los materiales utilizados comúnmente en la industria, los CF RTP ofrecen mejoras de aligeramiento comparados con los aceros y aluminios. Existen multitud de aleaciones y tratamientos térmicos en aceros y aluminios por lo que el rango de propiedades de este grupo es muy extenso. Sin embargo, los materiales compuestos, en general, tienen menos densidad que las cerámicas y los metales y a su vez, sus propiedades mecánicas compiten con dichos grupos de materiales [20].

Además, en el ámbito científico ha sido notorio un auge de composites termoplásticos aplicados a diversas líneas de investigación (Figura 2.15). Los artículos mostrados en la figura han sido obtenidos mediante el filtro del término «CF RTP» en cualquier apartado dentro de cualquier ámbito de investigación. Tal y como se puede ver, el número de investigaciones que tratan sobre compuestos de resina termoplástica

son ínfimos respecto a los de resina termoestable. Sin embargo, se aprecia una tendencia ascendente en el estudio de los mismos durante los últimos años, esto es debido a que son materiales de nuevo desarrollo donde las condiciones de composite termoestable no tienen por qué ser extrapolables.

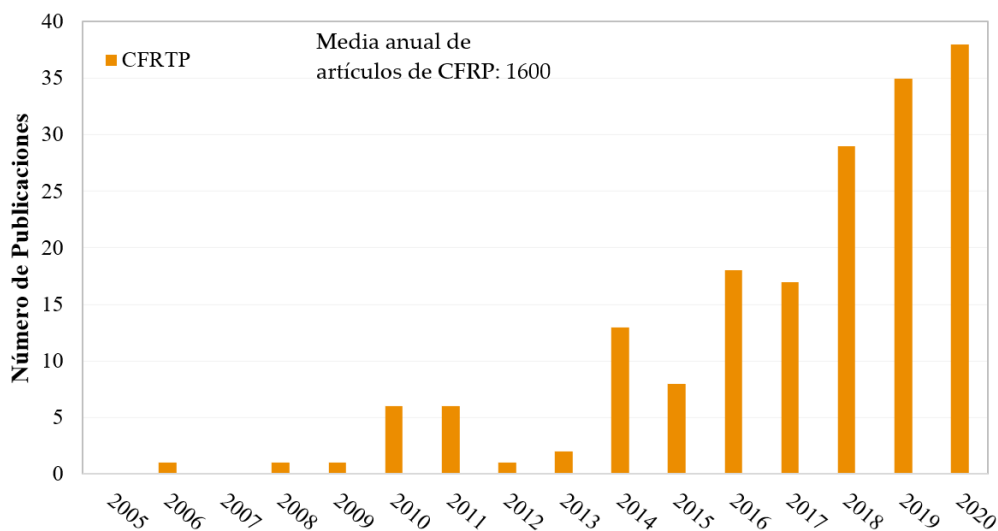


Figura 2.15. Análisis bibliométrico de la evolución de los estudios referidos a los CF RTP para todos los ámbitos de investigación

Sin embargo, uno de los principales problemas que suelen presentar los CF RTPs es la compatibilidad entre la fibra y la resina termoplástica. La resina tiene una viscosidad muy alta y debe calentarse hasta superar su temperatura de transición vítrea. Las temperaturas para formar termoplásticos, cercanas a 350° , son mucho mayores que las de los termoestables que pueden llegar a alcanzar 180° [21,22], lo cual puede suponer un hándicap para su industrialización. No obstante, cabe señalar que el procesado de CF RTPs puede requerir un punto de partida más complejo al necesitar preimpregnados en la fibra o utillajes especiales para llevar a cabo dicha operación. De tal forma que, aunque en el conformado de CF RTPs deban utilizarse técnicas, herramientas y equipos especiales, puede aparecer la ventaja de eliminar operaciones previas al procesado como podría ser el preimpregnado de fibras. Este hecho, junto a la bajada de costes que se espera para las resinas termoplásticas debido a su ampliación en diferentes sectores industriales puede hacer que el conformado de CF RTPs sea un proceso competitivo.

La generación del material compuesto se divide en tres pasos principales: calentamiento, consolidación y enfriamiento (Figura 2.16). En el caso de los termoplásticos el polímero se calienta para ablandarse o fundirse. Normalmente, el calentamiento se produce por resistencia, pero también es posible el calentamiento por inducción. Finalmente, se procede a la reducción de la temperatura a la vez que se sigue aplicando una correcta fuerza con el fin de evitar posibles defectos como burbujas internas y tensiones residuales [9].

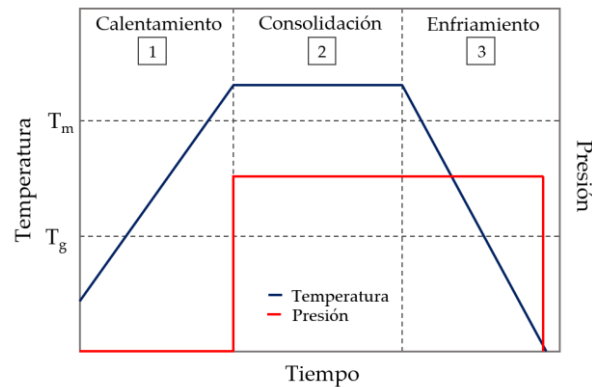


Figura 2.16. Etapas del ciclo de fabricación de un material compuesto (Adaptada de [10])

Existen diferentes formas de ejecutar este ciclo. Una de los procesos más comunes es el laminado. Este proceso permite elegir las orientaciones de las fibras logrando un mayor control sobre las propiedades mecánicas de los materiales compuestos según requieran las aplicaciones específicas. Sin embargo, hay propiedades difíciles de controlar mediante este proceso como pueden ser el calor y la presión necesaria para realizar el conformado. Otros como el moldeo por compresión emplean moldes en ambas caras del compuesto para proporcionar la presión adecuada y así, otorgar una geometría, dimensiones y acabado superficial controlados. No obstante, se debe tener en cuenta que la fabricación de moldes para realizar este proceso de conformado es bastante cara [3]. Otros como el proceso de termoconformado, aplican además temperatura para calentar el material y así reblandecerlo y forzar su adaptación a la forma de un molde. Este proceso se emplea sobre todo para la fabricación de compuestos de pared delgada. Los tiempos de conformado son relativamente cortos, lo cual es posible gracias al rápido procesamiento de los termoplásticos. Es importante tener en cuenta la temperatura del conformado ya que, una mala configuración de este parámetro podría generar agrietamiento en la matriz, pandeo de las fibras, arrugas y por tanto, una pieza deficiente [23].

Generalmente posterior a este proceso de conformado, se requiere algún tipo de postproceso, entendiendo por postproceso toda operación secundaria capaz de para conseguir la geometría final, acabados y tolerancias requeridas. Todos los PMC suelen ser sometidos a procesos de mecanizado, sin embargo, en el caso de los CF RTP, debido a sus especiales características y su temperatura de transición vítrea, este proceso es complejo y es uno de los responsables del retraso en su expansión industrial.

Para definir los tipos de postprocesados se podría hacer una distinción entre convencionales y no convencionales. De esta forma, se encontrarían procesos convencionales entre los que destacan: fresado, taladrado o torneado; y procesos no convencionales o no tradicionales como: chorro de agua con abrasivo, láser o electroerosión.

En el postprocesado de compuestos de matriz polimérica se deben tener en cuenta ciertos requisitos como la temperatura de transición vítrea de la matriz, ya que, un exceso de temperatura durante el proceso de corte puede provocar defectos en la pieza final.

Dado que es uno de los puntos críticos del presente trabajo, se verán con más detalle más adelante. Sin embargo, para todos los casos, las propiedades mecánicas influyen decisivamente en este proceso, por ello, se deberá conocer cómo pueden variar estas propiedades en función de la configuración del material.

Como ya se ha comentado, la función estructural es la característica fundamental que ha provocado la irrupción de los CFRP en el mercado industrial. Esto no es diferente para los CF RTP donde sus características mecánicas específicas hacen que sea un material tan interesante para un elevado número de aplicaciones. Sin embargo, como ocurre con todos los materiales compuestos, existe un alto grado de personalización y esta posibilidad está definida por la cantidad y orientación de refuerzos. Jugando con estos parámetros, es posible obtener materiales adaptados a una determinada finalidad y sin la modificación del proceso de fabricación del material que permite esa flexibilidad en lo que a construcción se refiere, dentro de unos rangos.

Sin embargo, estas mismas propiedades son la que determinan el posterior postprocesado del material, dificultándolo. Por ello, el análisis de la influencia de estos parámetros puede llegar a definir la rentabilidad del proceso, así como la idoneidad del material por sus propiedades mecánicas.

La orientación de colocación de las fibras junto al porcentaje de refuerzo del material compuesto influye en gran medida en este tipo de propiedades. El módulo y la resistencia de un compuesto aumenta con el aumento de la fracción de volumen del refuerzo. Esto quiere decir que para lograr un material más resistente hará falta el mayor porcentaje de fibra posible. Esta misma orientación también influye de forma determinante en las características del material compuesto, fundamentalmente en el módulo de elasticidad. Las fibras continuas, colocadas paralelas entre sí y unidireccionalmente, originan la estructura más resistente cuando las cargas se aplican paralelas a las fibras, aunque acarreen problemas de anisotropía. Por tanto, se utiliza también la colocación de las fibras en disposición ortogonal cruzada en una o varias capas, creando una mayor uniformidad estructural en el compuesto.

Existe una relación entre la orientación y el porcentaje de las fibras, así cuando se trata de fibras continuas colocadas unidireccionalmente se puede llegar al máximo porcentaje de refuerzo en el compuesto: 70-80%. En el caso de una colocación ortogonal los porcentajes de fibra se reducen a un 45-65%. Finalmente, el caso en que la fibra se distribuya aleatoriamente el porcentaje queda establecido entre un 20 y 40% [5]. Se puede

ver cómo, a medida que difiere la disposición de las fibras, los porcentajes de las mismas disminuyen. Esto es debido a la necesidad de las fibras de ser consolidadas de forma correcta. Por lo tanto, se debe tener en cuenta el porcentaje de fibra/resina y la orientación de las fibras de cara a la aplicación a la que vaya a ser destinado el material compuesto. Se entiende que una aplicación con una alta carga funcional del material requerirá un porcentaje de fibra elevado, y viceversa.

Por todo lo explicado, es necesario conocer el porcentaje de refuerzo y resina que compone un material compuesto tras su conformado. La fracción de volumen de fibra se puede calcular mediante la ecuación Ec. 2.1: la regla de mezclas para la densidad. En ella se utiliza la densidad medida del compuesto y las densidades conocidas de la fibra y la matriz.

$$\rho_c = v_f \rho_f + (1 - v_f) \rho_m \quad \text{Ec. 2.1}$$

Donde ρ_c es la densidad del compuesto, ρ_f es la densidad del refuerzo, ρ_m es la densidad de la matriz y v_f es la fracción de volumen de la fibra. En base a esta ecuación se pueden emplear varios métodos para lograr determinar el porcentaje de refuerzo y matriz de un compuesto. La norma UNE-EN 2559/1997: *Determinación de los contenidos de resina y fibra de la masa de fibra por unidad de superficie* [24], describe tres métodos diferentes para el cálculo requerido:

- Método de extracción por combustión húmeda (código A). Se determina la diferencia de masa pesando hasta que se alcance una masa constante, antes y después de extraer la resina por digestión ácida. Se utiliza una solución de ácido sulfúrico concentrado y peróxido de hidrógeno.
- Método de extracción Soxhlet (código B). Se determina la diferencia de masa pesando hasta que se alcance una masa constante, antes y después de extraer la resina con metil-etil-cetona o cualquier otro disolvente adecuado y convenido entre el usuario y el fabricante.
- Método de extracción por disolución y decantación (código C). Similar al método de extracción Soxhlet pero más rápido.

Tras haber definido los requisitos a tener en cuenta para el correcto conformado de un material compuesto termoplástico reforzado con fibras y, tras haber señalado la importancia que tiene la realización de un correcto postprocesado, a continuación, se va a desarrollar de forma más exhaustiva un apartado que desglose los requisitos a tener en cuenta para el postprocesado de CF RTPs.

2.4. Postprocesado de los CF RTP

Como ya se ha comentado, casi todos los materiales compuestos requieren de algún tipo de postprocesado tras su fase de conformado. Esta puede ser tan importante como el proceso de taladrado en los CFRP aeroespaciales necesarios para su ensamblado o secundaria como el desbarbado de los MMC utilizados en electrónica.

Entre los postprocesados más empleados en compuestos poliméricos reforzados con fibras se pueden encontrar los de conservación y los de eliminación o sustracción del material. Procesos como el cizallado o el punzonado de compuestos, destacan por su rápida aplicabilidad. Son tecnologías ampliamente utilizadas en la obtención de preformas de este tipo de materiales, donde la calidad del corte en términos macro y microgeométricos no influye excesivamente en el objetivo del postprocesado. Por otro lado, para el corte de compuestos poliméricos reforzados con fibras existen postprocesados sustractivos clasificados como convencionales y no convencionales, donde la principal diferencia entre ellos es el modo en que el material es eliminado. De esta forma, se pueden encontrar postprocesos convencionales, donde existe una interacción herramienta-pieza, como el fresado, torneado o taladrado; y postprocesos no convencionales como por ejemplo el corte por chorro de agua con abrasivo y el corte láser.

Si se analizan las investigaciones de los postprocesados más influyentes referidos a este tipo de material (Figura 2.17) se puede ver cómo hay una clara tendencia ascendente para cualquiera de ellos.

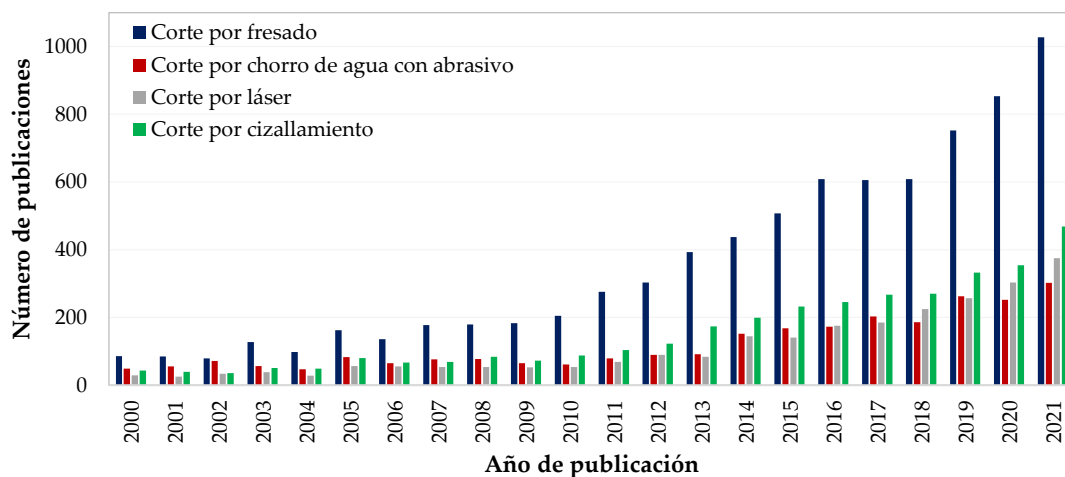


Figura 2.17. Análisis bibliométrico de la evolución de los estudios referidos a los postprocesados por fresado y chorro de agua centrados en materiales compuestos poliméricos reforzados con fibras en el campo de la ingeniería

En el caso del corte por fresado se debe tener en cuenta que puede ser el proceso que lleva más tiempo en la industria y, al igual que en el corte por cizallamiento, operaciones como el corte de metales puros y aleaciones metálicas ya se encuentran

prácticamente industrializadas. Este puede ser uno de los principales motivos por el que hay tanta diferencia numérica en cuanto a publicaciones de los postprocesos.

Por otro lado, el número de investigaciones referidas al corte por cizallamiento se encuentra casi a la par que las asociadas al corte láser y por chorro de agua. Tal y como se ha comentado, esta tecnología es fácilmente industrializable, pudiendo obtener preformas de material compuesto sin un excesivo estudio técnico previo. No obstante, a la hora de postprocesar un compuesto polimérico reforzado con fibras, con el objetivo de que cumpla su función como pieza final primaria y, por ende, con la mínima aparición de defectos en la pieza, esta tecnología puede encontrar limitaciones. Por ejemplo, investigadores como Tatsuno et al. [25] han estudiado el efecto de los parámetros del corte por cizallamiento en compuestos termoplásticos reforzados con fibras. En esta ocasión, el termoplástico empleado es Nylon 6, conocido industrialmente como PA6, con una temperatura de transición vítrea de 47 °C. El CF RTP del experimento se ha considerado de pared delgada al tener un espesor de 2.3 mm. Los investigadores concluyen que el ángulo de cizallamiento es uno de los parámetros más influyentes en el corte por cizalla. Según Tatsuno, para todos los ángulos probados en el experimento, siempre se generaba una gran cantidad de fibras no cortadas (Figura 2.18.a). Además, el material sufre a tensión y cizallamiento a medida que el punzón desciende, sin que se produzca una propagación de la grieta en la dirección del espesor, aunque el punzón definitivamente acaba alcanzando la superficie inferior del material (Figura 2.18.b).

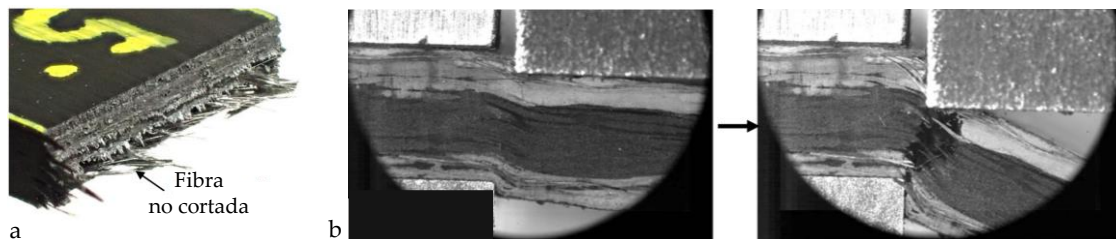


Figura 2.18. a. Fibra no cortada tras un corte por cizallamiento; b. Corte por cizalla de un CF RTP (Adaptada de [25])

Además, tal y como se ha comentado, el efecto de la temperatura en los materiales compuestos termoplásticos reforzados con fibras de carbono, es uno de los motivos por los que cuesta tanto definir un postprocesado adecuado para este tipo de materiales, perjudicándolos en su expansión industrial.

En los postprocesados de conservación y los sustractivos convencionales existe un contacto herramienta-pieza que puede generar una fricción a la hora de realizar el corte, la cual se desarrolla en forma de calor, pudiendo dar lugar a altas temperaturas y, por ende, defectos en la pieza postprocesada o en la herramienta de corte. En cambio, en los postprocesados sustractivos no convencionales no existe una herramienta física como las empleadas en los postprocesos tradicionales, sino un conjunto de elementos que se

encarga de eliminar el material deseado. Por ejemplo, en chorro de agua el corte es realizado gracias a la energía cinética que adquieren partículas de agua y aire mezcladas con partículas abrasivas.

No obstante, esta disminución de la temperatura no se refleja en el corte por láser, el cual, debido a su energía térmica como medio de eliminación, hace difícil la industrialización de este proceso para el corte de compuestos poliméricos reforzados con fibras. Investigadores como Schmidt et al. [26]. han estudiado la influencia de este proceso en este tipo de materiales, observando como el efecto de la temperatura puede llegar a ocasionar evaporación o degradación de la matriz del compuesto (Figura 2.19), lo cual da lugar a fibras desprendidas que se encuentran sueltas. Además, el refuerzo de fibra puede verse dañado térmicamente tras la exposición de una cantidad de energía térmica elevada en la sección de corte.

Otras investigaciones como la llevada a cabo por Cheng et al. [27], exponen que las fibras de carbono se expanden hasta el 50% de su diámetro debido a la gran y rápida expansión térmica durante el taladrado con láser. Además, en su experimento, la temperatura del láser funde la resina del compuesto produciendo una mala geometría del agujero. No obstante, existen tratamientos térmicos que se pueden realizar a las fibras para mejorar su comportamiento frente a la temperatura. Por ejemplo, Voisey et al. [28] en su investigación, realizaron un tratamiento térmico a las fibras de carbono de un compuesto llegando a obtener reducciones en el hinchamiento de las fibras bajo la presencia del láser.

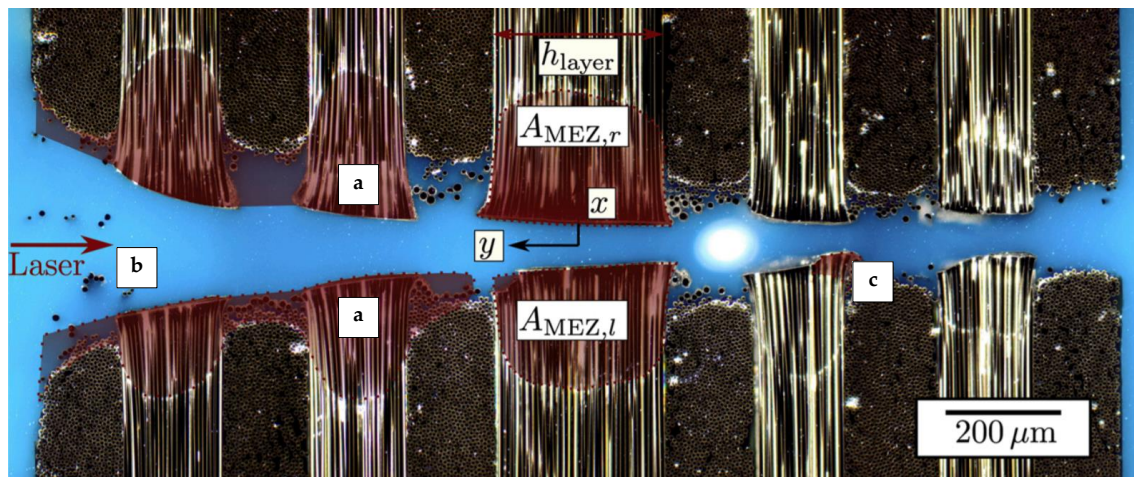


Figura 2.19. Defectos generados en una sección de un corte láser: **a.** evaporación de la matriz; **b.** fibras desprendidas; **c.** fibras dañadas térmicamente (Adaptada de [26])

Por otro lado, el corte por chorro de agua es una tecnología que aún se encuentra en desarrollo y que está empezando a demostrar sus capacidades frente a procesos de corte convencionales. En este proceso, la eliminación del material se realiza gracias a la energía cinética que adquieren partículas de agua y aire mezcladas con partículas

abrasivas. La temperatura al postprocesar disminuye drásticamente a la hora de emplear esta tecnología, lo cual favorece la disminución de defectos originados tras el corte. Esto hace que industrializar el corte de compuestos poliméricos reforzados con fibras mediante chorro de agua con abrasivo sea una opción competitiva, consiguiendo resultados más favorables en piezas finales.

En lo que a operaciones de fresado se refiere, varias investigaciones demuestran que, en el fresado de materiales compuestos, estableciendo una combinación de parámetros adecuada se pueden llegar a obtener resultados favorables sin la excesiva generación de defectos en la pieza final. Esta información ocasiona interés sobre el postprocesado mediante fresado de compuestos poliméricos con fibras.

Por lo que, como conclusión y debido a todo lo expuesto anteriormente, a continuación, se exponen apartados que desglosarán la información relevante sobre el postprocesado por chorro de agua y por fresado periférico de materiales compuestos termoplásticos reforzados con fibras de carbono.

2.5. Postprocesado de los CF RTP mediante fresado periférico

En primer lugar, se va a analizar el proceso de fresado, el cual es una operación de mecanizado que consiste en eliminar material de una pieza de trabajo a través de una fresa. El eje de rotación de la herramienta de corte es perpendicular a la dirección de avance [29]. Esta orientación entre eje de la herramienta y dirección de avance es una de las características que distingue el fresado del taladrado. Debido a la gran variedad de posibilidades que ofrece, el fresado se considera como una de las operaciones más versátiles y más útiles en la industria [30].

Existen muchas clasificaciones a la hora de definir un proceso de fresado. Sin embargo, independientemente del tipo que se esté realizando, se debe tener en cuenta el giro de la herramienta de corte relativo a la pieza. Existen dos variantes, el fresado convencional (a favor) y el fresado concurrente (en oposición) (Figura 2.20).

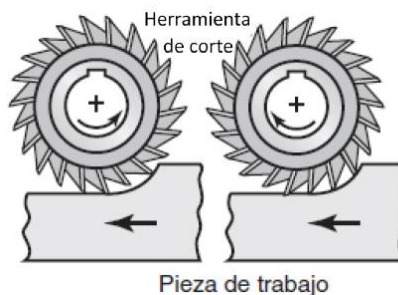


Figura 2.20. a. Fresado convencional (a favor); **b.** Fresado concurrente (en oposición) (Adaptada de [31])

En el fresado convencional el máximo espesor de las virutas se da al final del corte, cuando el diente abandona la superficie de la pieza de trabajo. En cambio, en el fresado en oposición, el corte empieza en la superficie de la pieza de trabajo donde la viruta es más gruesa [32].

Uno de los componentes más relevantes a la hora de realizar un mecanizado por fresado es la herramienta. En función al material que vaya a ser mecanizado se deben analizar las características más importantes de una herramienta de corte con el fin de reducir en la medida de lo posible la defectología ocasionada durante el proceso y aumentar el rendimiento funcional del fresado.

2.5.1. Características de una herramienta para fresado

Normalmente, una herramienta de corte para fresado está compuesta por filos que eliminan el material a medida que gira sobre su eje. La geometría y el material de la fresa depende del material que se vaya a mecanizar. En la Figura 2.21 se pueden ver los elementos principales que conforman una herramienta de fresado. Para materiales dúctiles, los ángulos de inclinación (radial y axial) deben ser positivos y grandes. En cambio, para materiales frágiles se prefiere un ángulo de inclinación más pequeño.

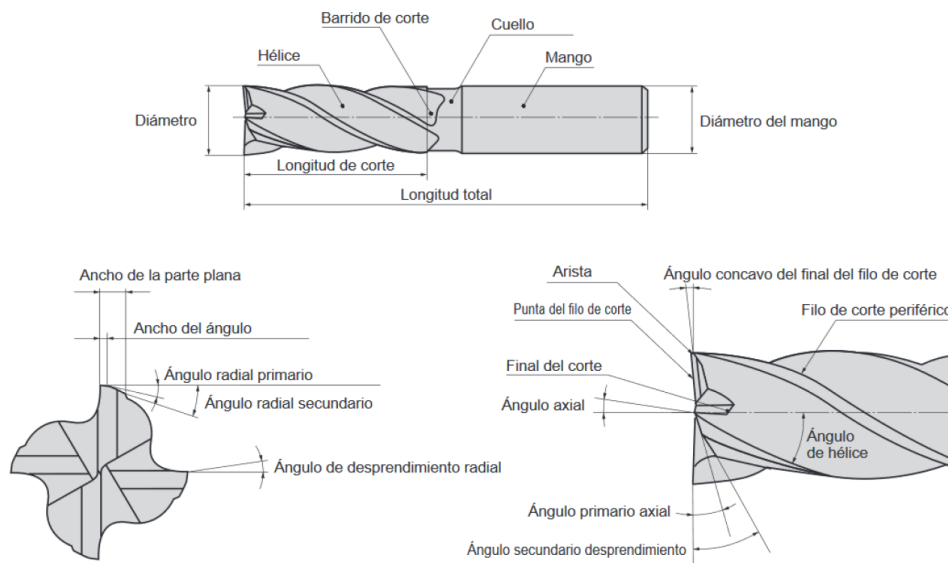


Figura 2.21. Partes que componen una fresa (Adaptada de [33])

Para la formación y evacuación de la viruta, los ángulos de inclinación se convierten en un factor relevante: un ángulo de inclinación positivo proporciona una mejor evacuación de la viruta, lo que permite un mejor acoplamiento de los bordes de corte. Un ángulo de inclinación negativo guía la viruta hacia el material, aumentando las fuerzas de corte y, en algunos casos, la fricción.

Aunque con un ángulo de inclinación negativo, la herramienta se vuelve más afilada, lo que aumenta la resistencia del filo de corte. Para materiales más blandos a menudo se eligen ángulos de alivio más grandes (axial y radial). Con un mayor ángulo de descarga el desgaste de los flancos aumenta más lentamente, aunque la resistencia de los filos de corte disminuye [34].

Por otro lado, es necesario tener en cuenta el material y recubrimiento de la herramienta de corte. Existen muchos tipos de materiales en función a la aplicación a la que vaya a ser destinada la herramienta. Las más utilizadas son las herramientas de acero rápido, carburo de Tungsteno y diamante policristalino (PCD). Respecto al recubrimiento de las fresas, se debe seleccionar el material adecuado que permita incrementar aspectos como la resistencia al desgaste o la resistencia a las temperaturas ocasionadas durante el mecanizado.

La herramienta de corte también es uno de los aspectos más relevantes en el corte por fresado de materiales compuestos poliméricos, en especial su geometría. Varios autores concuerdan que la delaminación de las fibras es uno de los principales defectos ocasionado en el corte de este tipo de material [35,36]. Una geometría de herramienta no adecuada para el corte de este tipo de materiales puede generar redondeo y erosión de los filos de corte [37,38]. Otras investigaciones como la realizada por Voss et al. [36] demuestran que la longitud de corte, siempre que se seleccione una correcta geometría de la herramienta y unos parámetros de corte adecuados, no se ve afectada.

2.5.2. Parámetros de corte en fresado

Los principales parámetros que definen la operación de fresado son la velocidad de corte (V_c), el avance por diente (f_z) y la profundidad de pasada axial (a_p) y radial (a_e). Considerando también el número de dientes (z) y el diámetro de la fresa (D) se consigue definir la operación de fresado con precisión, junto con los parámetros de la máquina como la velocidad de rotación del husillo (V_h) y el avance lineal de la máquina.

Los parámetros de la máquina se introducen en un programa CNC para los comandos de la máquina durante las operaciones, o son introducidos y controlados por un operador en fresadoras convencionales. Se pueden obtener otros valores derivados, como la sección de viruta, la tasa de eliminación de material (MRR) o la rugosidad teórica a partir de los parámetros de fresado básicos [39].

Dada la relevancia de algunos de estos parámetros para los experimentales llevados a cabo en este trabajo, se procede a exponer de forma sintetizada, los elementos que intervienen en la generación de los mismos. La velocidad de corte se define como la velocidad tangencial periférica sobre los filos de corte, usualmente definido en el máximo diámetro del filo. Se mide en m/min o en rpm. Está directamente relacionado

con el diámetro de la herramienta y la velocidad de rotación mediante la siguiente ecuación [39]:

$$V_c = \frac{\pi \cdot V_h \cdot D}{1000} \text{ (m/min)} \quad \text{Ec. 2.2}$$

Donde V_h es la velocidad de rotación en rpm, D es el diámetro de la herramienta definido en mm de forma que la velocidad de corte V_c se mida en m/min.

El avance por diente es la distancia que cubre la herramienta en una vuelta dividida por el número de dientes. Está relacionado con la carga de viruta en cada filo de la herramienta [39]. El avance lineal de la máquina (F) en el fresado se puede calcular de la siguiente forma:

$$F = f_z \cdot z \cdot V_h \text{ (mm/min)} \quad \text{Ec. 2.3}$$

Donde F es el avance lineal de la máquina dado en mm/min, f_z es el avance por diente, z es el número de dientes y V_h es la velocidad rotacional o velocidad de rotación del husillo. El número de dientes depende del diámetro de la herramienta en dos aspectos:

- El espacio entre los filos de corte consecutivos debe ser lo suficientemente amplio para evacuar la viruta removida.
- Si muchos dientes están involucrados en el corte simultáneamente, el par y la potencia que debe entregar el husillo principal de la máquina aumentan y como consecuencia, la potencia máxima proporcionada por el husillo debe considerarse para la selección de la herramienta.

El conjunto a_p y a_e representa el acoplamiento de la herramienta en el material, en las direcciones axial (eje z) y radial, respectivamente. Ambos se miden en milímetros. En términos coloquiales, el primero se conoce como la "profundidad de paso" y el segundo simplemente como el "paso". Se aplican tanto los parámetros de sección de viruta como de volumen, determinando la carga en cada borde de la herramienta [39].

Las condiciones de corte llevadas a cabo en este trabajo se basan en estudios reales y de aplicación directa encontrados en varios artículos de investigación científica. En la Figura 2.22 se muestra una representación gráfica de los parámetros correspondientes a la bibliografía de CF RTPs [40–42] y propuestos en este trabajo. Los parámetros empleados serán la velocidad de rotación (V_c) en términos de revoluciones por minuto (rpm) y la velocidad de avance por diente (V_f mm/diente). Se trata de una combinación de parámetros muy conservadora debido al sentido de esta primera fase, en la cual se desea conocer el comportamiento de un material novedoso frente al fresado.

Todos los ensayos se realizan en ausencia de lubricante debido a la mejora de los resultados obtenidos en fresado de materiales compuestos al tener en cuenta esta

condición [43–45]. En definitiva, tras el estudio realizado los parámetros seleccionados para la realización de los ensayos son los siguientes: velocidad de corte 1000 y 3000 rpm; velocidad de avance por diente 0.03, 0.05 y 0.07 mm/diente.

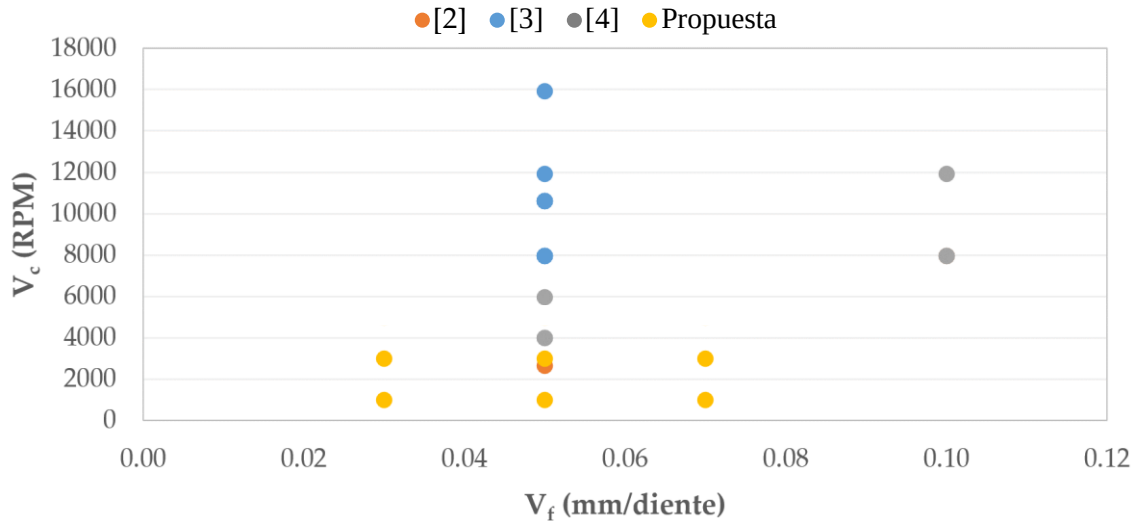


Figura 2.22. Representación gráfica de los parámetros de corte empleados en bibliografía junto con los parámetros de corte propuestos

2.5.3. Defectología asociada al fresado de CF RTP

La importancia de la superficie de las piezas en el comportamiento funcional de estas últimas es evidente al considerar que es a través de sus superficies como se establece el contacto entre ellas, que es la base principal de la mayoría de las funciones mecánicas. En concreto su misión es fundamental en aspectos tales como el comportamiento de la superficie en cuanto a brillo, lubricación, estanqueidad, cualidades tribológicas (rozamiento), resistencia al desgaste, correcto funcionamiento de ajustes fijos y móviles, fatiga y corrosión, y su capacidad para recibir tratamientos superficiales de imprimación. Para un correcto análisis de las variables que afectan a una operación de fresado se deben tener en cuenta los defectos ocasionados en la herramienta y los ocasionados en la pieza o material mecanizado.

En primer lugar, los distintos tipos de desgaste que se pueden producir en una herramienta durante la operación de fresado se muestran en la norma ISO 8688-2:1998 que se titula *Tool life testing in milling – Part 2: End milling* [46]. A continuación, se muestran de forma sintetizada, ya que, pueden llegar a ocurrir en los experimentos de este trabajo:

- Desgaste de flanco uniforme: Presenta un ancho constante y se extiende a lo largo de toda la profundidad del corte realizado (Figura 2.23.a).

- Desgaste de flanco no uniforme: A diferencia del anterior, el ancho de éste es irregular y dependerá de la posición del filo en la que se tomen las medidas (Figura 2.23.b).
- Desgaste de flanco localizado: Desgaste que se produce en zonas específicas del flanco (Figura 2.23.c).
- Desgaste de cráter: Este tipo de desgaste se caracteriza por el desarrollo progresivo de un cráter sobre la superficie de desprendimiento, orientado paralelamente al filo de corte principal y su máxima profundidad se localiza a cierta distancia del mismo (Figura 2.23.d).
- Chipping: Desgaste del filo de corte debido a que partículas del material de la herramienta se desprenden del mismo. Existen varios tipos de chipping: el uniforme que es la pérdida de pequeños fragmentos de la herramienta uniformemente a lo largo de los filos de corte; y el no uniforme que aparece de forma aleatoria en determinadas zonas del filo de corte (Figura 2.23.e).
- Descarrillado: Se trata de la pérdida de fragmentos de la herramienta en forma de escamas a lo largo de la superficie de la misma (Figura 2.23.f).
- Grietas: Son fracturas que se producen en la herramienta pero que no conllevan una pérdida inmediata de material. Suele suceder cuando las condiciones de corte implican grandes secciones de viruta. Estas grietas pueden ser perpendiculares al filo, paralelas al filo o grietas irregulares (Figura 2.23.g).
- Fallo catastrófico: Se produce un deterioro rápido que provoca un fallo completo de la zona de corte (Figura 2.23.h).

Los principales mecanismos de desgaste que se producen en materiales compuestos son abrasión y adhesión [35,36]. La abrasión es causada por partículas de fibra de carbono que impactan en la superficie de la herramienta y se produce adhesión debido a las altas temperaturas que se alcanzan en el mecanizado [47], además en este trabajo, al tratarse de un material compuesto termoplástico las temperaturas de transición vítrea de la matriz es más baja que en los termoestables.

Si bien el fresado como tecnología se lleva empleando en la industria durante muchas décadas, existen procesos o tecnologías algo más actuales que permiten unos mejores resultados en cuanto a temperatura se refiere. La herramienta de corte tiene un contacto directo y continuo con el material a mecanizar. Este contacto provoca un rozamiento entre ambas partes denominado fricción. La fricción hace que la temperatura del proceso aumente pudiendo llegar a provocar desperfectos en la calidad de la pieza final. En polímeros termoestables y termoplásticos, la temperatura de transición vítrea es un parámetro decisivo frente a la temperatura del proceso. Si durante el fresado esta temperatura es superada, las virutas generadas podrían fundirse y adherirse al material o a la herramienta de corte. Este defecto puede provocar una disminución de la calidad superficial del composite, así como, una disminución de la vida útil de la herramienta empleada [42].

La investigación realizada por S.R. Fernández-Vidal et al. [48], explica un método que permite disminuir el desgaste en el mecanizado reduciendo la temperatura. Esto puede hacerse mediante el uso de bajas velocidades de corte y altas velocidades de avance. Además, el uso de técnicas avanzadas como mínima cantidad de lubricante (MQL) y mecanizado criogénico pueden favorecer en el mecanizado [49].

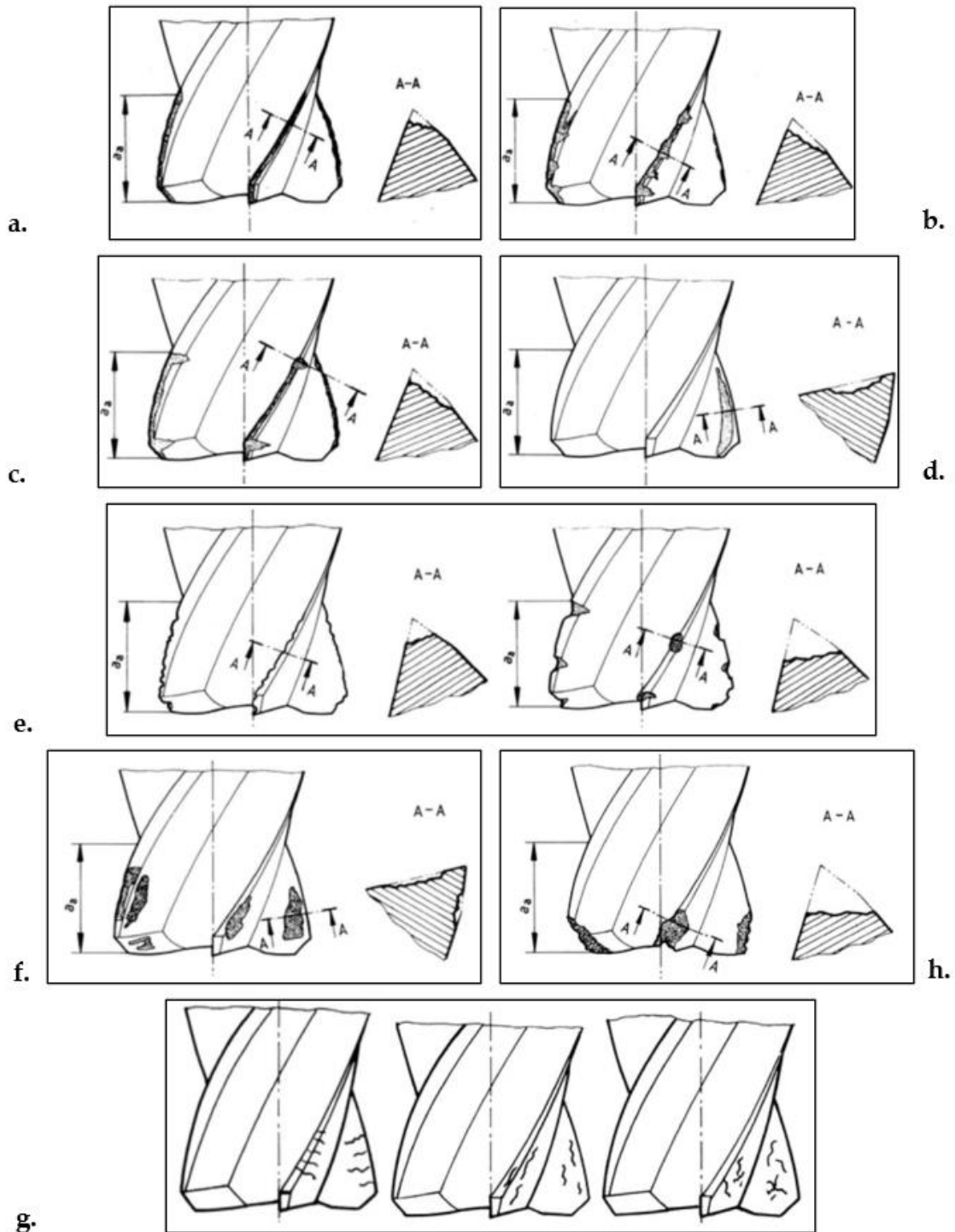


Figura 2.23. Representación gráfica de los tipos de desgaste: **a.** flanco uniforme; **b.** flanco no uniforme; **c.** flanco localizado; **d.** de cráter; **e.** *chipping*; **f.** descarillado; **g.** grietas; **h.** fallo catastrófico (Adaptada de [46])

Por otro lado, en el estudio de la geometría de una pieza, independientemente del material que se esté mecanizando, se consideran dos aspectos fundamentales, macrogeometría y microgeometría.

Los defectos macrogeométricos suelen ser de dos tipos: dimensionales y de forma. La diferencia entre las dimensiones obtenidas midiendo la pieza y las teóricas dadas por el diseño o pieza prototipo se consideran errores dimensionales, siendo estos lineales o angulares. En cambio, los defectos de forma son aquellos que muestran la diferencia entre la forma (línea o superficie) real de la pieza y la forma geométrica (ideal) representada en el diseño o prototipo.

En cuanto a los defectos microgeométricos, cae casi todo el peso de la funcionalidad en la calidad de la superficie medida en términos de rugosidad superficial. Un perfil de una pieza mecanizada está generado por surcos, huellas o marcas dejadas al realizar el proceso de mecanizado.

Otra clasificación de los defectos generados en el material sería la realizada en función a la importancia de los mismos para diferentes aspectos de la pieza mecanizada. Teniendo esto en cuenta, pueden surgir: defectos funcionales que afecten al comportamiento en servicio de la pieza en su ensamblaje final; defectos estéticos, a priori, inofensivos frente a la funcionalidad de la pieza pero que son fruto del comportamiento de la operación de fresado y que requieren un segundo postprocesado para ser eliminados; defectos geométricos intrínsecos de la operación de mecanizado, que alteran la geometría de la pieza final. Estos últimos pueden o no tener un carácter funcional en función de la localización a lo largo de la sección de corte.

La mayoría de defectos ocasionados en los materiales compuestos poliméricos, se forman independientemente de la matriz que conforme el material. No obstante, tal y como se ha mencionado anteriormente, el efecto de la temperatura puede ocasionar ligeras diferencias entre el fresado de un compuesto termoestable y otro termoplástico. Por ello, a continuación, se desglosa un análisis de los principales defectos ocasionados en los materiales compuestos poliméricos.

Defectos funcionales: calidad superficial y delaminaciones internas

En primer lugar, en cuanto a defectos funcionales en un material compuesto polimérico tras una operación de fresado, se puede diferenciar la calidad superficial en términos microgeométricos y las delaminaciones internas en términos macrogeométricos. Empezando por la calidad superficial, según la bibliografía consulta sobre postprocesado de compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras entre los parámetros de rugosidad más destacables para la evaluación de la sección de corte de un material se encuentran [50]:

Rugosidad media aritmética (Ra): También se le denomina como la línea promedio central (Centre Line Average CLA), es el parámetro de rugosidad más empleado. Se define como la desviación absoluta promedio de las irregularidades de rugosidad de la línea media sobre una longitud de muestreo. Este parámetro es fácil de definir, fácil de medir y además da una buena descripción general de las variaciones de altura. No proporciona ninguna información sobre la longitud de onda y no es sensible a pequeños cambios en el perfil. La definición matemática y la implementación digital del parámetro de altura media aritmética son, respectivamente, las siguientes:

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx \quad \text{Ec. 2.4}$$

$$Ra = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \quad \text{Ec. 2.5}$$

Rugosidad media cuadrática (Rq): Este parámetro también se conoce como RMS. Representa la desviación estándar de la distribución de las alturas de superficie, por lo que es un parámetro importante para describir la rugosidad de la superficie mediante métodos estadísticos. Este parámetro es más sensible que la altura media aritmética (Ra) a una gran desviación de la línea media. La definición matemática y la implementación digital de este parámetro son las siguientes:

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l \{y(x)\}^2 dx} \quad \text{Ec. 2.6}$$

Estos dos parámetros se muestran gráficamente en la Figura 2.24.

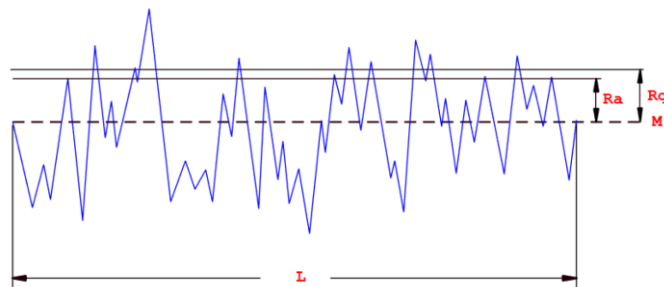


Figura 2.24. Definición gráfica de Ra y Rq (Adaptada de [50])

Máxima altura del perfil (Rz): Este parámetro es más sensible a picos y valles grandes que Ra. Según el sistema internacional ISO, este parámetro es la diferencia de altura entre el promedio de los cinco picos más altos y los cinco valles más bajos a lo largo de la longitud de evaluación del perfil.

Máxima altura de pico (Rp): Se define como la altura máxima del perfil por encima de la línea media dentro de la longitud de evaluación.

Máxima profundidad de los valles (R_v): Es la profundidad máxima del perfil por debajo de la línea media dentro de la longitud de evaluación.

Por otro lado, la longitud básica de muestreo debe ser suficiente para poder evaluar la rugosidad, esto es, debe contener todos los detalles representativos de rugosidad y excluir aquellos inherentes a la ondulación. Una longitud demasiado pequeña no será representativa de la superficie, dando error al evaluar la rugosidad. Los resultados de mediciones repetidas, realizadas en esas condiciones, darán cierta dispersión.

La longitud básica de muestreo es conocida también como Cut-off y no debe ser confundido con la longitud de medición. El Cut-off será la distancia que se utilice para diferenciar ondulación de rugosidad. La longitud total que recorrerá el palpador será igual a siete veces el Cut-off. De éstas, cinco de ellas serán de la longitud de evaluación y las dos restantes del comienzo y del final. No obstante, estas dos últimas longitudes se descartarán, tal y como se puede ver en la Figura 2.25.

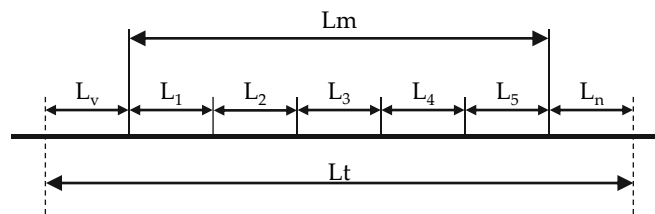


Figura 2.25. Longitudes características de rugosidad

Revisando la bibliografía acorde al fresado de materiales compuestos poliméricos, se aprecia como la calidad superficial en la sección de corte suele ser evaluada mediante los parámetros R_a y R_z . Según Karpát et al. [51] las propiedades anisotrópicas y no homogéneas de un compuesto termoestable reforzado con fibras de carbono hacen que la calidad de la superficie mecanizada fluctúe.

Por otro lado, tal como se ha comentado anteriormente, las fibras abrasivas pueden llegar a provocar la disminución del rendimiento en las herramientas de corte, provocando desgaste en ellas y, por tanto, deterioro en la superficie del material. Por lo que la correcta selección de una herramienta de corte y los parámetros de entrada adecuadas son aspectos muy importantes en el fresado de compuestos poliméricos.

Por ejemplo, la velocidad de avance del cabezal de corte juega un papel relevante en el proceso. Según Ozkan et al. [52] se recomienda el uso de velocidades de avance bajas en el fresado de compuestos termoestables reforzados con fibras. En caso contrario, la matriz puede sufrir una degradación por el exceso de temperatura generado en el canal de corte, provocando una sección no homogénea que se traduce en una calidad superficial mediocre.

Por otro lado, la cantidad de artículos de investigación relacionados con el fresado de materiales compuestos termoplásticos no es muy elevada. Sin embargo, Nakamura et al. [53] realizaron un estudio sobre el comportamiento de termoestables y termoplásticos reforzados con fibras de carbono frente a corte por cizalladura. En su estudio llegaron a la conclusión de que una correcta selección de los parámetros de corte reduce los esfuerzos necesarios para el corte en ambos materiales. En otro estudio, Ogi et al. [54] estudiaron el corte en compuestos termoplásticos reforzados con fibras de carbono, llegando a una conclusión similar, donde en esta ocasión aumentar el ángulo de corte de la herramienta redujo el esfuerzo por cizalladura al mecanizar el material.

En segundo lugar, si se siguen analizando defectos funcionales que pueden aparecer en las piezas hay que considerar las delaminaciones. Se conoce la delaminación en un material compuesto como el fenómeno que consiste en la separación entre capas o láminas de dicho material debido a la aparición de diferentes fuerzas que logran vencer las uniones de las mismas (Figura 2.26). Pueden aparecer tanto en zonas visibles (superficies externas del material) como internamente (entre las capas del compuesto). En el caso de las delaminaciones internas que no se puedan apreciar a simple vista, sería necesario su estudio con técnicas específicas como la inspección por ultrasonidos o previo al mecanizado mediante simulación por ordenador [55].

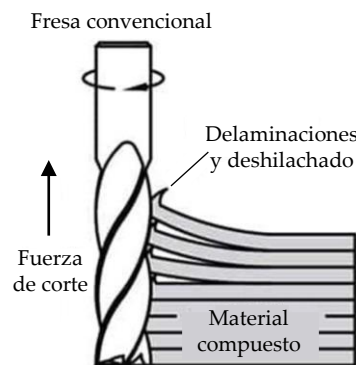


Figura 2.26. Delaminación producida durante un proceso de fresado (Adaptada de [31])

La delaminación de las capas superiores se produce durante el mecanizado donde la fresa dobla las fibras hacia afuera y las desvía del plano del laminado. Esto induce tensión entre las capas del laminado, causando que las capas se separen. Según el estudio realizado por Sheikh-Ahmad et al. [56], la delaminación producida se puede clasificar en varios tipos (Figura 2.27).

La delaminación Tipo I describe áreas donde las fibras de la superficie han sido rotas y removidas a cierta distancia del borde mecanizado. La delaminación Tipo II que consiste en fibras sin cortar que sobresalen del borde mecanizado, mientras que la delaminación Tipo I/II es una combinación de las dos anteriores, es decir, los filamentos de fibra sobresalen más allá del borde mecanizado acompañados de un daño superficial significativo en el material. La delaminación Tipo II es causada por la posibilidad de que

las fibras se alejen o se doblen de la trayectoria de la herramienta al avanzar y luego regresen a su orientación original. La delaminación Tipo III hace referencia a las fibras que están parcialmente adheridas o a las grietas que son paralelas a la superficie mecanizada.

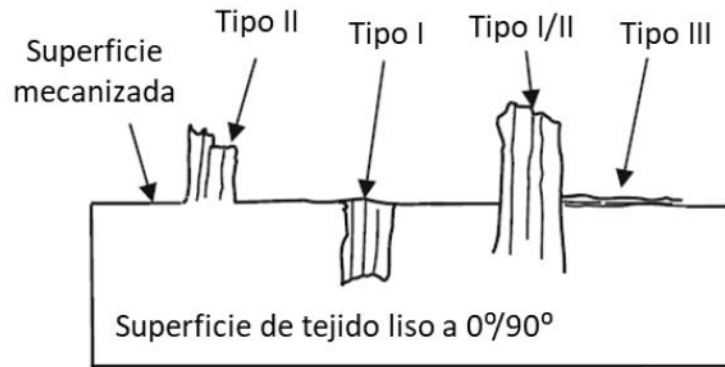


Figura 2.27. Tipos de delaminación en un compuesto reforzado con fibras (Adaptada de [46])

El tipo de delaminación que se producirá dependerá según Hintze et al. [57] de la orientación de la fibra en la capa superior. En los ranurados, la delaminación se induce en el punto de contacto inicial entre la fibra y la fresa, es decir, donde se produce el primer corte de la fibra. Hay que tener en cuenta el desgaste de la fresa, porque la fuerza de avance aumenta significativamente con el aumento del desgaste y un aumento de la fuerza de avance va acompañado de un mayor grado de delaminación [57]. Este grado de delaminación que se produce durante el mecanizado se utiliza como indicador de control de calidad.

Otros investigadores como Yang et al. [58] proponen el fresado helicoidal como método para reducir las delaminaciones en un compuesto termoestable reforzado con fibras. Aseguran que una correcta combinación de parámetros reduce las delaminaciones tanto en el fresado helicoidal de CFRPs como en apilados metal-CFRP.

Además, el mecanizado de materiales compuestos utilizando el fresado como tecnología de corte puede dar lugar a un defecto de deshilachado de las fibras. La herramienta genera unas tensiones de corte al mecanizar el material que pueden provocar que la matriz se desprenda del refuerzo. Sin embargo, a medida que la herramienta sale del canal de corte, las fibras que se encuentran en la superficie pueden sufrir deformación sin llegar a la rotura. En este caso se produce un defecto de deshilachado en el que la matriz termoplástica es visible, o bien, las fibras sueltas se mantienen sujetas al material mecanizado. Este defecto es propio de los materiales compuestos poliméricos reforzados con fibras. Aun así, se puede reducir creando una sujeción algo más severa del material a mecanizar, así como, configurando los parámetros de corte en una combinación lo suficientemente conservadora como para asegurar el corte completo de los hilos de fibra permanentes.

2.6. Postprocesado de los CF RTP mediante chorro de agua con abrasivo

Una vez analizado el postprocesado de CF RTP utilizando técnicas de mecanizado convencional mediante fresado periférico, se debe analizar otro de los procesos que presenta unas características adecuadas para el mecanizado de estos materiales como es el corte por chorro de agua con abrasivo (*Abrasive WaterJet Machining*, AWJM). Este proceso es categorizado como no convencional, no tradicional o avanzado y es uno de los más empleados debido a su gran productividad en forma de elevadas tasas de eliminación.

El mecanizado mediante chorro de agua utiliza una mezcla de fluido y partículas sólidas que se aceleran y provocan la deformación o eliminación del material objetivo sobre el que se impacta. Por lo general, el chorro está compuesto de agua y aire. El agua tiene una mayor densidad y es incompresible, en comparación con el aire. Por lo tanto, es capaz de aplicar una mayor presión de impacto [59,60]. Las partículas sólidas empleadas como abrasivo deben ser más duras que la pieza de trabajo de destino, a fin de que retire el material objetivo con el menor daño posible.

Su estructura, dureza, comportamiento mecánico, forma y distribución de grano son algunas de las características más relevantes a la hora de definir el tipo de abrasivo empleado. Las partículas que tienen formas irregulares con bordes afilados pueden penetrar y cortar materiales más resistentes como el acero, mientras que las partículas redondeadas inducen deformaciones y tensiones residuales de compresión de carácter plástico [61].

Una de las ventajas notorias respecto a otros procesos de mecanizado convencionales como el fresado, es la disminución de la temperatura durante el proceso. Los rangos de temperatura generados mediante el AWJM, son mucho más bajos que en otros procesos y, por lo tanto, minimiza la probabilidad de deterioro o degradación de la matriz polimérica del material compuesto. Diversas investigaciones, como la realizada por Kovacevic et al., muestran como el chorro de agua alcanza aproximadamente unos 50 °C más que la temperatura ambiente de trabajo [62]. Esto disminuye en gran medida la aparición de defectos propicios de la temperatura del proceso como cráteres, grietas, daños térmicos y tensiones residuales [63].

2.6.1. Funcionamiento del sistema de corte por chorro de agua con abrasivo

Como bien ha sido comentado, el mecanizado por chorro de agua se define como un proceso de eliminación de material que presenta características que lo diferencian del resto de procesos. Entre ellas cabe señalar la ausencia de ZAT (Zona Afectada Térmicamente) o la capacidad de mecanizar una amplia gama de materiales.

Con el fin de que esta tecnología sea capaz de conseguir un alto rendimiento operacional, los equipos de mecanizado constan de diferentes subsistemas que pueden variar según el tipo de fluido que se utilice, o el material o materiales con los que se desee trabajar [31]. En este apartado se desarrolla de forma breve el funcionamiento de cada uno de estos subsistemas, así como la función que ocupan dentro del corte por chorro de agua.

Sistema de generación de agua a altas presiones

En primer lugar, el agua es suministrada a una bomba de ultra alta presión que puede aumentar dicha presión hasta un rango de 600 MPa (6000 bar) aproximadamente. El desarrollo y la implementación de este tipo de bombas han causado en gran medida el avance de esta tecnología en los diferentes sectores industriales. Principalmente existen dos tipos de bombas: rotativas y lineales.

Las bombas rotativas de accionamiento directa contienen pistones conectados al cigüeñal, los cuales mediante la acción de un motor eléctrico se encargan de otorgar la presión requerida. Las bombas lineales se basan en el principio de la intensificación de presión, a partir del cual una presión baja sobre una gran área se transforma en una presión elevada sobre un área pequeña (Figura 2.28).

Este último tipo de bombas son las más comunes y las originalmente relacionadas con los procesos de chorro de agua [64]. A continuación, se dispone un atenuador capaz de amortiguar las fluctuaciones, proporcionando un flujo lo más constante y estable posible de agua a ultra alta presión.



Figura 2.28. Sistema de presión lineal especializada en corte por chorro de agua de la marca KMT ubicado en la Escuela Superior de Ingeniería de la Universidad de Cádiz

Cabeza cortante o cabezal

Tras el sistema de bombeo se encuentra un sistema de conexiones por las que circula el agua. Este sistema requiere mucha precisión ya que un mal diseño puede producir grandes pérdidas y por tanto una reducción del rendimiento. El conjunto de conexiones permite al agua llegar hasta el cabezal de corte, elemento donde se acelera al pasar por un pequeño orificio cuyo diámetro suele ser menor que 1 mm. Este orificio suele estar fabricado en rubí, zafiro o diamante ya que se requiere un elemento de elevada resistencia con la mayor vida útil posible.

Una vez en el interior del cabezal, el agua llega a la cámara de mezclado donde se introducen las partículas abrasivas. El abrasivo procede de una tolva conectada directamente a la cámara de mezclado, el cual es introducido mediante un sistema de inyección. Este sistema consta de tres fases: agua, aire y partículas de abrasivo. La Figura 2.29 representa un diagrama esquemático del cabezal de corte del equipo de chorro de agua [65,66].

En la cámara de mezcla se encuentran las partículas de abrasivo junto con el agua, formándose un chorro de agua con abrasivo de alta velocidad. Esta cámara metálica conduce el fluido hacia el tubo focalizador que puede encontrarse fabricado en diferentes materiales como carburo de boro o de tungsteno. Normalmente, este tubo ronda los 100 mm de longitud y su diámetro oscila entre 0.5 y 2 mm [65].

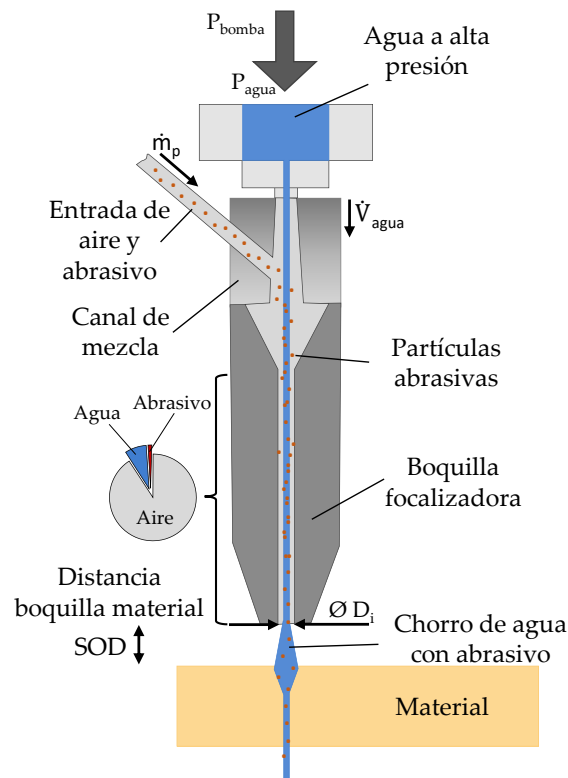


Figura 2.29. Diagrama representativo del proceso de chorro de agua con abrasivo (Adaptada de [67])

Soporte de la pieza de trabajo y unidad de control

El cabezal de corte se encuentra montado sobre un sistema de movimiento automatizado CNC normalmente con libertad en los ejes XYZ, aunque en los últimos años se han desarrollado equipos de chorro de agua con 5 ejes de movimiento, añadiendo la rotación e inclinación del cabezal [68].

Por último, se dispone el elemento más visible en cualquier taller que contenga un equipo de corte por chorro de agua, el tanque de agua (Figura 2.30). Su principal función es absorber la energía del chorro de agua que queda tras mecanizar la pieza y evitar así, la dispersión tanto del fluido como la propagación de las propias partículas abrasivas.

La pieza a mecanizar se coloca sobre dicho tanque de agua, en una estructura de soporte compuesta por finas láminas de acero. También existe la posibilidad de que la pieza se encuentre sumergida dentro del tanque, lo cual presenta un corte más complejo debido a que el chorro interactuará con cierto volumen de agua antes de entrar en contacto con la pieza a mecanizar, entre en mayor juego la cavitación del mismo. Sin embargo, esta técnica es empleada gracias a la posible reducción de ruido que puede llegar a ofrecer.

Por último, siempre que sea posible, se genera un ciclo cerrado de agua, en el cual una vez que el agua haya sido recogida por el tanque, se filtra separando partículas abrasivas, viruta o partes desechadas del material que hayan caído al tanque de agua. Con esto se consigue un ahorro bastante elevado de agua.

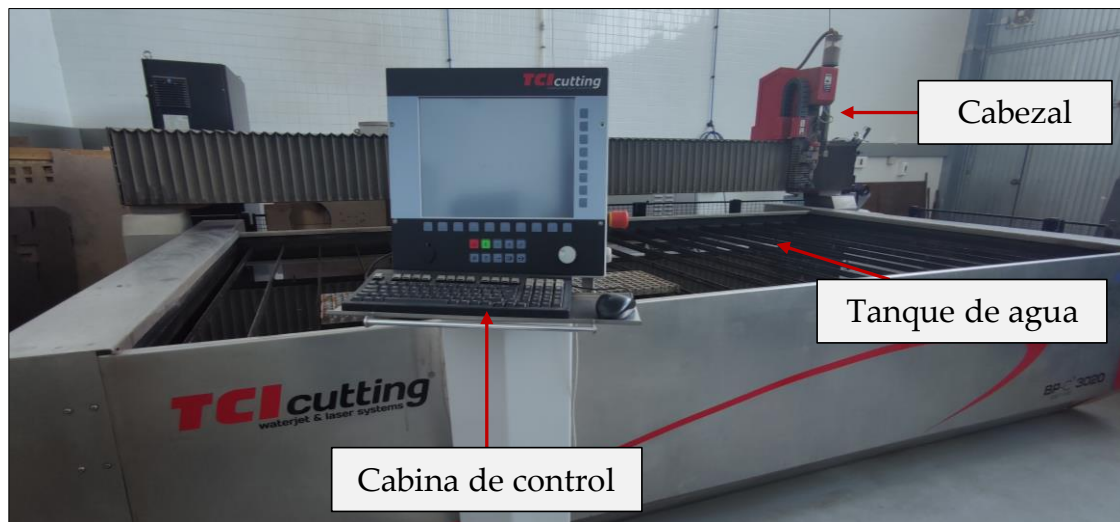


Figura 2.30. Equipo de chorro de agua con abrasivo TCI Cutting 3020 ubicado en la Escuela Superior de Ingeniería de la Universidad de Cádiz

2.6.2. Mecanismos de eliminación por chorro de agua con abrasivo

Tras haber explicado el funcionamiento de un equipo de corte por chorro de agua con abrasivo, se conoce que la eliminación de material es producida como consecuencia de impactos de partículas abrasivas y de agua. Esto provoca que el efecto final de un corte AWJM, sea la superposición geométrica de cráteres producidos por todas las partículas [69,70]. Este efecto hace complejo estimar la distribución de geometrías de partículas reales en el instante del impacto sobre la superficie, aunque en los últimos años se han desarrollado modelos predictivos capaces de estimar el comportamiento del flujo.

En general, la respuesta del material al impacto se puede clasificar como dúctil o frágil, tal y como se muestra en la Figura 2.31 [21]. La erosión dúctil es relevante para los metales y materiales similares que son capaces de deformación plástica significativa [69,71]. En cambio, la erosión frágil se aplica a materiales cerámicos, vidrios y metales duros que se agrietan y fragmentan bajo el impacto.

En los materiales dúctiles la erosión se produce por el impacto de las partículas abrasivas sobre material de trabajo, lo que produce una deformación plástica debida a la ductilidad del material.

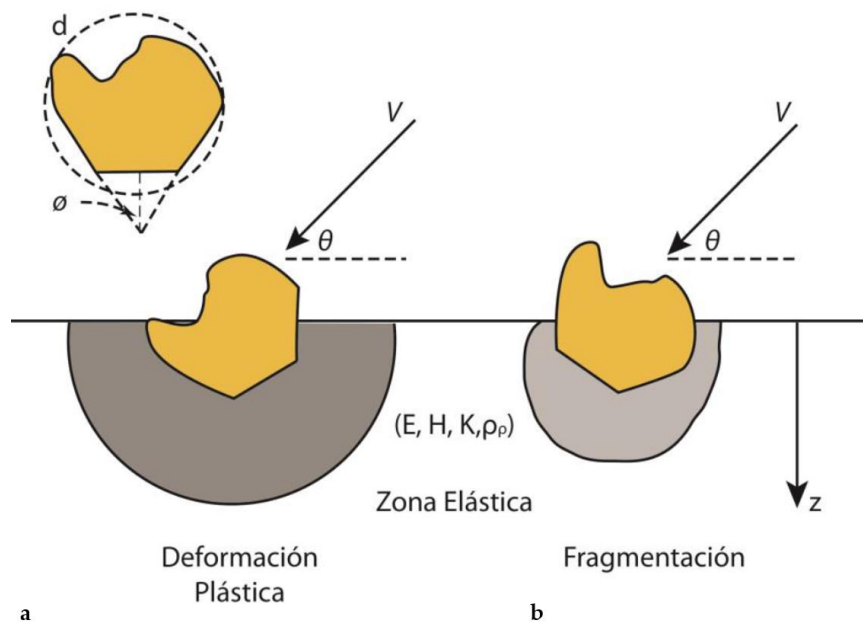


Figura 2.31. Modos de erosión: a. dúctil; b. frágil (Adaptada de [21])

Este tipo de mecanismo de erosión se conoce como erosión por micro-corte, que se asemeja al mecanismo de corte de los procesos convencionales, como por ejemplo el fresado periférico. La partícula abrasiva a gran velocidad impacta sobre el material de trabajo deformándolo plásticamente hasta producir su desgarro [72].

En los materiales frágiles la erosión se produce por la propagación de grietas y el astillado como el resultado de las tensiones de contacto durante el impacto. Este tipo de mecanismo se conoce como erosión por agrietamiento lateral. Estas tensiones provocan grietas y el crecimiento de las grietas preexistentes en la superficie del material. Por tanto, el corte en este proceso es generado principalmente, por la combinación de una deformación plástica al impactar las partículas abrasivas en la superficie que, tras una superposición de las mismas es capaz de generar una perforación en el material de trabajo [72].

2.6.3. Parámetros de corte del chorro de agua con abrasivo

Por otro lado, se debe hacer hincapié en los parámetros de corte necesarios para llevar a cabo el mecanizado por chorro de agua, los cuales hacen referencia a aquellas propiedades del material, propiedades del abrasivo, datos introducidos en la máquina o características de las partes de la máquina que puedan afectar a la calidad del corte que se realiza. En la Figura 2.32, se representa un esquema en el que se agrupan los distintos tipos de parámetros empleados en dicho proceso [73].

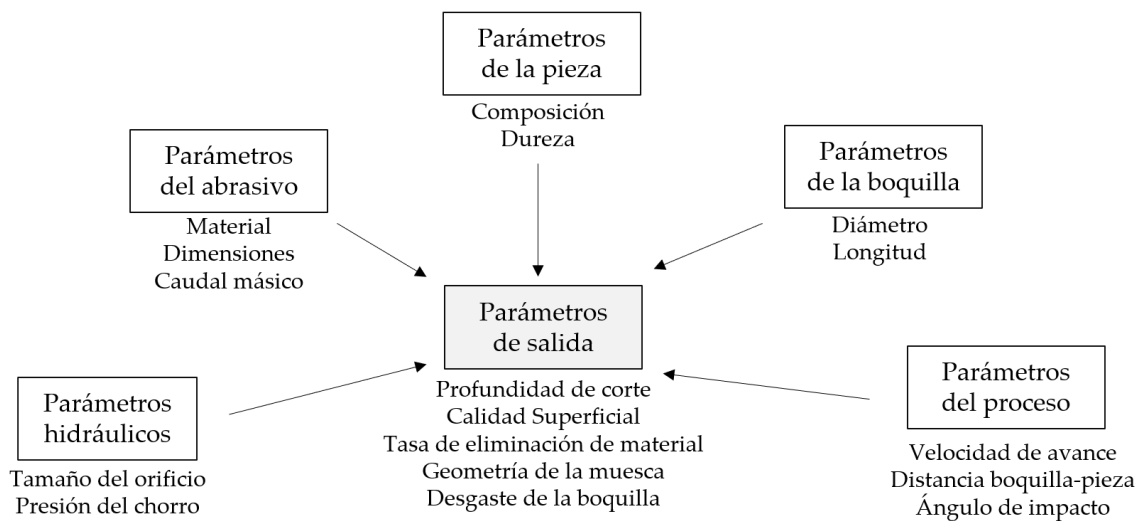


Figura 2.32. Parámetros de corte del mecanizado por chorro de agua con abrasivo (AWJM)

Parámetros hidráulicos

Incluye la presión del agua y el diámetro del orificio de salida (o caudal de agua). Existe un valor mínimo de presión por debajo del cual no ocurre mecanizado significativo de la pieza. Por otro lado, la profundidad de corte aumenta conforme se reduce el orificio de salida. La profundidad del corte varía linealmente con el diámetro de la boquilla. Esta apertura suele oscilar entre 0.075 y 0.635 mm de diámetro [66].

Parámetros del abrasivo

Estos parámetros son básicamente el tipo, el tamaño y la forma, y el caudal. El abrasivo empleado debe ser más duro que el material de trabajo. Granate, arena de sílice, carburo de silicio o aluminio entre otros, son los abrasivos más utilizados. El rango de las partículas para una profundidad de corte óptima suele rondar entre 100-150. De igual forma, un caudal másico se puede encontrar entre 120 g/min y 4800 g/min [66].

Parámetros de la pieza a cortar

Estos parámetros dependen del material con el que esté fabricado la pieza que se vaya a mecanizar. La propiedad más significativa de los mismos es la dureza. Por otro lado, en cuanto a su composición, influirá si el material es un polímero, un metal o una cerámica.

Parámetros de corte

Estos datos son los introducidos en la máquina, y corresponden con la velocidad, distancia de separación y ángulo de incidencia.

La velocidad hace referencia a la velocidad de movimiento del cabezal respecto a la pieza mecanizada. Esta velocidad es elegida en función de los requerimientos de la geometría del material. Una mayor velocidad provoca una menor erosión en el material, mientras que una velocidad menor erosiona mejor el material encontrando zonas erosionadas más profundas [74].

La distancia de separación, *Stand-off distance*, hace referencia a la distancia entre la boquilla del cabezal y la parte superior del material a mecanizar. Inicialmente la distancia de separación era mucho mayor, sin embargo, ésta ha pasado a ser lo mínima posible. Una distancia de separación mayor disminuye la energía cinética del chorro con abrasivo, provocando una menor erosión del material. Por otro lado, el chorro se dispersa a su salida, erosionando una mayor parte de la superficie del material, obteniendo por lo tanto un peor acabado superficial [74].

El ángulo de incidencia es el ángulo entre el eje del cabezal y la superficie de la pieza a mecanizar. Dependiendo de las propiedades del material, puede ocasionar diferentes resultados. Con ángulos cercanos a 90° se obtiene una mayor tasa de eliminación de material en materiales frágiles, mientras que en materiales blandos un ángulo de entre 20-30° resulta más efectivo [74].

2.6.4. Defectología asociada en chorro de agua con abrasivo de CF RTP

El mecanizado por chorro de agua con abrasivo presenta una defectología característica debido a la naturaleza inherente del proceso. El chorro, al golpear el

material, genera una reducción de su energía cinética. Esto produce una disminución de su capacidad de corte, distinguiendo tres regiones a lo largo de la ranura de corte [75,76]. Estas regiones son: Región de Daño Inicial (IDR), donde se produce un mayor efecto erosivo debido al impacto del chorro de agua y de las partículas abrasivas en la superficie del material; la región central, llamada Región de Corte Suave (SCR), presenta un corte más homogéneo debido a la estabilización del chorro de agua en la ranura de corte; y la región inferior, llamada Región de Corte Duro (RCR), donde el chorro de agua se dispersa de nuevo perdiendo una mayor energía cinética [77]. En la Figura 2.33; **Error!** **No se encuentra el origen de la referencia.** se puede ver una representación gráfica de una ranura de corte.

En cada una de estas zonas se generan defectos específicos por el mecanizado con chorro de agua abrasivo. En la región de daños iniciales, hay una mayor erosión que en el resto de la región, como se ha mencionado anteriormente. Esto produce una geometría indeseable en el mecanizado final con defectos como esquinas redondeadas o ángulos de las paredes diferentes al resto de la ranura [75].

En la región de corte suave pueden producirse defectos como delaminaciones internas y ángulo de conicidad. Una delaminación interna es considerada el inicio de la grieta que puede llegar a provocar una rotura en la zona de unión de las capas que componen el material compuesto [78].

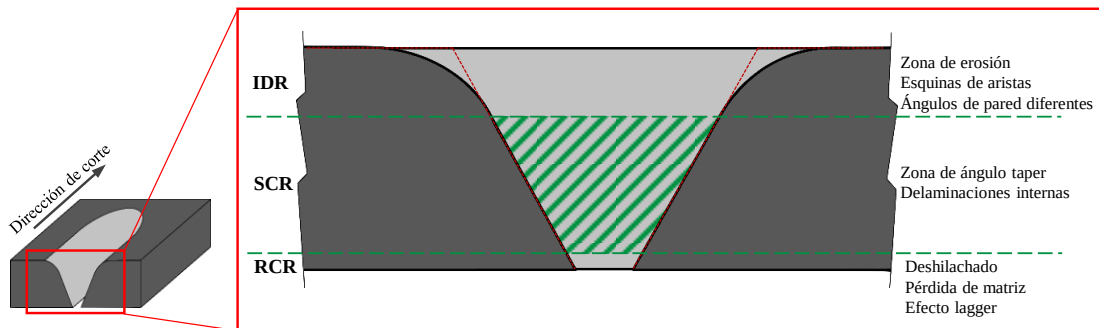


Figura 2.33. Representación gráfica de las tres zonas generadas en una ranura de corte junto a los defectos de cada zona al postprocesar un material compuesto con chorro de agua con abrasivo

Por otro lado, el ángulo de conicidad de la pared de la ranura de corte se conoce como ángulo taper. Este defecto se genera por la pérdida de energía cinética que se produce a lo largo de la ranura de corte. En los materiales poliméricos, la ranura de corte suele tener una anchura mayor en la entrada del material que en la salida del mismo, lo que hace que las paredes de la ranura no sean paralelas.

En la última zona, la RCR, puede producirse un desprendimiento de las capas del material compuesto, ya sea en forma de deshilachado de la fibra de carbono o en forma de pérdida de la matriz polimérica. Estos defectos crean cavidades en el material compuesto. Además, el defecto lag también puede ocurrir en esta área [79,80]. Esta

variable se genera por un retraso del chorro de agua cuando no tiene suficiente energía para realizar el corte.

Por último, la ranura de corte tiene diferentes calidades según el área de la ranura que se mida. Varios autores definen las tres zonas de daños en la ranura para analizar la calidad de la superficie en términos de rugosidad media aritmética (R_a) o de altura máxima media de la rugosidad del perfil (R_z) [81,82].

Defectos funcionales: calidad y delaminaciones internas

Tal y como se ha comentado en apartados anteriores, la importancia de la calidad superficial de la pieza para su comportamiento funcional es evidente. El estudio de la calidad de la superficie y su evaluación se clasifica dentro de los factores microgeométricos en la evaluación metrológica. El corte por chorro de agua genera una calidad superficial específica que es debida a la naturaleza del proceso de corte. La energía cinética proporcionada al chorro de agua y su disipación durante el corte es un aspecto fundamental para la geometría de cada ranura mecanizada. Esto mismo se debe aplicar a la calidad superficial obtenida. En los materiales compuestos poliméricos, tanto en CFRPs como en CFRTTPs se intensifica el deterioro a lo largo de la sección de corte. Esto se debe al conjunto de diferentes propiedades mecánicas del material como su dureza, fragilidad y resistencia a flexión que lo debilitan ante el impacto del chorro de agua en la superficie superior del mismo.

En los momentos iniciales, cuando el chorro de agua presenta su máxima capacidad de corte, las partículas abrasivas inician la superposición de impactos contra la superficie del material para iniciar el corte (Figura 2.34). Este efecto hace que aparezca una pequeña área más afectada por la erosión generada por estas partículas. Esta zona se identifica como IDR (Región de Daños Iniciales) [82,83].

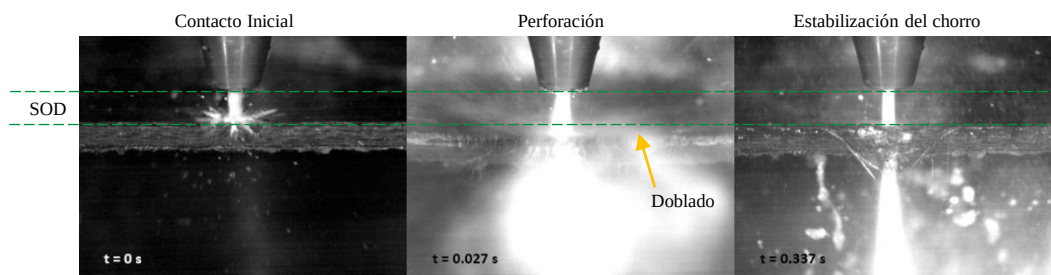


Figura 2.34. Flexión del material compuesto termoplástico al impactar el chorro de agua sobre su superficie (Adaptada de [84])

Después de esta pequeña área localizada, se produce la región correspondiente a la mejor calidad de superficie generada por el chorro de agua. Esta zona se conoce como SCR (Smooth Cutting Region) y es la superficie que tiene menos irregularidades con una formación de picos y valles suaves. La correcta selección de los parámetros de corte afecta en gran medida a la formación de esta zona y a la calidad final de la rugosidad

obtenida. Así pues, un aumento de la presión hidráulica y del tamaño del grano del abrasivo utilizado, junto con una reducción de la velocidad de avance transversal, puede ofrecer una superficie máxima que puede considerarse como lisa y sin ningún daño evidente. Esta combinación da su máxima capacidad de corte al chorro de agua, siendo esencial la correcta selección de la velocidad transversal del cabezal, ya que una velocidad muy alta genera una gran dispersión de la energía cinética en los instantes iniciales produciendo una mayor variación de la calidad superficial obtenida.

Esto nos lleva a la última región que puede surgir durante el corte por chorro de agua en cuanto a la calidad de la superficie. Esta región se denomina RCR (Rough Cutting Region) y está asociada a esa pérdida o disipación final de energía cinética del propio chorro. Esto produce que la sucesión de impactos de las partículas del chorro se realice de forma irregular y, en ocasiones, sin llegar a desprender y cizallar de forma correcta el material en sus instantes finales. Esto da lugar a una zona con una mayor diferencia entre picos y valles de grandes e irregulares distancias, generando una zona con mayor rugosidad y una peor calidad superficial (Figura 2.35).

Actualmente se están llevando a cabo muchas investigaciones centradas en la influencia de los parámetros de corte en diferentes tipos de materiales compuestos (apilamiento, tipo de matriz, espesores, etc.) en las que se pretende determinar la combinación de parámetros de corte que genere la mejor calidad superficial y, por otro lado, generar una base de datos experimental que pueda ser utilizada posteriormente para establecer modelos matemáticos predictivos.

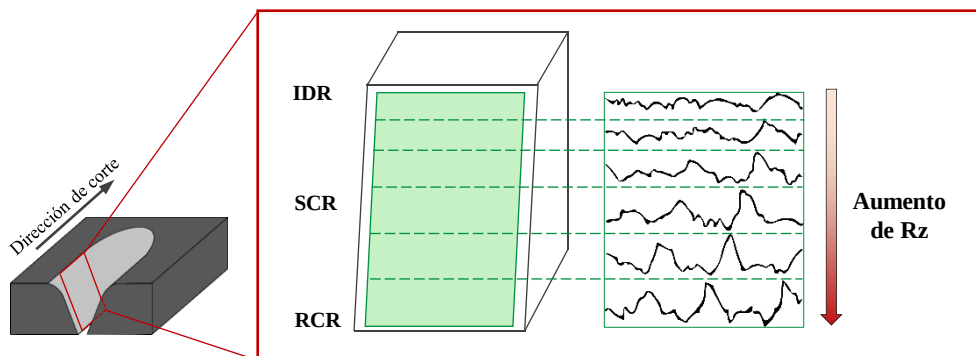


Figura 2.35. Variación del parámetro R_z en las diferentes regiones de la ranura de corte generada en un material compuesto al postprocesar con chorro de agua con abrasivo

En una investigación realizada por Wong et al. [77] se ha estudiado la influencia de los parámetros de corte en la calidad de la superficie mediante la Metodología de la Superficie de Respuesta (RSM), obteniendo un modelo matemático que permite predecir los rangos óptimos de los parámetros de corte. El material de estudio fue un compuesto híbrido de refuerzos de fibra de carbono y fibra de vidrio y una matriz epoxídica con un espesor final de 3,5 mm.

Wong hace hincapié en la formación de las tres regiones de diferente calidad superficial al evaluarla en tres puntos equidistantes del espesor mecanizado. Sin embargo, al mecanizar un espesor tan bajo, apoyan la idea de que sólo hay dos regiones que corresponden a la erosionada al principio (IDR) y a la zona suave (SCR). Al mismo tiempo, establece que el caudal de abrasivo es el principal factor que afecta a la calidad de la superficie, seguido de la distancia de separación y la presión hidráulica. Resultados similares han sido obtenidos por Kumaran et al. [81], los cuales llegan a la conclusión de que altas presiones hidráulicas con bajas tasas de velocidad de avance mejoran la calidad de la superficie.

Otros estudios, como los de Ahmed et al. [85] y Jagadish et al. [86] también están de acuerdo con Kumaran, obteniendo la misma influencia de los parámetros de corte a través de modelos predictivos basados en una metodología de respuesta de la superficie (RSM).

Por otro lado, El-Hofy et al. [87] han estudiado la influencia de los parámetros de corte en dos configuraciones diferentes de CFRP en el rango de 1000 - 3500 bar, 50 - 150 mm/min y 2 - 4 mm para la distancia de separación. Ambas placas están compuestas por una resina epoxi curada en autoclave con fibras T800 y un espesor final de 10,4 mm. El estudio concluye que la presión hidráulica es el factor más importante en la calidad de la superficie. Esto no es coherente con los resultados obtenidos por Wong et al. [77]. Los investigadores del artículo de El-Hofy indicaron que, al aumentar la presión hidráulica, aumenta la energía cinética del chorro de agua, reduciendo el retraso generado por la velocidad de avance y mejorando así la calidad de la superficie final.

Sin embargo, en lo que respecta al espesor del corte, Jagadeesh et al. [88] demostraron que el aumento del espesor en el mecanizado de CFRP tiene fuertes efectos de desgaste en la calidad de la superficie, mientras que el aumento de la velocidad de avance deteriora significativamente la calidad de la superficie.

Aunque se ha comentado que los materiales compuestos de matriz termoplástica están generando un gran interés en los últimos años en los sectores industriales debido a sus ventajas sobre los termoestables, hay muy poca literatura centrada en el estudio de la calidad obtenida en estos materiales después del mecanizado.

Kakinuma et al. [89] son los primeros autores que han hecho una pequeña aproximación a la calidad superficial obtenida en un CF RTP después del mecanizado por chorro de agua con abrasivo. Kakinuma establece una comparación entre diferentes tecnologías de corte (taladrado de alta velocidad, taladrado por chorro de agua con abrasivo y taladrado asistido por vibraciones) en un CF RTP de 3 mm de espesor y una matriz termoplástica de nylon PA66.

Una de las conclusiones más relevantes de dicho estudio es que mientras que el taladrado de alta velocidad es la tecnología que siempre ha ofrecido los mejores resultados en términos de calidad/tiempo de operación, el corte por chorro de agua ofrece resultados muy competitivos. Así, los valores de R_a obtenidos por Kakinuma muestran resultados muy cercanos a los obtenidos por otras tecnologías que requieren tiempos de mecanizado más largos para este tipo de material como, por ejemplo, el fresado. Además, se debe tener en cuenta el material mecanizado, ya que, es considerado de bajo espesor debido a sus 3 mm de pared.

Sin embargo, Kakinuma también identificó un defecto asociado a la calidad de la superficie generada tras realizar este proceso en los materiales compuestos termoplásticos. La sucesión de microimpactos de las partículas abrasivas en la matriz termoplástica hacen que se desprenda parcialmente el material y se adhiera a la superficie mecanizada, generando así una peor calidad superficial (Figura 2.36). Sin embargo, como no hay variación en la combinación de los parámetros de corte establecidos (3000 bar, 150 g/min y 100 mm/min), no se puede establecer su influencia en la calidad de la superficie obtenida.

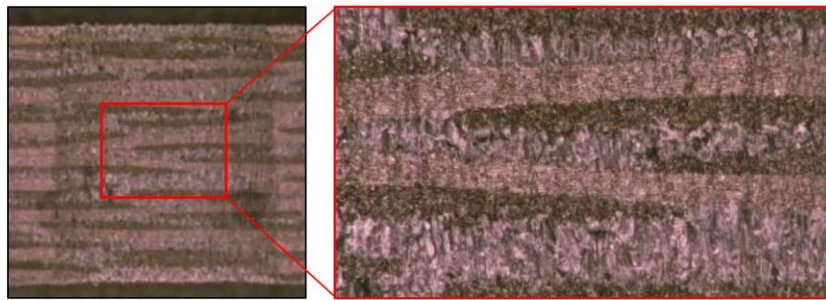


Figura 2.36. Sección del compuesto mecanizado donde se aprecia pérdida de matriz (Adaptada de [34])

Además de la geometría de corte generada y la calidad de la superficie obtenida a lo largo de todo el espesor, un defecto crítico que puede ocurrir y que es de gran interés en la industria actual es la formación de delaminaciones. Este defecto es inherente al mecanizado de materiales compuestos y puede dar lugar a la retirada de un producto final tras el mecanizado (Figura 2.37).

Tal y como se ha comentado anteriormente, las delaminaciones internas son consideradas los inicios de grieta producidos entre las capas del material compuesto [47]. Cuando el chorro de agua golpea el material, el grosor del material sin mecanizar se reduce constantemente. Esto produce una disminución de su resistencia a la deformación que puede dar lugar a la adhesión entre capas que no soportan las tensiones generadas produciendo el defecto de delaminación [78].

Además, se debe tener en cuenta que cuando se genera la separación inicial de las capas y el material no está completamente mecanizado, el flujo de agua puede llegar a penetrar a través de las pequeñas cavidades generadas.

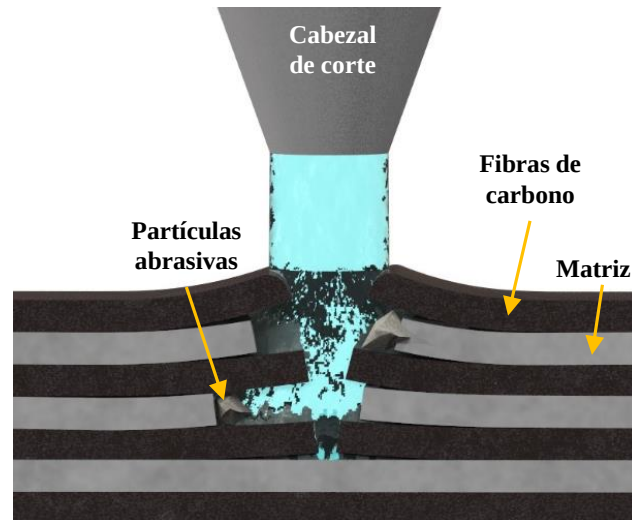


Figura 2.37. Diagrama que representa la generación de delaminaciones internas en un material compuesto

Esto produce, por un lado, un aumento de la longitud máxima de las delaminaciones producidas y, por otro, la posibilidad de penetración e incrustación de partículas abrasivas en las cavidades generadas [90], aumentando el tamaño de la delaminación producida (Figura 2.38).

Dentro de los parámetros de corte que influyen en el mecanizado AWJM, el flujo de abrasivo es el más decisivo en la formación de delaminaciones internas, y el tamaño de grano del propio abrasivo también influye [47,91].



Figura 2.38. Partículas de abrasivo incrustadas entre las capas del material compuesto de matriz polimérica

Cuando las partículas de abrasivo impactan en la superficie, la comprimen generando el inicio de las grietas que, al seguir siendo golpeadas, originan la formación de delaminaciones. Por otro lado, la combinación de una alta presión y flujo de abrasivo junto con una mínima velocidad de corte puede minimizar el defecto de delaminación [78].

Defectos geométricos: ángulo de conicidad o taper

Otro de los defectos más importantes que puede ocurrir en las piezas mecanizadas mediante chorro de agua con abrasivo está relacionado con la geometría del corte. La conicidad de las paredes de la ranura mecanizada, llamada *kerf taper*, es un defecto a tener en cuenta. El defecto de conicidad o ángulo de taper, es de gran importancia porque se produce en cualquier material y puede dar lugar a geometrías finales no deseadas, especialmente en espesores reducidos.

El chorro, al impactar en el material, genera una reducción de su energía cinética. Esto produce una disminución de su capacidad de corte, dando lugar a una geometría cónica conocida como *taper* [83,91]. Este efecto suele estar asociado a dos factores geométricos (Figura 2.39): ancho superior (W_t), ancho inferior (W_b); dando lugar a los ángulos α ($^\circ$) y β ($^\circ$). La suma de estos ángulos da como resultado el ángulo de conicidad o ángulo de taper (KT , Φ [$^\circ$]).

No obstante, la metodología de evaluación del ángulo de taper utilizada en la mayoría de los artículos puede generar fallos en su medición. Se debe distinguir entre la zona erosionada por el impacto de las partículas abrasivas en la superficie del material, y la zona inclinada que conforma el ángulo de taper. La superposición de estos defectos puede dar lugar a equivocaciones en la medición del ángulo de conicidad. De esta manera, la evaluación del ancho superior (W_t) puede aumentar debido a esta acción erosiva, dando lugar a una dispersión en el ángulo evaluado, como se observa en los resultados que se muestran en [80,82,92]. Sin embargo, otros investigadores [75,93,94] han tenido en cuenta que en la sección de corte pueden aparecer tres regiones con diferente defectología (Figura 2.39): región de daño inicial (IDR), región de corte suave (SCR) y región de corte áspero (RCR), explicadas en secciones anteriores.

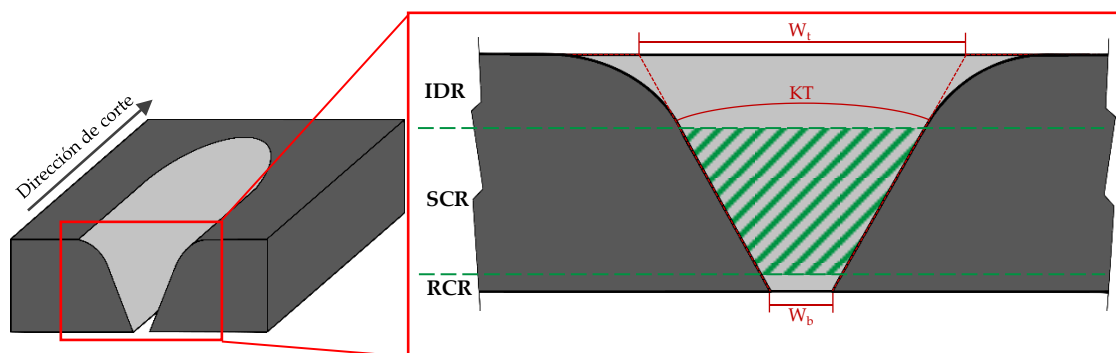


Figura 2.39. Detalle de la sección de corte de un material compuesto al ser postprocesado con chorro de agua con abrasivo donde se aprecia: la zona de corte inicial (IDR), la zona de corte suave (SMC), la zona de corte en bruto (RCR)

El mecanizado de materiales compuestos en AWJM crea una serie de defectos independientemente de la matriz de la que esté fabricado el material. El chorro está condicionado por el cambio de materiales (matriz, refuerzo) que componen el

compuesto. La matriz con la que se crea el composite influirá en mayor o menor medida en la generación de defectos tras del mecanizado. Autores como Masek et al. [41] y Rao et al. [95] tienen conclusiones similares tras mecanizar compuestos con distinta matriz.

Dhanawade et al. [78] realizaron un estudio sobre el corte por chorro de agua con abrasivo en un material compuesto de matriz polimérica termoestable. El CFRP utilizado tenía un grosor de 26 mm. Dhanawade estableció que el parámetro más influyente en el ángulo de conicidad es la presión hidráulica. Un aumento de la energía cinética del chorro de agua se produce al aumentar este parámetro. Esto aumenta su capacidad de corte y reduce la conicidad del corte. De esta manera, el ángulo de la pared del corte está directamente influenciado por la cantidad de las partículas abrasivas que impactan sobre la misma y la energía cinética del chorro de agua.

Además, un aumento de la velocidad de avance del equipo disminuye el solapamiento de los impactos de las partículas abrasivas, reduciendo su capacidad de corte y aumentando así el ángulo de conicidad. La energía cinética también se reduce al aumentar la distancia entre el chorro y la pieza, llamada distancia de separación (SOD), porque genera una mayor dispersión del chorro a la salida de la boquilla.

La cantidad de partículas abrasivas también tiene una gran influencia en el ángulo de taper generado durante el corte. Un pequeño aumento de este parámetro disminuye la conicidad obtenida debido a la mayor capacidad de corte del chorro de agua. Sin embargo, un aumento excesivo de la cantidad de partículas abrasivas produce una colisión entre ellas, redondeando sus bordes y reduciendo su capacidad de corte, lo que genera un mayor ángulo de conicidad.

La distancia entre la boquilla del cabezal y la superficie del material es un parámetro muy importante a tener en cuenta para el ángulo de conicidad. Esto se debe principalmente a la pérdida de energía cinética en forma de dispersión del chorro al salir de la boquilla. La mayoría de los estudios indican que la distancia recomendada suele estar entre 2 y 3 mm [47,83,96].

Popan et al. [97] estudiaron la influencia de la variación de la distancia boquilla-pieza para un espesor de 6 mm. En este estudio, una reducción de este parámetro de hasta 0,5 mm reduce la anchura de corte superior (Wt), disminuyendo la conicidad. Además, se destaca que una reducción de la distancia de separación produce una disminución del radio de la zona afectada por la erosión (IDR) debido a los impactos iniciales de las partículas abrasivas.

Al igual que en el caso de la calidad de la superficie, hay escasez de trabajos de investigación y, por lo tanto, de literatura sobre el mecanizado por chorro de agua abrasivo de compuestos termoplásticos (CF RTP). Sólo el autor Sambruno et al. [75] realizan un AWJM de un compuesto termoplástico de pequeño espesor, 2 mm. En ese

experimento, se utiliza el poliuretano como matriz termoplástica. Sambruno et al. [75] estudiaron la influencia de la presión hidráulica, la tasa de alimentación transversal y la tasa de flujo másico abrasivo en la generación del defecto del cono de corte.

Defectos estéticos: deshilachado externo y lag

Además de los defectos funcionales como la calidad de la superficie y los defectos geométricos como el ángulo de taper, el mecanizado por chorro de agua abrasivo de los materiales compuestos puede dar lugar a defectos visuales o cosméticos. Estos defectos, aunque no afecten a las propiedades mecánicas del material, pueden provocar el rechazo de las piezas finales debido a la necesidad de operaciones secundarias para eliminarlos.

La más importante se debe a una reducción significativa de la energía cinética del chorro de agua en combinación con una alta velocidad de avance. Cuando el material mecanizado tiene un gran espesor y se cumplen las dos condiciones anteriores, el chorro de agua no es capaz de mecanizar todo el material de manera homogénea. Esto provoca un retraso entre la posición de la cabeza y el chorro de agua en la salida del material. Este retraso produce un defecto visual en forma de retardo y está directamente relacionado con el área RCR (Roughness Cutting Region) [47,83].

Además, este defecto es inherente al proceso y puede aparecer en cualquier tipo de material. De esta manera, es un defecto que puede ser eliminado o reducido si la combinación de parámetros de corte es adecuada. Para reducir el defecto lag, es necesario minimizar la pérdida de energía cinética del chorro de agua y seleccionar una velocidad transversal que permita el desplazamiento del chorro de manera homogénea en todo el espesor del material [79,80]. Por lo tanto, una combinación de alta presión hidráulica y baja velocidad de avance puede reducir este defecto y, al mismo tiempo, producir una mejor calidad en la zona RCR (Figura 2.40).

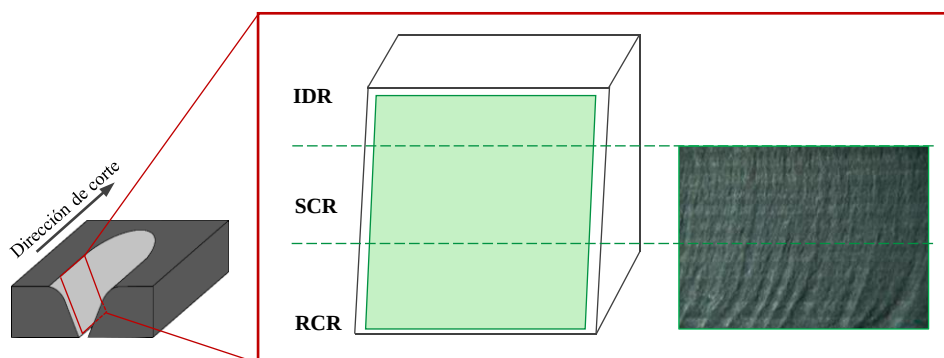


Figura 2.40. Detalle de la sección de corte realizado con chorro de agua con abrasivo donde se aprecia el defecto lag generado en la zona en bruto (RCR)

Otro parámetro clave en la reducción del desfase es la distancia boquilla-pieza. Un valor muy alto de este parámetro produce una mayor dispersión del chorro antes de golpear el material y una reducción significativa de su energía cinética.

Por otro lado, el mecanizado de materiales compuestos termoplásticos (CF RTP) utilizando esta tecnología puede dar lugar a otro defecto estético. Debido a las tensiones de corte generadas por el agua y las partículas abrasivas al mecanizar el material, la matriz termoplástica puede desprenderse del refuerzo.

Sin embargo, en los momentos finales del corte, debido a la pérdida de capacidad de corte, esta matriz puede adherirse a la superficie, alterando la calidad de la superficie obtenida [89] o puede no ser eliminada completamente (Figura 2.41). En este caso, se produce un defecto de deshilachado en el que parte de la matriz termoplástica es visible.

Por lo tanto, así como el defecto de retraso puede reducirse aumentando la capacidad de corte del chorro de agua. Así, se pueden obtener deshilachados más pequeños combinando altas presiones hidráulicas con un aumento de la cantidad de partículas abrasivas. Esta combinación puede producir un aumento de la capacidad de corte del chorro de agua, eliminando completamente la matriz termoplástica en los momentos finales del corte.

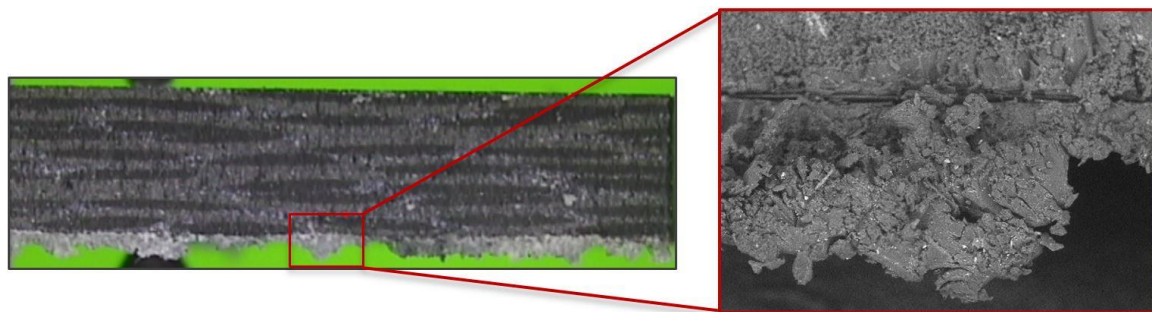


Figura 2.41. Detalle de la sección de corte de un CF RTP postprocesado con chorro de agua con abrasivo donde se aprecia el deshilachado de la matriz termoplástica

2.7. Conclusiones

En este Capítulo se ha realizado una aproximación al estado del arte de los materiales compuestos de matriz polimérica que ha dado lugar a una serie de conclusiones de gran valor para el desarrollo de este trabajo. Para ello, se han expuesto aquellas cuestiones más básicas sobre el conformado de los materiales compuestos y su posterior postprocesado, las cuales han servido como punto de partida a la hora de indagar hacia asuntos más específicos.

En primer lugar, gracias a diversas revisiones bibliográficas, se ha denotado la tendencia ascendente del empleo de materiales compuestos de matriz polimérica, los cuales han adquirido una gran posición en diversos sectores industriales tales como el aeroespacial o automoción. Dentro de esta familia de materiales se encuentran las matrices termoestables y termoplásticas donde, la primera de ellas destaca por su uso extendido en la industria. No obstante, hoy día se están desarrollando matrices

termoplásticas cuyo desarrollo presenta una serie de ventajas respecto a los compuestos termoestables, entre ellas su facilidad de procesamiento y de reciclaje. Esto concuerda con la literatura revisada, donde el auge de los artículos científicos relacionados con compuestos de matriz termoplástica es notable.

Entre las matrices termoplásticas más extendidas se encuentra el poliuretano termoplástico (TPU), el cual debido sus altas prestaciones mecánicas presenta un gran rendimiento en servicio. Además, este polímero presenta una excelente relación precio/propiedades, así como una gran facilidad de reciclado. Esto ha ocasionado que la demanda mundial de TPUs se encuentre en torno al 10%, siendo capaz de ser implantando en multitud de sectores industriales.

Por otro lado, se ha visto como entre los refuerzos estudiados de cara al conformado de un material compuesto destacan los de tipo fibra, en especial las fibras sintéticas tales como carbono, vidrio y aramida. La literatura revisada en el ámbito de la ingeniería, expone un gran aumento de publicaciones referidas a las fibras de carbono y las de vidrio donde, generalmente, las fibras de carbono destacan debido a su implementación en compuestos avanzados, es decir, que exigen una mayor funcionalidad en servicio. La combinación de baja densidad, alto módulo elástico y alta resistencia son características fundamentales para entender por qué las fibras de carbono se encuentran tan extendidas en el ámbito de la ingeniería.

Todo este análisis, lleva a los materiales compuestos de matriz termoplástica reforzados con fibras de carbono (CF RTP) a plantar cara a los compuestos más empleados en la industria, donde el número de publicaciones referidas a los CF RTPs aumenta anualmente. Si bien, es cierto que el procesado de este tipo de materiales puede presentar problemas a la hora de compatibilizar las fibras con la resina, debido a las mayores temperaturas requeridas para un correcto conformado. No obstante, cabe señalar que para el procesado de CF RTPs aparece la posibilidad de eliminar operaciones previas al conformado tales como el preimpregnado de fibras y el empleo de un utillaje específico. Este hecho, junto a la bajada de costes esperada para las resinas termoplásticas hacen que este compuesto pueda llegar a ser competitivo.

Para lograr este objetivo, es importante conocer la influencia de la colocación de las fibras junto al porcentaje de refuerzo del material compuesto. Para ello, existe una relación directa entre ambas propiedades que permite comprender si el conformado se ha realizado de forma correcta. Esta es la fracción de volumen de fibra y resina que componen a un material compuesto donde, para poder obtenerlas, se han revisado diferentes metodologías capaces de lograr determinar dicho porcentaje de refuerzo y fibra en un compuesto.

En relación con lo expuesto anteriormente, cabe señalar que casi todos los materiales compuestos requieren de algún tipo de postprocesado tras su fase de conformado, entendiendo como postprocesado aquellas operaciones secundarias capaces de obtener la geometría final, acabados y tolerancias requeridas. Se ha analizado el efecto de diversos postprocesados en materiales compuestos. De esta forma, destacan por su empleo en artículos científicos el corte por cizallamiento, láser, fresado y chorro de agua con abrasivo. Tecnologías como el corte por cizallamiento son fácilmente industrializables pudiendo llegar a obtener preformas de material compuesto sin un excesivo estudio técnico previo. Sin embargo, a la hora de postprocesar un compuesto polimérico reforzado con fibras, con el objetivo de que cumpla su función como pieza final primaria y, por ende, con la mínima aparición de defectos en la pieza, esta tecnología presenta muchos problemas. Esto ocurre también con otra de las tecnologías, el corte láser, la cual por el exceso de energía térmica como medio de eliminación, hace difícil la industrialización de este proceso para el corte de compuestos poliméricos. Varias investigaciones reflejan la aparición de defectos ocasionados por el aumento de la temperatura, donde la matriz polimérica se ve dañada debido a su baja temperatura de transición vítrea dando lugar a fibras sueltas o desprendidas.

Por otro lado, el postprocesado de materiales compuestos mediante fresado, ha sido estudiado en multitud de investigaciones. En esta ocasión la fricción generada entre la herramienta y el material puede llegar a generar un exceso de temperatura que produzca defectos en la pieza final obtenida. No obstante, los investigadores concuerdan que estableciendo una combinación de parámetros adecuada se pueden llegar a obtener resultados favorables sin la excesiva generación de defectos en la pieza final.

Por último, se ha estudiado el corte por chorro de agua con abrasivo, la cual es una tecnología que se encuentra en desarrollo y está empezando a demostrar sus capacidades frente a procesos de corte convencionales. En esta ocasión, la eliminación de material se va favorecida por las bajas temperaturas adquiridas durante el postprocesado. Este efecto hace que el chorro de agua adquiera una gran ventaja frente al resto de postprocesados estudiados, ya que, teóricamente, la matriz polimérica se debe ver menos afectada.

Este análisis ha ocasionado que el desarrollo de este capítulo gire en torno al fresado y corte por chorro de agua con abrasivo de materiales compuestos poliméricos reforzados con fibras. Ambas tecnologías han sido analizadas con mayor detenimiento con el fin de desglosar, en la medida de lo posible, información relevante de cara a la investigación realizada en este trabajo.

De esta forma, comenzando por el corte por fresado, se ha desglosado la información en función a la herramienta empleada y al material mecanizado. Se debe tener en cuenta el material y recubrimiento de la herramienta de corte, donde existen

infinita cantidad de materiales válidos para multitud de aplicaciones. No obstante, para el corte de compuesto poliméricos reforzados con fibras, las herramientas más empleadas se componen de acero rápido, carburo de Tungsteno y diamante policristalino. Además, la geometría de la herramienta influye directamente en la aparición de defectos ocasionados en el compuesto final, como la delaminación de las fibras, uno de los principales defectos en el corte de este tipo de materiales. Una geometría de herramienta no adecuada puede llegar a generar redondeo y erosión de los filos de la herramienta. Esto denota la importancia de una buena selección de la herramienta de corte, así como la combinación de parámetros escogida para realizar el postprocesado.

Entre los principales parámetros que definen una operación de fresado y que son más influyentes de cara al postprocesado de compuestos poliméricos reforzados con fibras, se encuentran la velocidad de corte, el avance por diente y la profundidad de pasada axial y radial. El análisis de estos parámetros de corte en diversas publicaciones científicas ha dado lugar a varias combinaciones de parámetros de interesante aplicación de cara al postprocesado de CF RTPs que reduzcan los defectos ocasionados en la pieza final.

El análisis de esta serie de defectos ocasionados en el material mecanizado ha sido estudiado. De esta forma, se pueden distinguir defectos dimensionales y de forma, también considerados macrogeométricos y defectos relacionados con la funcionalidad de la pieza, considerados microgeométricos, cayendo casi todo el peso en términos de calidad superficial. La mayoría de defectos ocasionados en los compuestos poliméricos se forman independientemente de la matriz que conforme el material. No obstante, tal como ha sido comentado, el efecto de la temperatura puede ocasionar ligeras diferencias entre el fresado de termoestables y termoplásticos.

Por otro lado, se ha incidido en la tecnología de corte por chorro de agua para el postprocesado de compuestos poliméricos reforzado con fibras, donde destaca la disminución, incluso ausencia de zona afectada térmicamente (ZAT). Entre los parámetros más influyentes en el corte se encuentran la presión hidráulica, la velocidad de avance del cabezal, el caudal de abrasivo y la distancia de separación pieza-boquilla. Al igual que en el postprocesado por fresado, una mala combinación de estos parámetros puede producir defectos en la pieza final, así como, una baja calidad en la superficie mecanizada.

Para entender el desglose de estos defectos en la sección de corte, se ha visto como es necesario distinguir dicha sección en 3 zonas diferentes: zona inicial de daño (IDR), zona de corte suave (SCR) y zona de corte rugoso (RCR). En cada una de las zonas se producen defectos específicos por el corte con chorro de agua, destacando la aparición de un ángulo de conicidad debido a la pérdida de energía cinética, así como defectos

característicos de un material compuesto: delaminaciones, pérdida de matriz o deshilachado de fibras. Independientemente del postprocesado estudiado (fresado y corte por chorro de agua con abrasivo) se ha desarrollado una extensa revisión bibliográfica sobre la influencia de los parámetros de corte en los defectos generados.

Como conclusión final a este capítulo, se puede ver como se ha realizado una extensa revisión de los materiales compuestos poliméricos reforzados con fibras, enfatizando en los poliuretanos termoplásticos y las fibras de carbono. De igual forma, se han analizado diversas tecnologías de corte para el postprocesado de dichos materiales, llegando a resaltar el empleo de fresado y corte por chorro de agua para el mecanizado de compuestos poliméricos. No obstante, tal y como se ha visto, la aparición de defectos en el material compuesto es innata, lo cual crea la necesidad de definir una correcta metodología experimental de cara a obtener los mejores resultados posibles.

2.8. Referencias

- [1] M.F. Ashby, D.R.H. Jones, *An Introduction to Microstructures, Processing and Design*, in: *Eng. Mater.* 2, 4th ed., 2006.
- [2] A. Miravete, *Materiales compuestos tomo I*, Editorial Reverte, 2012.
- [3] D.D.L. Chung, *Carbon Composites - Composites with carbon fibers, nanofibers and nanotubes*, 2a Ed., Elsevier Inc., Oxford, 2017. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804459-9/00001-4>.
- [4] S. Rana, R. Figueiro, *Advanced composite materials and aerospace engineering*, Elsevier Ltd., 2016. <https://doi.org/10.1016/C2014-0-00846-5>.
- [5] W. Elmar, V. Mathes, M. Sauer, M. Kühnel, *Composites market report 2018 - Market developments, trends, outlook and challenges*, (2018) 1–44.
- [6] T. Ishikawa, K. Amaoka, Y. Masubuchi, T. Yamamoto, A. Yamanaka, M. Arai, J. Takahashi, *Overview of automotive structural composites technology developments in Japan*, *Compos. Sci. Technol.* 155 (2018) 221–246. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2017.09.015>.
- [7] C. Soutis, *Fibre reinforced composites in aircraft construction*, *Prog. Aerosp. Sci.* 41 (2005) 143–151. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2005.02.004>.
- [8] R. Zitoune, H. Bougherara, *Machining and drilling processes in composites manufacture: Damage and material integrity*, Elsevier Ltd., 2015. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-307-2.00009-9>.
- [9] M. Biron, *Thermoplastics and thermoplastic composites*, 3a Ed., Elsevier Ltd., Oxford, 2018. <https://doi.org/10.1016/B978-1-85617-478-7.X5001-6>.
- [10] O. Olabisi, K. Adewale, *Handbook of thermoplastics*, 2a Ed., Taylor & Francis Group LLC., New York, 2016. <https://doi.org/10.1201/b19190>.

- [11] S. Prashanth, K. Subbaya, K. Nithin, S. Sachhidananda, Fiber reinforced composites - a review, *J. Mater. Sci. Eng.* 06 (2017) 594–595. <https://doi.org/10.4172/2169-0022.1000341>.
- [12] P.K. Mallick, *Fibre-reinforced composites materials, manufacturing and design*, 3a Ed., Taylor & Francis Group LLC., New York, 2008. [https://doi.org/10.1016/0010-4361\(89\)90651-4](https://doi.org/10.1016/0010-4361(89)90651-4).
- [13] Arburg, Freeformer - Libertad en la fabricación aditiva, (2017) 24. https://www.arburg.com/fileadmin/redaktion/mediathek/prospekte/arburg_freeformer_681184_es.pdf (accessed January 18, 2022).
- [14] CEDEX, Reciclaje químico - Catálogo de residuos utilizables en construcción, (2021). <http://www.cedexmateriales.es/> (accessed January 18, 2022).
- [15] Kawasumi, Cabkoma - Lightweight, strong and corrosion-free, (n.d.). <https://www.komatsumatere.co.jp/cabkoma/en/> (accessed January 18, 2022).
- [16] SBP - Schlaich Bergermann Partner, Roof Olympic Stadium Montréal, (n.d.). <https://www.sbp.de/en/project/roof-olympic-stadium-montreal/> (accessed January 18, 2022).
- [17] P. Arquitectura, Proyecto “Módulo 10x10” reutiliza la fibra de vidrio para levantar prototipo de vivienda sostenible, (2014). <https://www.plataformaarquitectura.cl/> (accessed January 18, 2022).
- [18] F.C. Campbell, *Manufacturing processes for advanced composites*, Elsevier B.V., 2003. <https://doi.org/doi.org/10.1016/B978-1-85617-415-2.X5000-X>.
- [19] D.T. Baldeon, *Metodología para caracterizar materiales CF RTP, para su aplicación en elementos estructurales amortiguadores y anti-vibratorios de automoción*, Universidad de la Rioja, 2018.
- [20] M.O. Santiago, C.G. Marín, J.R. Fernández, Los composites. Características y aplicaciones en la edificación, *Inf. La Construcción*. 54 (2003) 45–62. <https://doi.org/doi.org/10.3989/ic.2003.v54.i484.568>.
- [21] P.F. Mayuet Ares, *Análisis comparativo de tecnologías aplicadas al taladrado de materiales compuestos de uso estratégico en la industria aeronáutica*, Universidad de Cádiz, 2016.
- [22] S.R. Fernández-Vidal, *Análisis de taladrado en seco asistido por vibraciones de estructuras híbridas de aleaciones ligeras*, Universidad de Cádiz, 2016.
- [23] R. McCool, A. Murphy, R. Wilson, Z. Jiang, M. Price, J. Butterfield, P. Hornsby, Thermoforming carbon fibre-reinforced thermoplastic composites, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part L J. Mater. Des. Appl.* 226 (2012) 91–102. <https://doi.org/10.1177/1464420712437318>.
- [24] UNE-EN 2559/1997, *Determinación de los contenidos de resina y fibra de la masa de fibra por unidad de superficie*, 1997.

- [25] D. Tatsuno, T. Yoneyama, M. Ibuki, Effect of process parameters of shear cutting for carbon fiber-reinforced thermoplastic laminate, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 110 (2020) 1125–1138. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05878-7>.
- [26] B. Schmidt, M. Rose, M. Zimmermann, M. Kästner, Analysis of process-induced damage in remote laser cut carbon fibre reinforced polymers, *J. Mater. Process. Technol.* 295 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2021.117162>.
- [27] C.F. Cheng, Y.C. Tsui, T.W. Clyne, Application of a three-dimensional heat flow model to treat laser drilling of carbon fibre composites, *Acta Mater.* 46 (1998) 4273–4285. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(98\)00090-1](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(98)00090-1).
- [28] K.T. Voisey, S. Fouquet, D. Roy, T.W. Clyne, Fibre swelling during laser drilling of carbon fibre composites, *Opt. Lasers Eng.* 44 (2006) 1185–1197. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2005.10.008>.
- [29] M.P. Groover, *Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes and systems*, 4a Ed., John Wiley & Sons Inc., 2010.
- [30] J. Walter, M. Hustedt, R. Staehr, S. Kaierle, P. Jaeschke, O. Suttman, L. Overmeyer, Laser cutting of carbon fiber reinforced plastics-investigation of hazardous process emissions, *Phys. Procedia.* 56 (2014) 1153–1164. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2014.08.030>.
- [31] A.Y.C. Nee, *Handbook of Manufacturing Engineering and Technology*, Springer, 2015. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4670-4>.
- [32] S. Kalpakjian, S.R. Schmid, *Manufactura, ingeniería y tecnología*, 5a ed., Pearson Educacion, México, 2008.
- [33] Mitsubishi, Catálogo de herramientas de mecanizado, (1970) 52. https://www.mitsubishicarbide.com/EU/es/product/pdf/c_n_other/c006s_n.pdf (accessed April 19, 2020).
- [34] E. Ersvik, R. Khalid, *Milling in hardened steel - a study of tool wear in conventional and dynamic milling*, Universidad de Uppsala, 2015.
- [35] W. Hintze Wolfgang, D. Hartmann, C. Schütte, Occurrence and propagation of delamination during the machining of carbon fibre reinforced plastics (CFRPs) - An experimental study, *Compos. Sci. Technol.* 71 (2011) 1719–1726. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2011.08.002>.
- [36] R. Voss, L. Seeholzer, F. Kuster, K. Wegener, Influence of fibre orientation, tool geometry and process parameters on surface quality in milling of CFRP, *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.* 18 (2017) 75–91. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2016.10.002>.
- [37] M. Henerichs, R. Voß, F. Kuster, K. Wegener, Machining of carbon fiber reinforced plastics: Influence of tool geometry and fiber orientation on the machining forces, *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.* 9 (2015) 136–145. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2014.11.002>.
- [38] A. Koplev, A. Lystrup, T. Vorm, The cutting process, chips, and cutting forces in machining CFRP, *Composites.* 14 (1983) 371–376. [https://doi.org/10.1016/0010-4361\(83\)90157-X](https://doi.org/10.1016/0010-4361(83)90157-X).

- [39] L.N. López de Lacalle, F.J. Campa, A. Lamikiz, Milling, in: *Mod. Mach. Technol.*, Woodhead Publishing Limited, 2011: pp. 213–303. <https://doi.org/10.1533/9780857094940.213>.
- [40] P. Masek, P. Zeman, P. Kolar, Technology optimization of PPS/C composite milling using Taguchi method, in: *9th Int. Conf. Mach. Tools, Autom. Technol. Robot.*, 2012: p. 8.
- [41] P. Masek, P. Zeman, P. Kolar, F. Holesovsky, Edge trimming of C/PPS plates, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 101 (2019) 157–170. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2857-1>.
- [42] P. Kolar, P. Masek, P. Zeman, Milling tools for cutting of fiber-reinforced plastic, *J. Mach. Eng.* 14 (2014) 93–103.
- [43] J. Xu, M. Ji, P. Davim, M. Chen, M. El Mansori, V. Krishnaraj, Comparative study of minimum quantity lubrication and dry drilling of CFRP/titanium stacks using TiAlN and diamond coated drills, *Compos. Struct.* 234 (2020) 111727. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111727>.
- [44] F.-J. Wang, J.-B. Yan, M. Zhao, D. Wang, X.-N. Wang, J.-X. Hao, Surface damage reduction of dry milling carbon fiber reinforced plastic/polymer using left-right edge milling tool, *J. Reinf. Plast. Compos.* 39 (2020) 409–421. <https://doi.org/doi.org/10.1177/0731684420912018>.
- [45] D. Kumar, S. Gururaja, Machining damage and surface integrity evaluation during milling of UD-CFRP laminates: Dry vs cryogenic, *Compos. Struct.* 247 (2020) 112504. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112504>.
- [46] Norma ISO 8688-1:1989, Tool life testing in milling - Part 2: end milling, 1989.
- [47] P.F. Mayuet, F. Giro, A. Lamikiz, S.R. Fernández-Vidal, J. Salguero, M. Marcos, SOM/SEM based characterization of internal delaminations of CFRP samples machined by AWJM, *Procedia Eng.* 132 (2015) 693–700. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.549>.
- [48] S.R. Fernández-Vidal, S. Fernández-Vidal, M. Batista, J. Salguero, Tool wear mechanism in cutting of stack CFRP/UNS A97075, *Materials (Basel)*. 11 (2018) 1276. <https://doi.org/10.3390/ma11081276>.
- [49] Z.A. Zaliani, R. Hamidon, M.S. Hussin, M.F.M.A. Hamzas, H. Hadi, The influence of solid lubricant in machining parameter of milling operation, *Int. J. Eng. Sci. Technol.* 3 (2011) 5221–5226.
- [50] E.S. Gadelmawla, M.M. Koura, T.M.A. Maksoud, I.M. Elewa, H.H. Soliman, Roughness parameters, *J. Mater. Process. Technol.* 123 (2002) 133–145. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00060-2](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00060-2).
- [51] T. Karpát, O. Bahtiyar, B. Deger, Mechanistic force modeling for milling of unidirectional carbon fiber reinforced polymer laminates, *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 56 (2012) 79–93. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2012.01.001>.

- [52] D. Ozkan, M. Sabri, M. Oge, A. Cahit, Milling Behavior Analysis of Carbon Fiber-Reinforced Polymer (CFRP) Composites, *Mater. Today Proc.* 11 (2019) 526–533. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.01.024>.
- [53] N. Nakamura, K. Ogi, A. Ota, S. Nakata, Shear cutting behaviors in thermosetting and thermoplastic CFRP laminates, 657 (2015) 347–352. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.656-657.347>.
- [54] K. Ogi, S. Yashiro, Effect of the fiber cut angle on the shearing strength of unidirectional and cross-ply carbon-fiber-reinforced thermoplastic laminates, *Compos. Part B*. 216 (2021) 108869. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.108869>.
- [55] J.P. de Frutos, *Análisis del taladrado de fibra de carbono: Fuerzas de corte y delaminación*, Universidad de Valladolid, 2016.
- [56] J.Y. Sheikh-Ahmad, M. Dhuttargaon, H. Cheraghi, New tool life criterion for delamination free milling of CFRP, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 92 (2017) 2131–2143. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0240-2>.
- [57] W. Hintze, M. Cordes, G. Koerke, Influence of weave structure on delamination when milling CFRP, *J. Mater. Process. Technol.* 216 (2015) 199–205. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.09.004>.
- [58] G. Yang, Z. Dong, S. Gao, Y. Bao, R. Kang, D. Guo, A novel reverse helical milling process for reducing push-out delamination of CFRP, *Compos. Struct.* 253 (2020) 112778. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112778>.
- [59] J. Wang, *Abrasive waterjet machining of engineering materials*, Trasn Tech Publications, Switzerland, 2003.
- [60] H. Hocheng, H.T. Tsai, *Advanced analysis of nontraditional machining*, Springer, New York, 2013. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-4054-3>.
- [61] H. Hocheng, *Machining Technology for Composite Materials*, Woodhead Publishing Limited, 2011.
- [62] R. Kovacevic, R. Mohan, H.E. Beardsley, Monitoring of thermal energy distribution in abrasive waterjet cutting using infrared thermography, *J. Manuf. Sci. Eng. Trans. ASME*. 118 (1996) 555–563. <https://doi.org/10.1115/1.2831067>.
- [63] J.M. Llanto, M. Tolouei-Rad, A. Vafadar, M. Aamir, Recent progress trend on abrasive waterjet cutting of metallic materials: A review, *Appl. Sci.* 11 (2021) 1–24. <https://doi.org/10.3390/app11083344>.
- [64] M.K. Kulekci, Processes and apparatus developments in industrial waterjet applications, *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 42 (2002) 1297–1306. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(02\)00069-X](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(02)00069-X).
- [65] B. Bhattacharyya, B. Doloi, *Modern machining technology: advanced, hybrid, micro machining and super finishing technology*, Elsevier Science Publishing Co Inc., San Diego, 2020.

- [66] K. Gupta, N.K. Jain, R. Laubscher, Advances in gear manufacturing, in: Adv. Gear Manuf. Finish., Elsevier Inc., 2017: pp. 67–125. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804460-5.00004-3>.
- [67] F. Bañón, A. Sambruno, L. Gonzalez, J.M. Vazquez-Martinez, J. Salguero, A Review on the Abrasive Water-Jet Machining of Metal – Carbon Fiber Hybrid Materials, 11 (2021) 164. <https://doi.org/10.3390/met11010164>.
- [68] Y.G. Álvarez, Estudio de la tecnología de corte por chorro de agua, Universidad de Extremadura, 2018.
- [69] J.G.A. Bitter, A study of erosion phenomena part I, Wear. 6 (1963) 5–21. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(63\)90003-6](https://doi.org/10.1016/0043-1648(63)90003-6).
- [70] I. Finnie, Some observations on the erosion of ductile metals, Wear. 19 (1972) 81–90. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(72\)90444-9](https://doi.org/10.1016/0043-1648(72)90444-9).
- [71] J.G.A. Bitter, A study of erosion phenomena part II, Wear. 6 (1963) 169–190. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(63\)90073-5](https://doi.org/10.1016/0043-1648(63)90073-5).
- [72] F. Bañón, Análisis, evaluación y propuesta de mejora del rendimiento del mecanizado de estructuras híbridas CF RTP/Aleación metálica, Universidad de Cádiz, 2020.
- [73] Jagadish, K. Gupta, Abrasive water jet machining of engineering materials, (2020) 73.
- [74] R. Melentiev, F. Fang, Recent advances and challenges of abrasive jet machining, CIRP J. Manuf. Sci. Technol. 22 (2018) 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2018.06.001>.
- [75] A. Sambruno, F. Bañón, J. Salguero, B. Simonet, M. Batista, Kerf taper defect minimization based on abrasive waterjet machining of low thickness thermoplastic carbon fiber composites C/TPU, Materials (Basel). 12 (2019) 4192. <https://doi.org/10.3390/ma12244192>.
- [76] D.K. Kalla, P.S. Dhanasekaran, B. Zhang, R. Asmatulu, Abrasive waterjet machining of fiber reinforced composites: A review, AIP Conf. Proc. 1431 (2012) 535–542. <https://doi.org/10.1063/1.4707606>.
- [77] I. Wong MM, A. Azmi, C. Lee, A. Mansor, Kerf taper and delamination damage minimization of FRP hybrid composites under abrasive water-jet machining, Int. J. Adv. Manuf. Technol. 94 (2018) 1727–1744. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9669-y>.
- [78] A. Dhanawade, S. Kumar, Experimental study of delamination and kerf geometry of carbon epoxy composite machined by abrasive water jet, J. Compos. Mater. 51 (2017) 3373–3390. <https://doi.org/10.1177/0021998316688950>.
- [79] M. Li, M. Huang, Y. Chen, W. Kai, X. Yang, Experimental study on hole characteristics and surface integrity following abrasive waterjet drilling of Ti6Al4V/CFRP hybrid stacks, Int. J. Adv. Manuf. Technol. 104 (2019) 4779–4789. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04334-5>.

- [80] M. Li, M. Huang, Y. Chen, P. Gong, X. Yang, Effects of processing parameters on kerf characteristics and surface integrity following abrasive waterjet slotting of Ti6Al4V/CFRP stacks, *J. Manuf. Process.* 42 (2019) 82–95. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.04.024>.
- [81] S.T. Kumaran, T.J. Ko, M. Uthayakumar, M.M. Islam, Prediction of surface roughness in abrasive water jet machining of CFRP composites using regression analysis, *J. Alloys Compd.* 724 (2017) 1037–1045. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.07.108>.
- [82] R. Pahuja, M. Ramulu, M. Hashish, Surface quality and kerf width prediction in abrasive water jet machining of metal-composite stacks, *Compos. Part B Eng.* 175 (2019) 107134. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107134>.
- [83] R. Ruiz-Garcia, P.F. Mayuet Ares, J.M. Vazquez-Martinez, J. Salguero, Influence of abrasive waterjet parameters on the cutting and drilling of CFRP/UNS A97075 and UNS A97075/CFRP stacks, *Materials (Basel)*. 12 (2018) 107. <https://doi.org/10.3390/ma12010107>.
- [84] K. Gupta, A. Paramanik, *Advanced Machining and Finishing*, 2021.
- [85] T.M. Ahmed, A.S. El Mesalamy, A. Youssef, T.T. El Midany, Improving surface roughness of abrasive waterjet cutting process by using statistical modeling, *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.* 22 (2018) 30–36. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2018.03.004>.
- [86] Jagadish, S. Bhowmik, A. Ray, Prediction and optimization of process parameters of green composites in AWJM process using response surface methodology, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 87 (2016) 1359–1370. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-8281-x>.
- [87] M. El-Hofy, M.O. Helmy, G. Escobar-Palafox, K. Kerrigan, R. Scaife, H. El-Hofy, Abrasive water jet machining of multidirectional CFRP laminates, *Procedia CIRP*. 68 (2018) 535–540. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.12.109>.
- [88] B. Jagadeesh, P. Dinesh Babu, M. Nalla Mohamed, P. Marimuthu, Experimental investigation and optimization of abrasive water jet cutting parameters for the improvement of cut quality in carbon fiber reinforced plastic laminates, *J. Ind. Text.* 48 (2018) 178–200. <https://doi.org/10.1177/1528083717725911>.
- [89] Y. Kakinuma, T. Ishida, R. Koike, H. Klemme, B. Denkena, T. Aoyama, Ultrafast feed drilling of carbon fiber-reinforced thermoplastics, *Procedia CIRP*. 35 (2015) 91–95. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.08.074>.
- [90] D.K. Shanmugam, T. Nguyen, J. Wang, A study of delamination on graphite/epoxy composites in abrasive waterjet machining, *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* 39 (2008) 923–929. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2008.04.001>.
- [91] S. Vigneshwaran, M. Uthayakumar, V. Arumugaprabu, Abrasive water jet machining of fiber-reinforced composite materials, *J. Reinf. Plast. Compos.* 37 (2018) 230–237. <https://doi.org/10.1177/0731684417740771>.
- [92] R. Pahuja, M. Ramulu, Abrasive water jet machining of Titanium (Ti6Al4V)–CFRP stacks – A semi-analytical modeling approach in the prediction of kerf geometry, *J. Manuf. Process.* 39 (2019) 327–337. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.01.041>.

- [93] M. Ramulu, R. Pahuja, M. Hashish, V. Isvilonanda, Abrasive waterjet machining effects on kerf quality in thin fiber metal laminate, in: 2015 WJTA-IMCA Conf. Expo, 2015: p. 13.
- [94] R. Pahuja, M. Ramulu, M. Hashish, Abrasive waterjet profile cutting of thick titanium/graphite fiber metal laminate, in: ASME Int. Mech. Eng. Congr. Expo. Proc., 2017: pp. 1–11.
- [95] R. Fu, Z. Jia, F. Wang, Y. Jin, D. Sun, L. Yang, D. Cheng, Drill-exit temperature characteristics in drilling of UD and MD CFRP composites based on infrared thermography, *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 135 (2018) 24–37. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2018.08.002>.
- [96] M. Chen, C. Jiang, Z. Xu, K. Zhan, V. Ji, Experimental study on macro- and microstress state, microstructural evolution of austenitic and ferritic steel processed by shot peening, *Surf. Coatings Technol.* 359 (2019) 511–519. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.12.097>.
- [97] I.A. Popan, G. Contiu, I. Campbell, Investigation on standoff distance influence on kerf characteristics in abrasive water jet cutting of composite materials, *MATEC Web Conf.* 137 (2017) 01009. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201713701009>.

Análisis, evaluación y propuesta de mejora del rendimiento del mecanizado de materiales compuestos de naturaleza termoplástica CF RTP

Capítulo 3

Metodología experimental

Tesis Doctoral
Alejandro Sambruno Ladrón de Guevara

Capítulo 3. Metodología experimental

3.1. Introducción

En este capítulo se describe toda la metodología experimental establecida para la realización de este trabajo. Esta descripción incluye además los procedimientos seguidos, abordando aspectos básicos como el material empleado, los procesos empleados, los parámetros utilizados en cada proceso, la caracterización de defectos y su cuantificación.

Los experimentos realizados se presentan de forma ordenada, clasificándose en etapas que conducen a una planificación final de cara a la obtención definitiva de resultados y conclusiones. De esta forma, la realización de una correcta metodología basada en el aprovechamiento de los recursos disponibles y que asegure la reproducibilidad y repetitividad, es fundamental para el investigador a la hora de llevar a cabo cualquier tarea.

El objetivo principal de este trabajo es el estudio y análisis del postprocesado de materiales compuestos de naturaleza termoplástica. Eso conlleva a establecer una metodología que posibilite la elaboración de criterios de selección de tecnologías de uso preferente para el mecanizado de CFRTTPs. De este modo, se debe evaluar el postprocesado realizado en distintas tecnologías a partir de los ensayos diseñados para cumplir dicho objetivo.

Para facilitar el desarrollo de este capítulo, se ha generado un diagrama de flujo que contiene las fases principales llevadas a cabo en esta metodología (Figura 3.1). En primer lugar, tras la recepción del material, se realiza una caracterización del mismo. Posteriormente, en la Fase 1 se realizará un estudio comparativo de los postprocesados de fresado y chorro de agua con abrasivo, con el fin de conocer la idoneidad de cada proceso en el material. Es necesario recordar la escasa literatura científica existente sobre el mecanizado de este tipo de materiales. Por ello, en el Capítulo 2 se realizó una revisión bibliográfica sobre los parámetros y condiciones de corte más empleados en el mecanizado de CFRPs. De esta forma, se dará a conocer si el comportamiento de los compuestos de matriz termoplástica es similar a los de matriz termoestable,

ampliamente utilizados en la industria. Al finalizar esta fase se establecerá una discusión sobre los resultados más relevantes que darán pie al comienzo de la Fase 2.

Para el correcto entendimiento de la Fase 2, es necesario expresar que debido al interés industrial del postproceso esta fase se desarrollará mediante el proceso de chorro de agua con abrasivo. En esta ocasión se profundizará en el material, analizando la influencia de los parámetros fundamentales del proceso en distintas configuraciones del compuesto.

Para ello, se tendrá en cuenta, no solo la configuración de material empleada en la Fase 1, sino también otras disposiciones de compuestos termoplásticos fabricados con el mismo refuerzo y la misma resina, pero con porcentajes entre ellos diferentes. Esto da lugar a unos materiales, con la misma geometría, pero con unas propiedades mecánicas diferentes entre sí.

De esta fase se podrá extraer el comportamiento frente al mecanizado de un mismo tipo de material termoplástico fabricado con la misma resina y refuerzo, pero bajo condiciones de conformado diferentes.

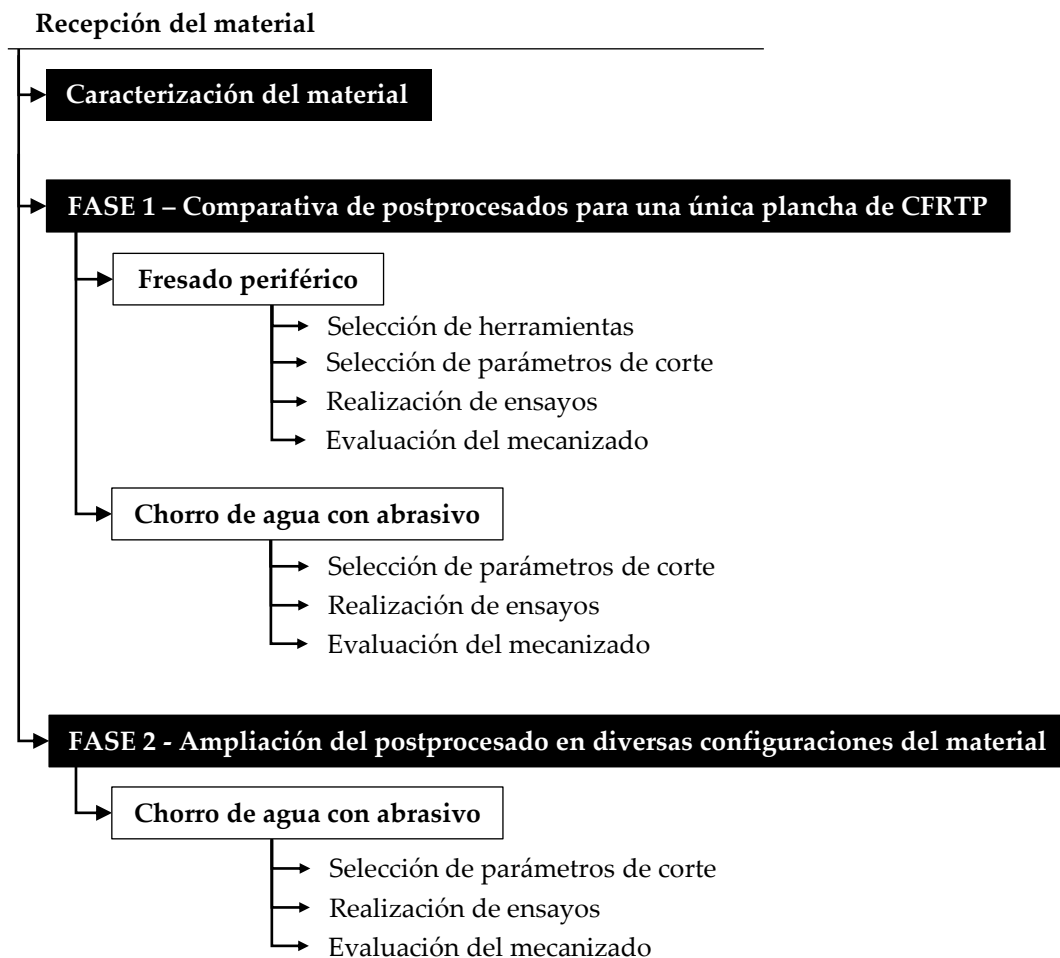


Figura 3.1. Diagrama de flujo de la metodología general llevada a cabo

3.2. Caracterización del material empleado durante el experimento

Tal y como se ha mencionado en capítulos anteriores, el material empleado para la realización de este trabajo es un material compuesto con resina termoplástica (CF RTP). Las características y propiedades de este material hacen que, aunque no sea uno de los más empleados en la industria, tienda al alza en lo que a ratio peso/propiedades mecánicas se refiere [1–3].

Además, la componente medioambiental en el procesado de este tipo de materiales es importante, ya que, el uso de resinas termoplásticas permite en mayor medida la reciclabilidad del compuesto. Este fenómeno, tal y como se ha visto en el Capítulo 2 es un hándicap para compuestos termoestables.

3.2.1. Propiedades de los CF RTP empleados

Las planchas del material compuesto termoplástico reforzado con fibras de carbono se han fabricado por la empresa Nanotures S.L. En la Tabla 3.1 se muestran las características principales de la fibra, la matriz y el CF RTP. Las fibras de carbono que conforman el refuerzo son de tipo *Twill* 200 g/m² con un espesor de 0.25 mm.

La resina termoplástica empleada para la fabricación del composite es Poliuretano (TPU). Esta resina tiene una temperatura de transición vítrea de 145 °C. El espesor total una vez consolidados refuerzo y matriz es de 2 mm, lo cual permite catalogar al compuesto como material de bajo espesor.

Tabla 3.1. Características principales de la fibra, matriz y CF RTP

Refuerzo	Tipo de fibra	<i>Twill</i> 200 g/m ²
	Espesor de las fibras	0.25 mm
Matriz	Tipo de resina	TPU (Poliuretano)
	Temperatura de transición vítrea	145 °C
CF RTP	Orientación de las capas	[0°/90°] _s
	Número de capas	7
	Espesor del compuesto (t)	2.08 mm
	Porcentaje Fibra/Matriz (%)	74.2 / 25.8

Para realizar el conformado de los compuestos termoplásticos reforzados con fibras de carbono, Nanotures S.L. ha empleado la tecnología de termoconformado. El refuerzo se encontraba dispuesto en una bobina de la cual se recortaba la cantidad de material necesario para conformar la plancha.

La matriz se disponía en una preforma rectangular sólida de 0.1 mm de espesor. Apilando estos materiales de la forma deseada y bajo el know-how de la empresa, se han aplicado ciclos de curado mediante una prensa capaz de realizar el termoconformado (Figura 3.2).

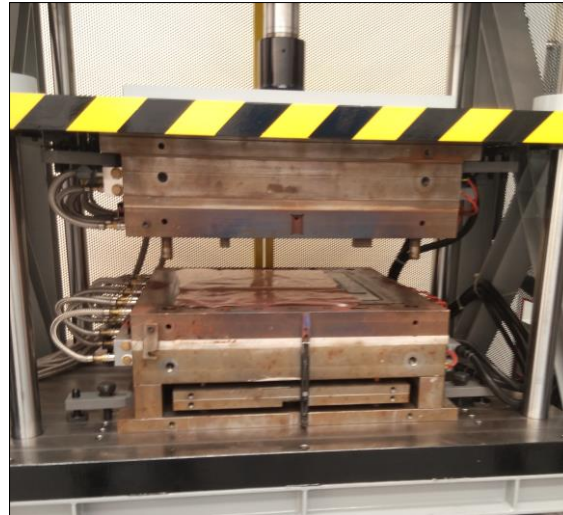


Figura 3.2. Prensa empleada para realizar el termoconformado de los CF RTPs

Las dimensiones de cada plancha de material conformado son de 300 x 300 mm. Para la realización de este trabajo se han conformado un total de 1 + 7 planchas. La primera de ellas ha sido empleada para conocer el efecto de la resina termoplástica con lo que se ha conformado el CF RTP frente a diversos postprocesados. Esta plancha ha sido conformada con parámetros empleados en la industria bajo el know-how de la empresa. Las 7 planchas restantes están conformadas en la misma tanda, pero con parámetros de fabricación diversos. Modificar parámetros en la fabricación de un compuesto implica que cada material resultante sea un nuevo material, el cual puede comportarse de manera diferente frente a un mecanizado. Es por ello que a cada una de estas 7 planchas se les han realizado ensayos de tracción y cortadura interlaminar para conocer algunas propiedades mecánicas (Tabla 3.2). Uno de los objetivos parciales de este trabajo es encontrar un proceso que sea capaz de garantizar la calidad en el corte de las 7 planchas de fibra de carbono independientemente de la configuración con la que haya sido conformada. Por lo tanto, como resumen, para la realización de la Fase 1 se ha seleccionado una la plancha designada como plancha 1. Posteriormente, en la Fase 2 se realiza la comparativa de las 7 planchas frente a un mismo postprocesado.

Tabla 3.2. Propiedades mecánicas de las 7 planchas fabricadas

Designación	Resistencia a tracción (Mpa)	Módulo elástico (GPa)	Resistencia a flexión (MPa)	Módulo de flexión (GPa)	Resistencia a compresión (MPa)	Resistencia al cizallamiento (MPa)
A	754	23.4	620	9.1	142	8.1
B	742	24.1	582	8.8	157	9.9
C	751	26.8	631	8.1	136	8.3
D	732	24.5	590	8.9	156	9.1
E	757	23.8	628	8.9	148	8.1
F	749	27.8	640	8.4	136	9.8
G	748	26.5	629	8.0	144	8.8

3.2.2. Cálculo del porcentaje de resina y fibra de un compuesto

Aunque se conocen los porcentajes iniciales de fibra y matriz empleados en el conformado del compuesto termoplástico, tras la consolidación del material estos porcentajes pueden cambiar ligeramente. Por ello, tal y como se ha explicado en el Capítulo 2 de esta memoria, se ha hecho uso de la norma UNE-EN 2559/1997: *Determinación de los contenidos de resina y fibra de la masa de fibra por unidad de superficie* [4] para calcular los porcentajes de fibra y resina de la fibra A tras su conformado.

Esta norma desarrolla varias metodologías para obtener dicho porcentaje. En esta ocasión, debido a la instrumentación con la que contaba el equipo de investigación, se ha hecho uso de la catalogada como *Método A / Determinación del contenido en fibra y resina en porcentaje de masa*. Este método emplea ácido sulfúrico como reactivo para disolver la resina del material compuesto. De esta forma, tras eliminar dicha resina, se puede obtener, en forma de masa, el porcentaje de fibras de carbono empleado. En la Figura 3.3 se muestra un esquema del procedimiento seguido para el cálculo del porcentaje de resina y fibra de un compuesto en función a la norma comentada anteriormente.

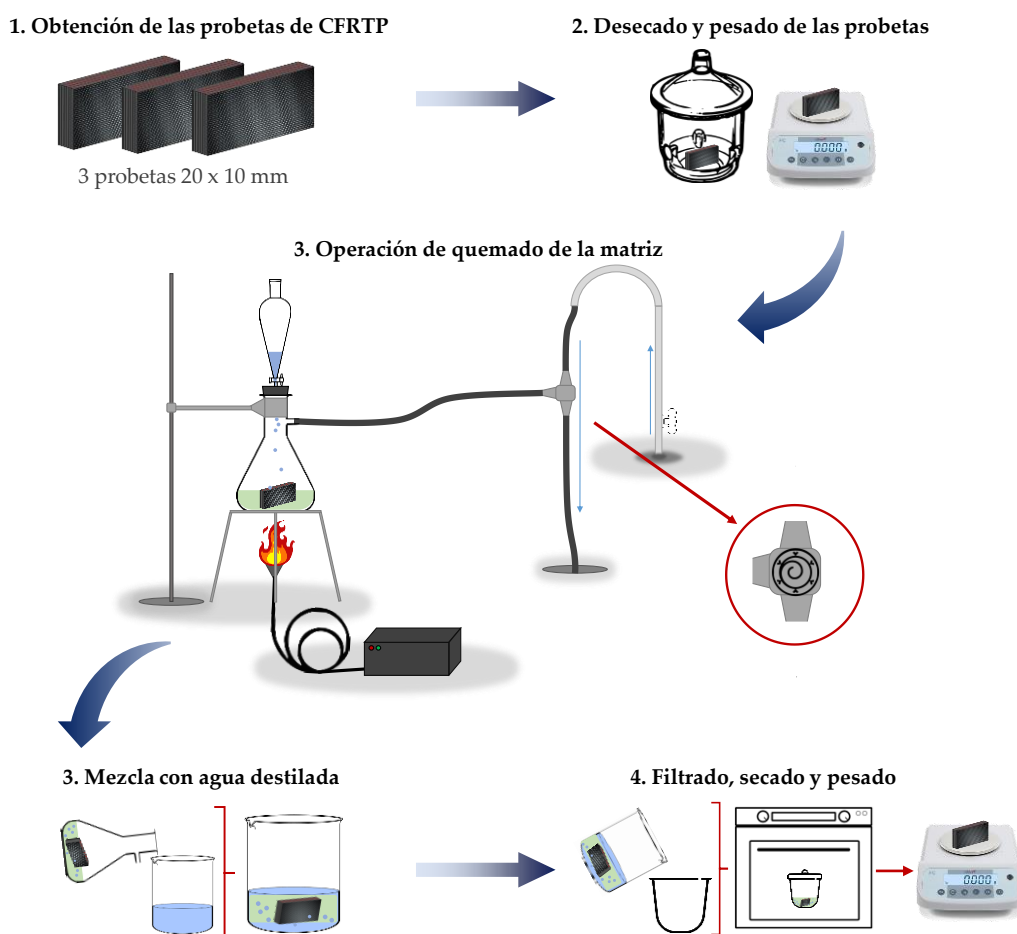


Figura 3.3. Esquema del procedimiento seguido para el cálculo del porcentaje de resina y fibra de un compuesto

En la siguiente lista se muestran el listado de equipos y reactivos necesarios para la aplicación de la norma:

- Balanza precisa a ± 0.1 mg.
- Dispositivo de corte, tal como sierra de diamante o cualquier otro aparato adecuado.
- Kitasato de 250 ml de doble cuello equipado con embudo cuentagotas para 50 ml, con entrada de aire y una bomba de agua.
- Vasos de boca ancha con capacidad hasta 400 ml.
- Crisol de 20 ml con filtro de vidrio sinterizado (porosidad $n^{\circ}2$) y conjunto adecuado para filtrar.
- Desecador que contenga un agente de secado adecuado (por ejemplo, gel de sílice, cloruro cálcico o anhídrido fosfórico).
- Ácido sulfúrico concentrado (densidad 1,84 a 1,89).
- Agua oxigenada (300 g/l a 500 g/l).
- Acetona (propanona).
- Agua destilada.
- Fuente de calor con adecuado control de temperatura.
- Termómetro capaz de medir 180 °C.
- Estufa eléctrica capaz de mantener una temperatura de (120 ± 5) °C.
- Equipo de protección comprendiendo guantes de goma, para el manejo de las soluciones de ácido sulfúrico y de agua oxigenada.

Las probetas empleadas en este experimento deben ser rectangulares de dimensiones 20 x 10 x 2 mm. Pueden usarse probetas de diferentes dimensiones mediante acuerdo entre el usuario y el fabricante. En esta ocasión, se parte de un material compuesto que tiene un espesor de 2.08 mm, por lo que únicamente hace falta mecanizarlo en los ejes X e Y para conseguir las dimensiones especificadas.

Se debe emplear un mínimo de tres probetas para asegurar la repetitividad del experimento. Además, deben estar distribuidas en el laminado y cortadas dejando al menos 10 mm desde los bordes del material compuesto. Las probetas deben acondicionarse a la atmósfera de ensayo al menos durante dos horas. La atmósfera de ensayo es en temperatura 23 ± 2 °C y en humedad $50 \pm 5\%$. Los ensayos se deben realizar dentro de las 6 horas posteriores a este acondicionamiento.

Antes de comenzar el experimento, dado que es un procedimiento donde existe riesgo químico, se debe disponer de ropa de protección y guantes de goma para manipular las soluciones de agua oxigenada y ácido sulfúrico concentrado. Además, las reacciones deben efectuarse detrás de la pantalla de seguridad para asegurar la protección de los ojos.

En primer lugar, se introducen las probetas en el desecador hasta obtener un peso constante (Figura 3.4). La diferencia de peso entre dos pesadas consecutivas debe ser inferior a 2 mg. Cuando esta condición se cumple, se registra el peso m_1 .



Figura 3.4. Probetas de CF RTP introducidas en el desecador

A continuación, se introduce la probeta en el Kitasato y se vierten con precaución 20 ml de ácido sulfúrico concentrado en el frasco. Se adapta el embudo cuentagotas a un cuello del Kitasato y la bomba de agua al otro (Figura 3.5).

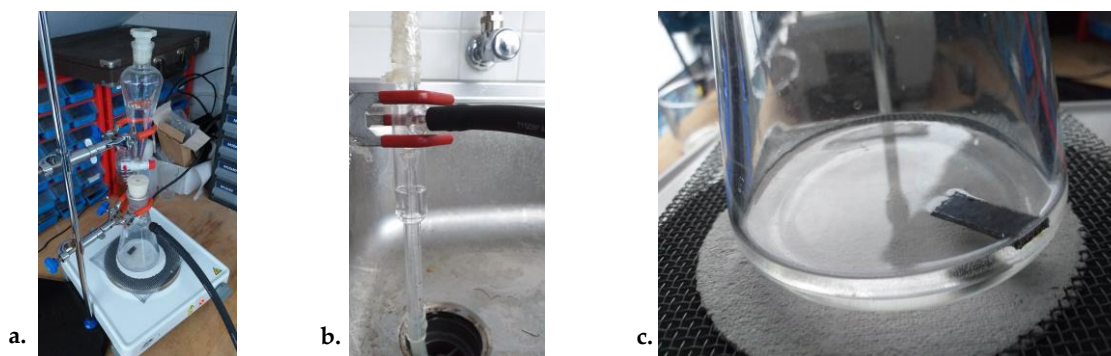


Figura 3.5. a. Conjunto ensamblado; b. Bomba de presión empleada; c. Probeta introducida en el Kitasato junto al ácido sulfúrico

Posteriormente, se vierte una cantidad adecuada de solución de agua oxigenada (20 ml de concentración 500 g/l o 40 ml de concentración 300 g/l) con el cuentagotas y se calienta suavemente el frasco (160 ± 10 °C) hasta que el ácido empiece a humear (Figura 3.6).

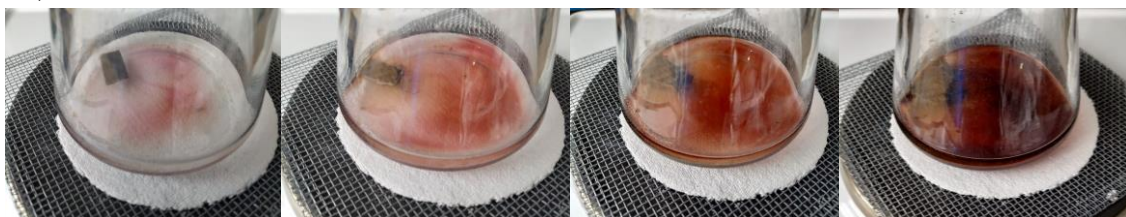


Figura 3.6. Probeta CF RTP reaccionando al ácido sulfúrico

En este momento, se detiene el calentamiento y se permite que la solución de agua oxigenada caiga en el ácido a razón de una gota cada dos segundos, incrementando después de 5 minutos a una gota por segundo. Si después de haber utilizado toda el agua oxigenada la solución está todavía marrón, se añaden porciones de 5 ml de agua oxigenada al mismo ritmo y se continúa calentando hasta que la solución se vuelva clara (Figura 3.7).



Figura 3.7. Hilos de fibra de carbono sueltos en la disolución empleada

En ese momento, se detiene el calentamiento de tal forma que, cuando el cuello del frasco esté bastante frío para manejarlo, se quite la bomba de agua y los dispositivos de sujeción del frasco y se enfríe todo a temperatura ambiente con agua. Se vierte el contenido del frasco en un vaso de boca ancha de 400 ml que contiene 100 ml de agua destilada y se lava con agua destilada cualquier fibra que siga adherida al vaso.

A continuación, se filtra el contenido del vaso de boca ancha en el filtro de vidrio sinterizado, previamente seco y pesado (m_2), y se lava el vaso y el contenido del filtro con agua destilada hasta que el agua de lavado esté libre de ácido. Posteriormente se lava con 10 ml de acetona para eliminar cualquier resto de ácido (Figura 3.8.a). Por último, se seca el filtro y su contenido a 120 °C durante al menos 45 minutos (Figura 3.8.b) y se deja enfriar en el desecador durante 20 minutos. Una vez transcurrido este tiempo se pesa el filtro para obtener el peso m_3 .

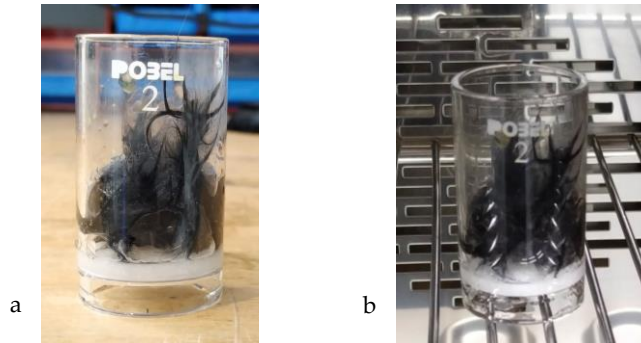


Figura 3.8. Hilos de fibra depositados en el filtro de vidrio sinterizado: **a.** Limpiados con acetona; **b.** Introducidos en el horno

Una vez obtenidos los tres pesos se hace uso de las Ecuaciones Ec. 3.1 y Ec. 3.2:

$$W_f = \frac{m_3 - m_2}{m_1} * 100 (\%) \quad \text{Ec. 3.1}$$

$$W_r = 100 - W_f (\%) \quad \text{Ec. 3.2}$$

Donde W_f es el contenido de fibra como porcentaje de la masa inicial, m_1 es la masa inicial de la probeta de material compuesto, m_2 es la masa del filtro de vidrio sinterizado y m_3 es la masa total final del filtro y los residuos de fibra tras el ataque de ácido sulfúrico y W_r es el contenido de resina como porcentaje de la masa inicial.

Los datos obtenidos mediante esta caracterización del material se muestran en la Tabla 3.3. Se ha realizado el ensayo en tres probetas tal y como indica la norma. Se ha hecho uso de la plancha de fibra de carbono llamada como A. Además, la empresa Nanotures S.L. ha proporcionado, en paralelo, el porcentaje de dicha plancha. Contrastar esta información con los datos nominales permite corroborar el correcto proceso de fabricación empleado para este material compuesto.

Se puede ver cómo los resultados de la fibra A ensayada por el investigador obtienen un 70.36% de fibra y 29.64% de resina termoplástica. Por otro lado, los resultados de la fibra A ensayada por Nanotures S.L. son de 74.20% en fibra y 25.80% en resina.

Se debe tener en cuenta que el conformado del compuesto ha sido efectuada mediante el empleo de un termoconformado y que las probetas ensayadas en este experimento son seleccionadas de distintas zonas a lo largo de la plancha del CF RTP. Puede haber zonas en la plancha en las que la resina se haya distribuido de una forma diferente a causa de la temperatura y presión aplicadas en el proceso de fabricación. No obstante, los resultados muestran una diferencia en porcentaje de fibra y resina de un 3.84%, a partir del cual se puede considerar que el material compuesto fabricado es estable a lo largo de su superficie.

Tabla 3.3. Porcentajes de fibra y resina obtenidos en el experimento junto a resultados otorgados por Nanotures S.L.

Tipo de Fibra	Número de probeta	% Fibra	% Resina
A	1	69.125	30.874
	2	64.515	35.484
	3	77.443	22.556
	Media	70.360	29.640
A (Nanotures S.L.)		74.200	25.800

3.3. Metodología experimental seguida para el postprocesado mediante fresado periférico

Como ya ha sido comentado en apartados anteriores, el postprocesado de materiales compuestos de naturaleza termoplástica presenta dificultades debido, sobre todo, a la naturaleza intrínseca del material y su efecto ante una temperatura de proceso elevada. No obstante, según la literatura revisada, una buena configuración de parámetros de entrada puede dar lugar a un corte de calidad con mínimos defectos. Por ello, uno de los procesos seleccionados para el estudio del postprocesado de materiales compuestos de naturaleza termoplástica es el fresado periférico. Para la realización de los experimentos y con el fin asegurar la repetitividad y reproducibilidad de los ensayos es necesario proceder de un modo ordenado. Para ello, en primer lugar, se desglosa un apartado que concierne a las herramientas empleadas en el mecanizado, seguido de un

apartado de realización de ensayos que recoge toda la información necesaria para llevar a cabo el corte.

Por último, se recoge en un tercer apartado la información necesaria acerca de los equipos necesarios para la obtención de datos y resultados provenientes del material mecanizado. En la Figura 3.9 se puede ver el diagrama de flujo correspondiente a la metodología llevada a cabo para la realización del postprocesado de CF RTP mediante fresado.

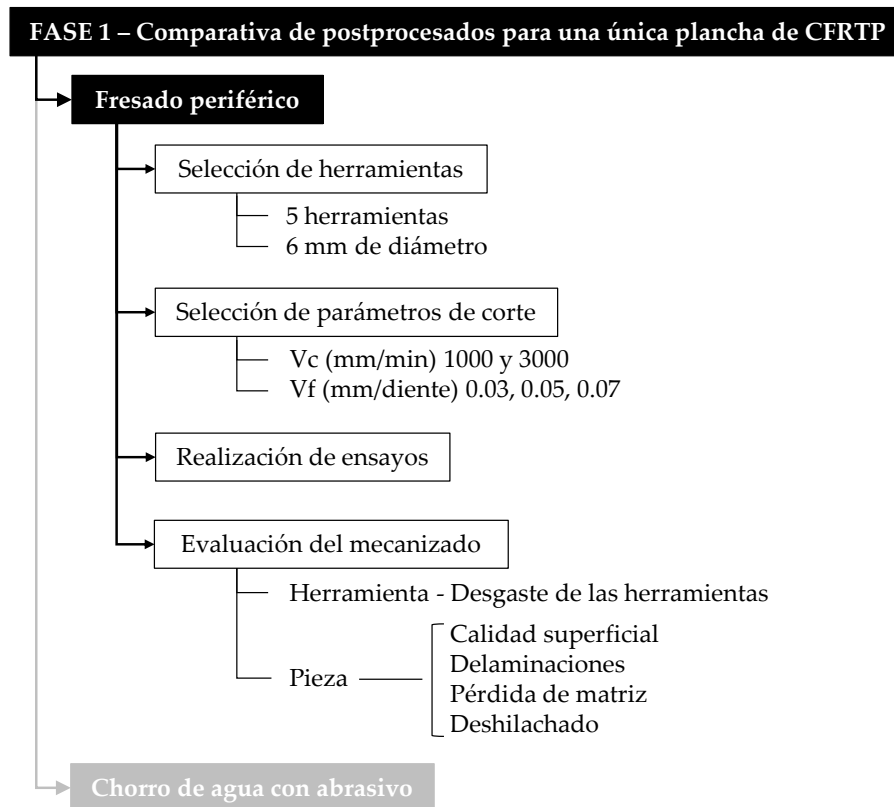


Figura 3.9. Diagrama de flujo de la metodología llevada a cabo para la realización del postprocesado en fresado

3.3.1. Selección de herramientas

Para poder realizar el fresado de CF RTPs son necesarias unas determinadas herramientas de corte. Como ya se ha comentado, existe poca literatura científica sobre la selección de unas herramientas corte óptimas para el mecanizado de materiales compuestos termoplásticos reforzados con fibras de carbono. En esta ocasión, han sido seleccionadas cinco herramientas del fabricante KENDU. En la Tabla 3.4 se muestran las características principales de cada una de ellas junto con un esquema de su geometría a modo de ejemplo. Las herramientas se podrían clasificar en 3 grupos denominados (Figura 3.10): convencional (herramienta A), pulverizadora (herramienta B) e híbrida (herramientas C, D y E).

Tabla 3.4. Características de las herramientas empleadas en el fresado

Designación	Material	Diámetro	Nº de dientes (z)	Geometría
A	Carburo de Wolframio (WC-Co), sin recubrimiento	6 mm	2	Ángulo de hélice 30°
B	Carburo de Wolframio (WC-Co), sin recubrimiento	6 mm	11	-
C	Carburo de Wolframio (WC-Co), recubrimiento de diamante	6 mm	8	Ángulo de hélice 10°
D	Carburo de Wolframio (WC-Co), recubrimiento de diamante	6 mm	8	Ángulo de hélice 0°
E	Carburo de Wolframio (WC-Co), recubrimiento de diamante	6 mm	8	Ángulo de hélice 10°

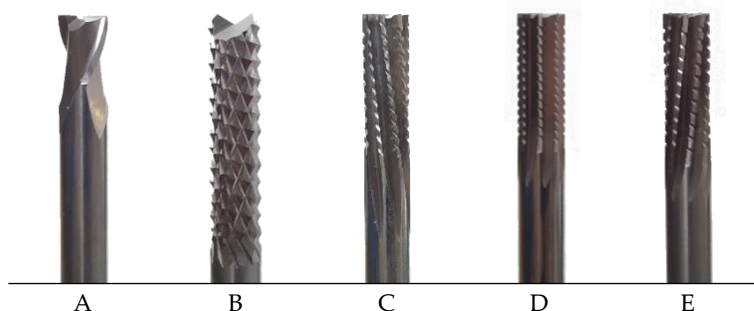


Figura 3.10. Herramientas empleadas en el postprocesado mediante fresado

Cada uno de los grupos de herramientas difiere en número de dientes de tal forma que el grupo convencional tiene 2 dientes, el grupo pulverizadora 11 dientes y el híbrido 8 dientes. Además, entre las herramientas que se encuentran en el grupo híbrido (C, D y E) hay una diferencia en cuanto al ángulo de hélice se refiere, considerando la herramienta C un ángulo de hélice de -10°, la herramienta D un ángulo de 0° y la herramienta E de 10°.

Dadas las grandes diferencias existentes entre ellas y para facilitar la comparación de los resultados, todas las herramientas coinciden en diámetro, siendo éste de 6 mm.

3.3.2. Selección de parámetros y realización de ensayos

Para la realización de los ensayos se ha hecho uso de un centro de mecanizado de 5 ejes Kondia Five 400 (Figura 3.11) con control de trabajo Heidenhain iTNC530 ubicado en el Taller CNC de la Escuela Superior de Ingeniería de la Universidad de Cádiz. El equipo cuenta con una velocidad de giro de hasta 24000 rpm con una potencia de 18 kW.



Figura 3.11. Centro de mecanizado Kondia Five 400

Los ensayos consistirán en operaciones de ranurado de 50 mm de longitud. De esos 50 mm se desecharán los primeros y últimos 10 mm. De tal forma que la zona estudiada será la central de 30 mm (Figura 3.12.a). Esta medida es un sistema preventivo debido a que la herramienta en la zona de entrada y salida del material puede causar defectos hasta que se estabiliza el cuerpo completo de la herramienta dentro del corte. Para asegurar un corte homogéneo las herramientas de corte están desplazadas 3 mm por debajo de la superficie inferior del material (Figura 3.12.b).

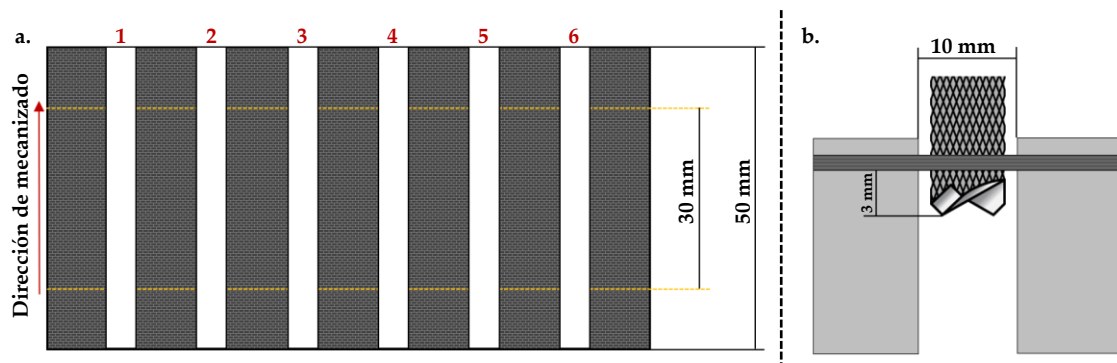


Figura 3.12. a. Disposición del mecanizado en el composite; b. Posicionamiento de la herramienta

Se ha diseñado un utillaje específico para la sujeción del CFRTTP en el centro de mecanizado (Figura 3.13). Este utillaje se ancla a la mesa del centro de mecanizado. El espacio entre ranuras es de 10 mm (Figura 3.12.b): 6 mm correspondientes al diámetro de la herramienta y 2 mm por cada lado como margen de seguridad.

Como ha sido analizado con anterioridad, la selección de parámetros para efectuar el postprocesado se basa en estudios reales y de aplicación directa encontrados en varios artículos de investigación científica. Combinando todos los parámetros se puede ver como se ejecutarán 6 ensayos diferentes (Tabla 3.5), todos ellos para cada una de las cinco herramientas.

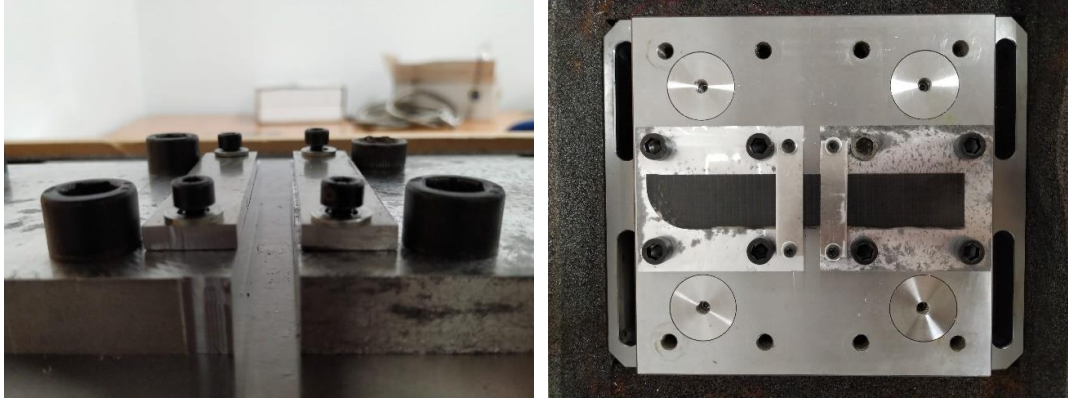


Figura 3.13. Utillaje empleado para la sujeción del material en el fresado

Tabla 3.5. Combinación de parámetros de corte empleados en el postprocesado por fresado periférico

Ensayo	V_c (m/min)	V_f (mm/diente)
1	1000	0.03
2	1000	0.05
3	1000	0.07
4	3000	0.03
5	3000	0.05
6	3000	0.07

3.3.3. Protocolo de evaluación de los ensayos de fresado

Tras la realización de los ensayos se procede a establecer una metodología de evaluación que permita caracterizar las herramientas y las piezas mecanizadas. Para ello, se han empleado técnicas de microscopía estereoscópica (SOM), de microscopía electrónica de barrido (SEM) y técnicas para la obtención de la calidad superficial. Los equipos empleados para ello han sido el microscopio estereoscópico *Nikon, SMZ 800* para las técnicas SOM, situado en el Centro de Metrología Industrial; el microscopio electrónico de barrido *Hitachi, VP-SEM SU1510* para las técnicas SEM, situado en el Laboratorio de Ensayos, Corrosión y Protección; el rugosímetro *Mahr Perthometer PGK 120* para la calidad final de la superficie mecanizada, ubicado en el Centro de Metrología Industrial. Todos ellos se encuentran en la Escuela Superior de Ingeniería de la Universidad de Cádiz.

El microscopio estereoscópico Nikon cuenta con una lente focal de alta resolución capaz de realizar macrografías hasta un máximo de 63 aumentos. Por otro lado, el microscopio electrónico de barrido Hitachi cuenta con una resolución de 3 nm en modo de alto vacío, así como un sistema de función *quad-bias* para una relación señal/ruido superior con energías de haz más bajas. Por último, el rugosímetro Mahr cuenta con una unidad de accionamiento capaz de realizar mediciones precisas de hasta 120 mm de longitud de trazado a velocidades de desplazamiento de 0.1 mm/s. Su rango de medición es de $\pm 250 \mu\text{m}$ y su desviación lineal al realizar la medición es menor al 1%.

Para la evaluación de las herramientas de corte, se realizarán macrografías mediante técnicas SOM y SEM al estado final de la herramienta tras cada combinación de parámetros de corte. Mediante estas macrografías se buscarán los posibles mecanismos de desgaste generados en el mecanizado. En cuanto a las piezas, se debe tener en cuenta los defectos originados en ella. Así, se pueden distinguir defectos microscópicos y macroscópicos. En cuanto a los defectos macroscópicos se evaluarán las delaminaciones en la intercara y el deshilachado generado en la cara superior e inferior de la probeta debido a la pérdida de matriz mediante el empleo de técnicas SOM.

A nivel microscópico, se ha evaluado la calidad superficial a través del parámetro Rz en varios puntos a lo largo de la zona mecanizada. Como ha sido comentado anteriormente, las planchas de CF RTP tienen un espesor muy pequeño, lo cual dificulta la obtención de la calidad superficial en la sección de la superficie mecanizada. Por ello, apareció la necesidad de diseñar y fabricar un utillaje (Figura 3.14) capaz de realizar dichas mediciones, fabricado mediante un equipo de electroerosión por hilo (WEDM).

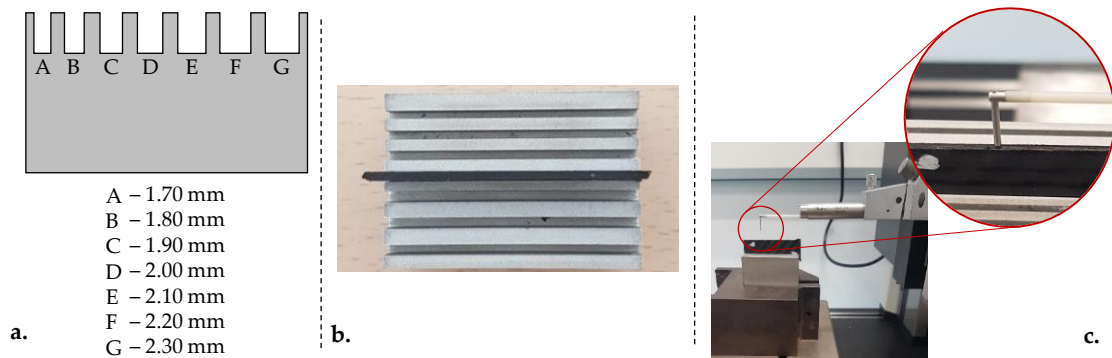


Figura 3.14. a. Esquema del utillaje de soporte de probetas con las dimensiones de cada ranura; b. CF RTP mecanizado mediante fresado colocado en el utillaje; c. Palpador del rugosímetro recorriendo la sección de material

Este utillaje es un paralelepípedo en el cual hay una ranura de espesor 2 mm. Esto permite encajar la fibra mecanizada en el utillaje de forma que quede en una posición transversal y así, asegurar el posicionamiento y evitar posibles vibraciones u holguras producidas durante la medición de la calidad superficial.

Con el fin de obtener una cantidad de datos suficiente como para sacar conclusiones con mayor representatividad estadística, se han realizado 6 medidas de rugosidad del valor Rz en cada pared mecanizada (Figura 3.15).

Tal y como se ha comentado anteriormente, en el postprocesado de compuestos termoplásticos, la temperatura ocasionada durante el proceso puede generar defectos tales como la evaporación de la matriz o el deshilachado de las fibras. Por ello, haciendo uso del valor Rz se obtienen los 5 picos y valles más pronunciados de dicha sección, otorgando una mejor realidad sobre la superficie de un compuesto termoplástico reforzado con fibras donde los defectos comentados con anterioridad pueden influir en

la medición. De esta forma, las mediciones han sido tomadas en la pared lateral de la probeta, en el sentido de mecanizado (lado izquierdo de la ranura) y en la pared de sentido contrario al mecanizado (lado derecho de la ranura).

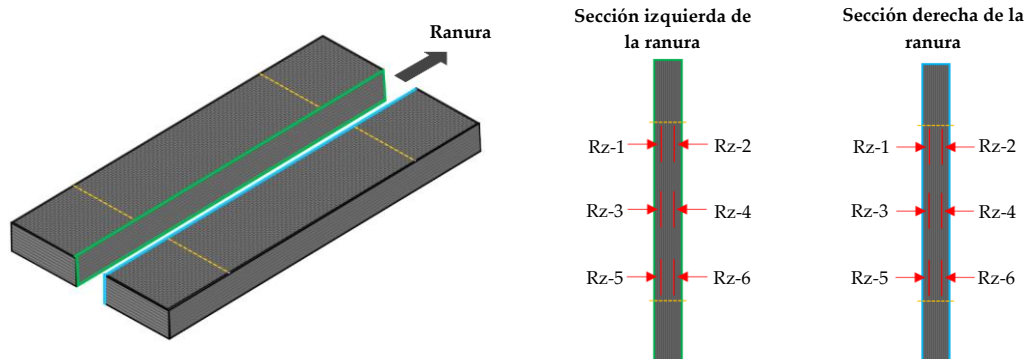


Figura 3.15. Disposición de las medidas del valor Rz en la sección del material

Por otro lado, un defecto en el mecanizado de materiales compuestos es la generación de deshilachado (Figura 3.16.a). Se han realizado macrografías de los diferentes deshilachados generados para cada herramienta en cada ranura. Para este propósito se ha hecho uso de técnicas SOM. Además, se han obtenido macrografías de la sección mecanizada por si hubiera algún indicio de delaminación interna del material o inicio de propagación de grieta (Figura 3.16.b).

3.4. Metodología experimental seguida para el postprocesado mediante chorro de agua

Como ya ha sido comentado en apartados anteriores, el postprocesado de CF RTPs presenta dificultades debido, sobre todo, a la naturaleza intrínseca del material y su efecto ante una temperatura de proceso elevada. Este es uno de los motivos principales por el que el otro proceso seleccionado para el corte de estos materiales es el chorro de agua con abrasivo. Al igual que para el mecanizado por fresado, para la realización de los experimentos y con el fin asegurar la repetitividad y reproducibilidad de los ensayos se ha desarrollado un método ordenado. El mecanizado por chorro de agua contempla una metodología de estructura similar a la mostrada en fresado.

En esta ocasión se desarrollarán cuatro apartados principales. El primero de ellos describe información sobre el equipo de corte empleado y las condiciones de corte seleccionados para llevar a cabo el experimento. En segundo lugar, se desarrolla un apartado correspondiente al mecanizado por chorro de agua en la Fase 1. Esta fase contempla el diseño y realización del mecanizado previo con el fin de conocer el comportamiento del material compuesto termoplástico frente al corte por chorro de agua con abrasivo.

En tercer lugar, se desarrolla un apartado que contempla el diseño y realización del postprocesado en la Fase 2. Tal y como se ha comentado anteriormente, debido al interés industrial del postproceso esta fase se desarrollará mediante el proceso de chorro de agua con abrasivo. En esta ocasión se profundizará en el material, analizando la influencia de los parámetros fundamentales del proceso en distintas configuraciones del compuesto.

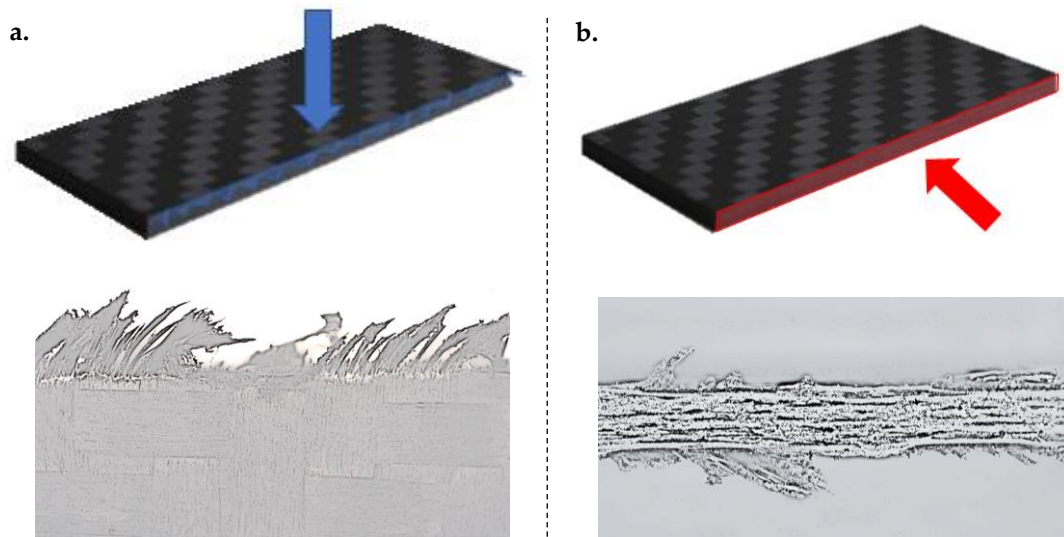


Figura 3.16. Orientación seguida para la obtención de macrografías correspondientes a: **a.** deshilachado (vista de planta superior); **b.** delaminaciones internas (vista del alzado de la sección mecanizada)

Por último, aunque no menos importante, en un cuarto apartado se desglosa la metodología generada para el análisis del postprocesado por chorro de agua con abrasivo en el compuesto termoplástico.

3.4.1. Selección de parámetros y realización de ensayos

Para la elaboración de esta parte del experimental se ha hecho uso de un equipo de chorro de agua con abrasivo de tres ejes (TCI Cutting, BP-C 3200) situado en el Taller Mecánico de la Escuela Superior de Ingeniería en la Universidad de Cádiz. El equipo consta con una bomba de presión (KMT, *Streamline* PRO-2 60) capaz de llegar a 6000 bar de presión. Cuenta con un cabezal que permite el desplazamiento en el eje Z y que está acoplado a un sistema de correas que permite el desplazamiento en el plano X e Y. El cabezal contiene una boquilla focalizadora de diámetro 0.8 y longitud de 94.7 mm. El equipo cuenta con un sistema automático de inserción de partículas abrasivas. Las partículas son de Granate Indio y tienen un tamaño de malla de 120 mesh.

Al igual que para el postprocesado mediante fresado, para chorro de agua la selección de los parámetros de corte ha sido estudiada mediante la literatura científica y

las limitaciones del equipo. Dentro de los parámetros más influyentes a la hora de efectuar el mecanizado, se ha decidido seleccionar como parámetro fijo la distancia de separación boquilla-pieza (*Stand-off distance*, SOD) la cual será fijada en 2.5 mm. Esto concuerda con lo realizado por otros autores en artículos científicos anteriores, los cuales han obtenido resultados muy adecuados manteniendo una distancia entre 2 y 3 mm [11–13]. Por otro lado, los parámetros: presión hidráulica, velocidad transversal y caudal de abrasivo; han sido los elegidos para ser modificados a lo largo del experimento. Al igual que para la distancia de separación boquilla-pieza, la elección de estos parámetros (Tabla 3.6) ha sido justificada mediante artículos científicos anteriores [12,14–17].

Tabla 3.6. Desglose de la configuración de parámetros de corte utilizados

Parámetro	Símbolo	Unidad	Valor		
Presión Hidráulica	P	bar	1200	2500	3400
Velocidad transversal	V	mm/min	100	300	500
Caudal de abrasivo	A	g/min	170	225	340
Distancia chorro pieza	SOD	mm	Fijada en 2.5		

Las trayectorias de mecanizado empleadas en esta tecnología son ranuras rectilíneas realizadas con el diámetro del chorro de agua (Figura 3.17). Las ranuras están diseñadas mediante el software *Lantek* correspondiente al equipo de chorro de agua utilizado. La separación entre cada ranura es de 8 mm. Esta distancia permite optimizar el material empleado en el experimento y, a su vez, es una distancia suficiente como para que el mecanizado de la ranura no afecte al estado de las ranuras anterior y posterior.

Con el fin de asegurar la perpendicularidad de cada corte en la pieza final mecanizada, se ha realizado un corte previo horizontal partiendo de la coordenada (0, 0). La longitud de cada ranura es de 15 mm. En cambio, el equipo de chorro de agua realizará el mecanizado 10 mm antes de entrar en contacto con el material. Este hecho permite que el chorro de agua estabilice los parámetros seleccionados (presión hidráulica, velocidad transversal, caudal de abrasivo) antes de entrar en contacto con el material. El número de ranuras y las combinaciones de parámetros elegidas para cada ranura se desglosará en los apartados 3.4.2 Diseño del postprocesado previo (Fase 1) y 3.4.3 Diseño del postprocesado final (Fase 2).

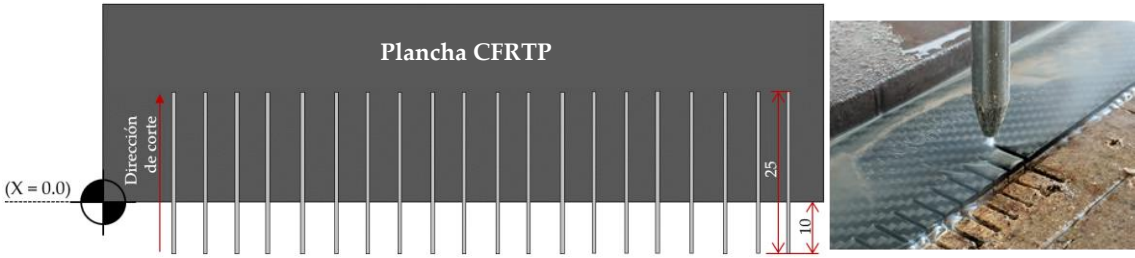


Figura 3.17. Diseño y disposición de las ranuras de mecanizado en la plancha de CF RTP

3.4.2. Diseño del postprocesado comparativo por chorro de agua con abrasivo

En este apartado se describe el diseño y configuración elegido para la realización de la Fase 1 mediante chorro de agua con abrasivo. Los parámetros de corte y el tipo de corte han sido explicados en apartados anteriores. No obstante, esta sección pretende explicar la distribución de los ensayos elegidos. Cabe recordar que los ensayos llevados a cabo en esta fase se ejecutan en la misma fibra (Fibra 1) que la utilizada para el fresado. En la Figura 3.18 se puede ver un diagrama de flujo de la metodología correspondiente al postprocesado por chorro de agua.

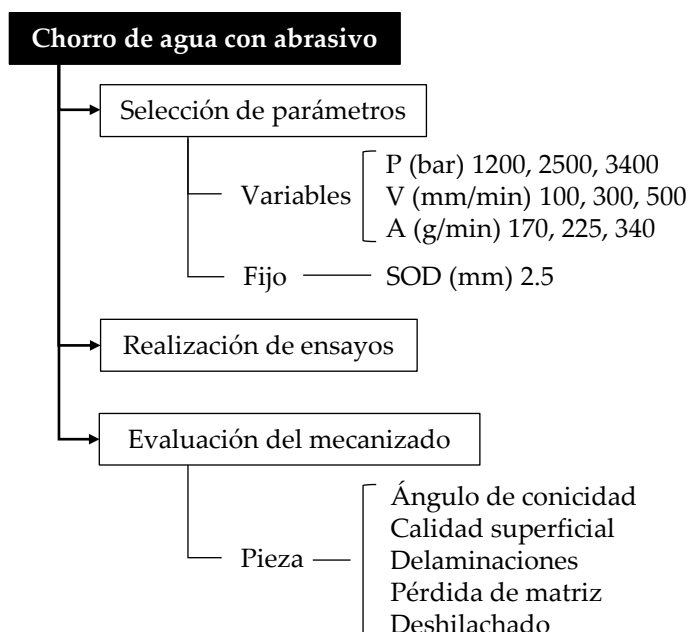


Figura 3.18. Diagrama de flujo de la metodología llevada a cabo para la realización del postprocesado por chorro de agua con abrasivo

Para llevar a cabo el experimental, se ha establecido una metodología de superficie de respuesta (RSM). Este tipo de metodología ya ha sido empleada por algunos autores en otros artículos científicos experimentales [12,23–25]. Se ha establecido un diseño compuesto centrado en las caras (DCF) con un total de 20 ensayos correspondientes a: 8 puntos factoriales 2^3 , 6 puntos axiales – 2×3 , y 6 puntos centrales. Este diseño se ha podido hacer efectivo gracias al software *Minitab*® 18. En la Tabla 3.7 se muestra de nuevo la configuración de parámetros empleados, esta vez añadiendo los valores -1, 0 y 1 correspondientes a los 3 niveles de la metodología de superficie de respuesta empleada.

Además, se ha realizado un diseño experimental complementario con un total de 12 ensayos, con el objetivo de validar los datos obtenidos con la metodología de superficie de respuesta. Este diseño complementario hace posible obtener el error generado entre los valores y confirmar la veracidad del modelo de superficie de

respuesta. La Figura 3.19 muestra la distribución de los 20 ensayos. Tal y como se comentó en apartados anteriores, se mecanizan ranuras realizadas con el diámetro del chorro de agua, separadas entre sí 8 mm.

Tabla 3.7. Desglose de la configuración de parámetros de corte utilizados (niveles del RSM incluidos)

Parámetro	Símbolo	Unidad	Nivel -1	Nivel 0	Nivel 1
Presión Hidráulica	P	bar	1200	2500	3400
Velocidad transversal	V	mm/min	100	300	500
Caudal de abrasivo	A	g/min	170	225	340
Distancia chorro pieza	SOD	mm	Fijada en 2.5		

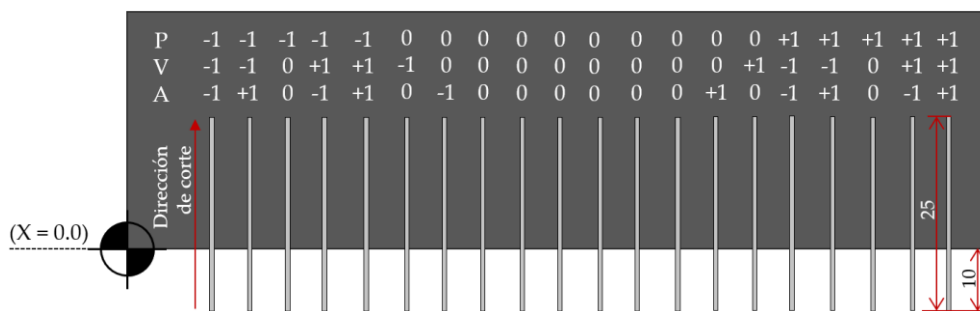


Figura 3.19. Esquema del diseño experimental del mecanizado CF RTP llevado a cabo por AWJM

Sobre la base de esta metodología, se ha desarrollado un análisis ANOVA para obtener la influencia estadística de los parámetros de entrada en las variables de salida. Además, el RSM permite generar diferentes diagramas de contorno a partir de la ecuación Ec. 3.3:

$$Y = C_0 + \sum_{i=1}^k C_i x_i + \sum_{i=1}^k C_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j}^k C_{ij} x_i x_j + \varepsilon \text{ (mm/min)} \quad \text{Ec. 3.3}$$

Donde Y corresponde a la variable de salida, siendo en esta ocasión el taper y la rugosidad medida, x_i corresponde a los parámetros empleados en el experimento (P, V, A), C_0 , C_i , C_{ii} , C_{ij} son los coeficientes de la regresión y ε es el error generado en el modelo.

Tras la realización de los ensayos, se analiza cuantitativamente la influencia de los parámetros de corte seleccionados en la generación de ángulo de conicidad y en la calidad superficial obtenida en términos de Ra. Con el fin de conseguir una representatividad estadística, el conjunto de ensayos se ha mecanizado 3 veces, obteniendo por tanto 3 probetas con las mismas ranuras de corte. Gracias a ello, se han obtenido 3 valores de ángulo de conicidad (T1, T2, T3) por cada ranura realizada en cada una de las probetas. Además, se han obtenido 3 valores de Ra (Ra1, Ra2, Ra3) por cada ranura en una única probeta, correspondientes a las 3 zonas características de una sección de corte: IDR, SCR y RCR; que se explicarán en profundidad posteriormente.

Además, se analizarán de forma cuantitativa todos los defectos posibles generados durante el postprocesado.

3.4.3. Diseño del postprocesado final

Como ya se ha comentado previamente, la Fase 2 de este trabajo se lleva a cabo mediante el postprocesado de chorro de agua con abrasivo, por ello en este apartado se describe el diseño y configuración de dicha fase. Para su ejecución, se hará uso de las 7 planchas de fibra de carbono termoplástica otorgadas por Nanotures S.L. El objetivo de esta fase es estudiar la influencia de los parámetros de corte empleados en AWJM en diversas configuraciones de CF RTP. Tal como ha sido comentado anteriormente, cada plancha está procesada mediante termoconformado, conociéndose las propiedades mecánicas otorgadas por Nanotures S.L. de cada una de las planchas (Tabla 3.2).

En cuanto a los parámetros de corte, se han tenido en cuenta los mismos parámetros que los tomados en el postprocesado comparativo (Tabla 3.6), resultando en un total de 27 ensayos realizados en cada una de las 7 planchas a mecanizar. No obstante, aunque se hayan realizado todos esos ensayos, tal y como será comentado en el Capítulo 4, los resultados de calidad superficial obtenidos en este experimento concuerdan con la discusión realizada en la Fase 1, en que el caudal de abrasivo es el parámetro menos influyente en la calidad superficial. Esta discusión será relevante para poder fijar el parámetro de caudal de abrasivo en 225 g/min y, por tanto, evaluar el ángulo de conicidad únicamente en los ensayos donde más influye dicha calidad (Tabla 3.8).

Tabla 3.8. Desglose de la configuración de parámetros empleados en la Fase 2

Parámetro	Símbolo	Unidad	Valores		
Presión Hidráulica	P	bar	1200	2500	3400
Velocidad transversal	V	mm/min	100	300	500
Caudal de abrasivo	A	g/min	Fijado en 225		
Distancia chorro pieza	SOD	mm	Fijada en 2.5		

Esto dará lugar a la medición del ángulo de conicidad en 9 ensayos resultantes mediante la combinación de presión hidráulica y velocidad transversal (Figura 3.20). Esta evaluación se repetirá en cada una de las 7 planchas de material compuesto termoplástico. En esta ocasión se mecaniza únicamente una probeta de cada plancha y, por ende, se obtiene un ángulo de conicidad por plancha designado como: Plancha A-T, Plancha B-T, Plancha C-T, Plancha D-T, etc. En cuanto a la calidad superficial, tras las discusiones llevadas a cabo en la Fase 1, se ha decidido tener en cuenta los parámetros de rugosidad Ra y Rz, con el fin de obtener una mayor cantidad de datos que puedan definir en mejor medida la calidad en la sección de corte. Para cada uno de los

parámetros se han realizado 3 mediciones correspondientes a cada una de las zonas de la sección de corte: IDR, SCR y RCR.

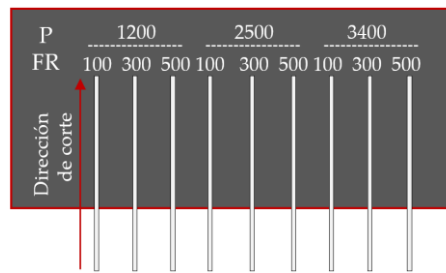


Figura 3.20. Esquema del diagrama de ranuras evaluadas en la Fase 2 del experimento

3.4.4. Protocolo de evaluación de los ensayos de chorro de agua con abrasivo

Tras la realización de los ensayos se procede a establecer un orden de evaluación de los resultados obtenidos que permita analizar los defectos generados. Tal y como se ha comentado, desde un punto de vista macroscópico se ha evaluado el ángulo de conicidad (taper) generado en la sección de corte, tanto en la pared izquierda como en la derecha de la ranura. Se ha procedido a la descripción de una metodología específica para la medición cuantitativa de este defecto que se explicará a continuación.

Por otro lado, tal y como se comentó en apartados anteriores un defecto intrínseco en el postprocesado de compuestos poliméricos son las delaminaciones internas creadas en la sección de corte. Por ello, han sido evaluadas las posibles delaminaciones internas por el impacto del chorro de agua, además del efecto de pérdida de matriz o deshilachado de las fibras. Todos estos defectos se han obtenido mediante técnicas SOM, realizando macrografías paralelas y perpendiculares a la sección de mecanizado (Figura 3.21).

Además, se ha hecho uso de técnicas SEM para evaluar a aumentos superiores los defectos originados. Por último, a nivel microscópico, se ha evaluado la calidad superficial a través del parámetro Ra y Rz en varios puntos a lo largo de la zona mecanizada.

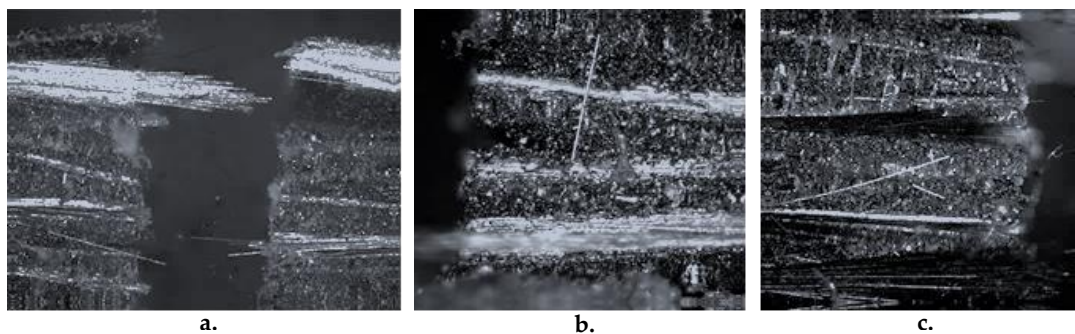


Figura 3.21. Macrografías con defectos obtenidos tras el mecanizado de la fibra: **a.** deshilachado; **b.** delaminación interna; **c.** pérdida de matriz

Metodología seguida para la obtención de la calidad superficial

De acuerdo con la literatura revisada [12,13,18], y tal y como se desarrolló en el Capítulo 2. Estado del arte, existen 3 zonas de diferente calidad superficial en la sección mecanizada por chorro de agua con abrasivo. Debido al bajo espesor del material compuesto y al igual que en la metodología descrita para las operaciones de fresado, se ha hecho uso de un utillaje (Figura 3.22) fabricado mediante un equipo de electroerosión por hilo (WEDM). Este utillaje es un paralelepípedo en el cual hay una ranura de espesor 2 mm. Esto permite encajar la fibra mecanizada en el utillaje de forma que quede en una posición transversal y así, asegurar el posicionamiento y evitar posibles vibraciones u holguras producidas durante la medición de la calidad superficial.

Las mediciones han sido realizadas en 3 puntos equidistantes de la sección, cada uno de ellos separados 0.4 mm. Estos desplazamientos tan pequeños han sido posibles gracias al goniómetro con el que cuenta la mesa de trabajo del rugosímetro utilizado. Tal y como se muestra en la Figura 3.22 los 3 puntos equidistantes corresponden a las zonas: entrada, central y salida; de la sección de corte, siguiendo por supuesto la dirección de impacto del chorro de agua.

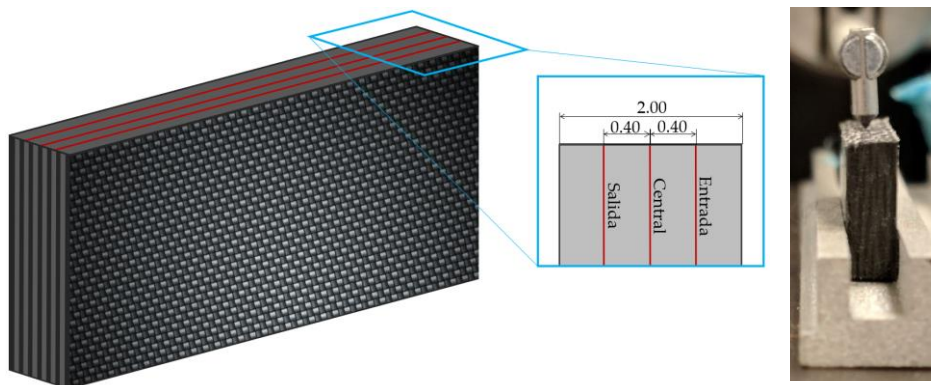


Figura 3.22. Metodología seguida para la medición de la calidad superficial

Metodología seguida para la obtención del defecto taper

Como ya se ha comentado anteriormente, el defecto conocido como taper o ángulo de conicidad es inherente a la naturaleza del proceso de corte por chorro de agua. El chorro al incidir en el material pierde parte de la energía cinética. Esto produce una disminución de la capacidad de corte, dando lugar a una geometría cónica conocida como taper [13,20]. En este trabajo se ha tenido en cuenta la separación entre las tres zonas generadas en la entrada del ranurado. De tal forma que para calcular el defecto taper se ha eliminado la zona inicial de daño (IDR) y la zona de desbaste (RCR), con el fin de analizar únicamente la zona central con el corte homogéneo (SCR). En la Figura 3.23 se muestra el procedimiento realizado de forma sintetizada.

En primer lugar, se realizan macrográficas de la entrada de cada ranura de corte. Mediante la realización de un tratamiento de dichas imágenes se eliminan las zonas superior e inferior de la ranura. Una vez eliminadas las zonas que no intervienen en el cálculo, se procede a generar 100 puntos a lo largo de toda la superficie central de corte (SCR), 100 puntos en el lateral izquierdo y otros 100 en el lateral derecho. A continuación, se realizan regresiones lineales que engloben los 100 puntos e intercepten con la altura 0 en el eje Y (cara inferior del CF RTP) y con la altura 2.0 mm en el eje Y (cara superior del CF RTP). Las intersecciones realizadas en ambas alturas permiten crear puntos de intersección que definen los factores geométricos: ancho superior A_s (mm) y ancho inferior A_i (mm); y, por ende, el ángulo de la pared izquierda α (°) y el ángulo de la pared derecha β (°). La suma de dichos ángulos da como resultado el ángulo taper (T).

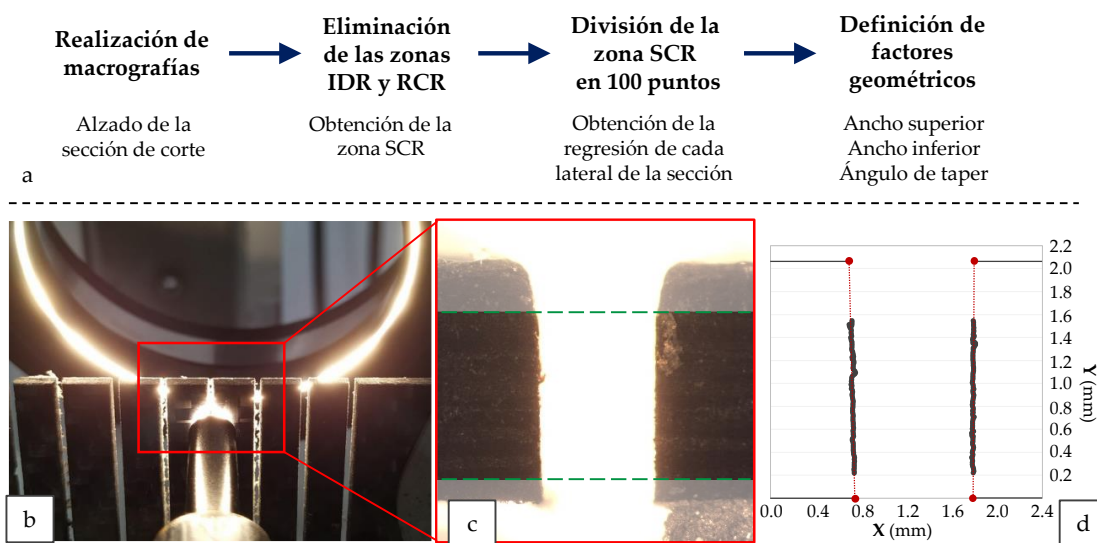


Figura 3.23. Procedimiento del cálculo de taper: **a.** Flujograma del procedimiento; **b.** posicionamiento de la ranura mecanizada en el microscopio estereoscópico; **c.** imagen de la ranura con la región de corte suave (SCR) remarcada; **d.** gráfico de los puntos obtenidos en la zona SCR interceptando en 0 y 2.0 mm

A continuación, se procede a matizar ciertos aspectos del procedimiento llevado a cabo para calcular el ángulo de conicidad. Se ha hecho uso del software *InkScape* para vectorizar las macrográficas obtenidas por el microscopio. Además, se ha utilizado el software *AutoCAD*® como programa de dibujo para modificar las imágenes vectorizadas. Por último, se ha realizado un tratamiento de cálculo: puntos obtenidos, regresiones, intersecciones y ecuaciones trigonométricas. Cabe señalar que cualquier software libre que permita el tratamiento de: imágenes, diseño o datos; es válido para la realización de esta metodología, siempre y cuando se contemplen los pasos seguidos.

Para una mayor comprensión se va a desarrollar un ejemplo de la metodología seguida, partiendo de la macrografía contemplada en la Figura 3.23.b. La imagen se inserta en el software *InkScape*. El programa permite vectorizar imágenes mediante varias opciones: corte por luminosidad, detección de bordes o cuantización de colores. Además, cada vectorización puede ser invertida si se desea (Figura 3.24).



Figura 3.24. Tipos de vectorización otorgadas por el software *InkScape*

La vectorización que mejor contraste de píxeles genera es la producida por el modo Corte de luminosidad. Esto tiene sentido ya que, ese modo actúa según el contraste de luces que haya en la imagen insertada. A la hora de realizar la macrografía en el microscopio hay que asegurarse, mediante luces externas (corona led, luces telescópicas) que se genere un contraste entre la superficie del material y el canal de corte. Lo cual, como se puede ver en la Figura 3.23.b. se consigue adecuadamente.

Una vez vectorizada la imagen se introduce en el software *AutoCAD*®. El objetivo en este programa es eliminar los puntos de la imagen vectorizada que se encuentren en la zona inicial de daño IDR y la zona inferior RCR. Para ello, mediante ensayos experimentales previos realizados en chorro de agua con abrasivo, y tal y como se discutirá en el Capítulo 4, se estudió como la zona inicial de daño se propaga hasta un 20% de la vertical y la zona inferior en torno al 5% desde la base del CF RTP.

La estabilización de los parámetros de corte seleccionados para realizar el mecanizado es uno de los factores más influyentes de cara a que el chorro de agua penetre en el material con las condiciones programadas en el diseño. Además, la energía cinética del chorro impactando y atravesando la sección de corte, ocasiona las imperfecciones y delaminaciones en las últimas capas del material. Con el fin de asegurar la eliminación de las zonas IDR y RCR, se sobredimensionan estas medidas, quedando comprendida la zona que interesa entre el 10 y el 75% del espesor del material (Figura 3.25).

Una vez introducida la imagen vectorizada en *AutoCAD*®, se procede a seguir las siguientes operaciones: alinear, referenciar, escalar, recortar zonas IDR y SCR y obtener puntos.

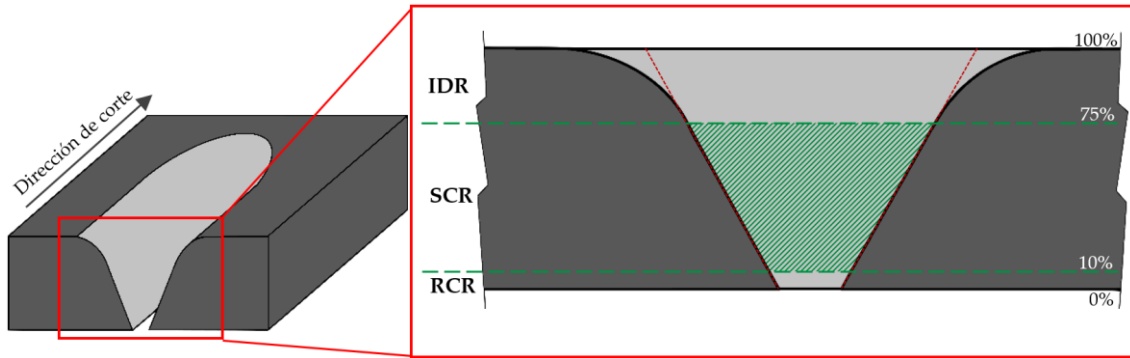


Figura 3.25. Distinción de las zonas IDR, SCR y RCR en porcentajes

En un primer paso, hay que alinear la imagen introducida ya que, no se puede asegurar la horizontalidad de dicha imagen. Para ello es necesario crear una línea horizontal y hacer que la cara superior del material coincida con dicha línea (Figura 3.26.a). Posteriormente, es necesario crear una línea vertical desde la cara superior hasta la inferior del material. Esta línea sirve para hallar un punto de intersección entre ella misma y la horizontal inferior del material. Ese punto se podrá situar en el origen y así, habrá conocimiento de las coordenadas X e Y de todos los puntos que conforman el dibujo. Además, se debe acotar la línea vertical para saber el tamaño del espesor que tiene actualmente el dibujo (Figura 3.26.b).

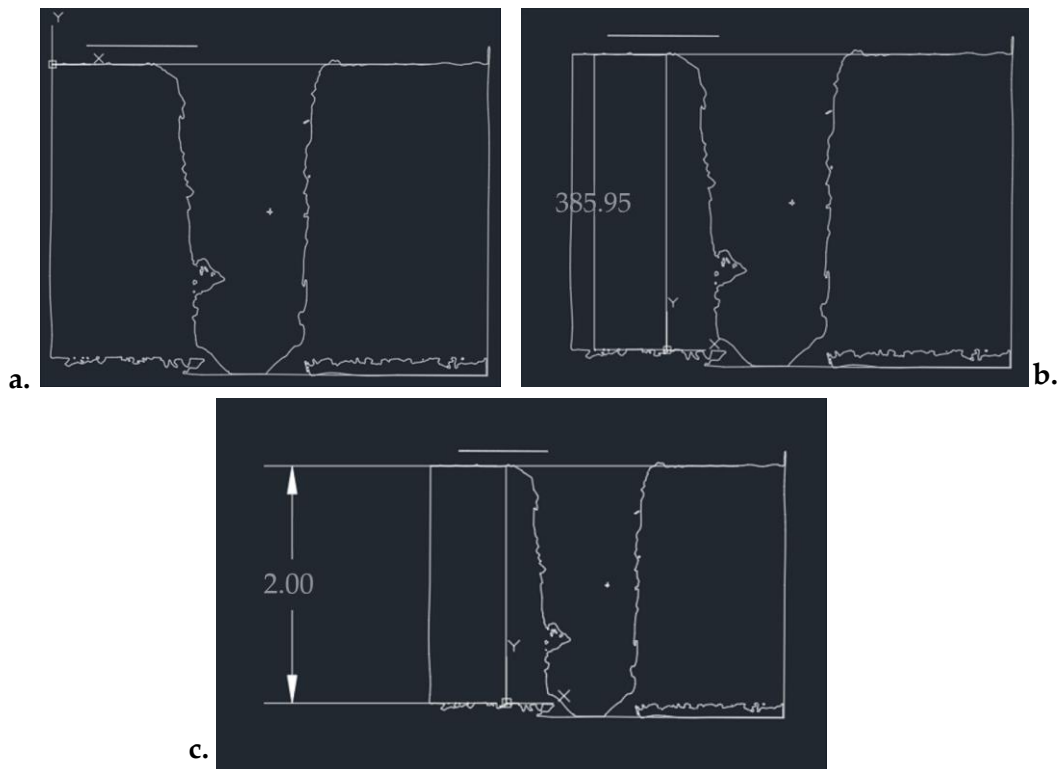


Figura 3.26. a. Alineamiento de la imagen; b. Establecimiento de un punto conocido en el origen; c. Escala de la imagen

Una vez situado el dibujo en el origen del plano, se procede a escalarlo. Es necesario realizar el escalado debido a que cuando la imagen se introduce en el software, no se conocen las dimensiones con las que se ha insertado. Al conocer la cota que tiene la línea vertical (385.95 mm) se puede aplicar un factor de escala para hacer que la cota coincida con el espesor de nuestro material (2.00 mm).

El siguiente paso será dibujar dos líneas horizontales que separen las tres zonas afectadas durante el mecanizado. Se dibuja una primera línea situada al 10% del espesor desde la base y otra línea al 75% del espesor desde la base (líneas de color rojo en la Figura 3.27.a). Empleando esas líneas como elementos de recorte, se deben eliminar todas las geometrías que no pertenezcan a la zona de corte suave. Tras eliminar todo lo inservible deberían quedar dos geometrías (Figura 3.27.b): la de la izquierda perteneciente al ángulo izquierdo de la ranura, la de la derecha al ángulo derecho de la misma.

Tal y como se observa en la Figura 3.27.a hay una zona del lateral izquierdo en la zona de corte suave, que no aparece en el lateral izquierdo de la Figura 3.27.b. Tras el mecanizado, en el canal de corte se pueden generar defectos que interfieran en la macrografía realizada con el microscopio. En este caso, se ha elegido este ejemplo para dejar claro que no todas las fotografías realizadas se encuentran en perfecto estado.

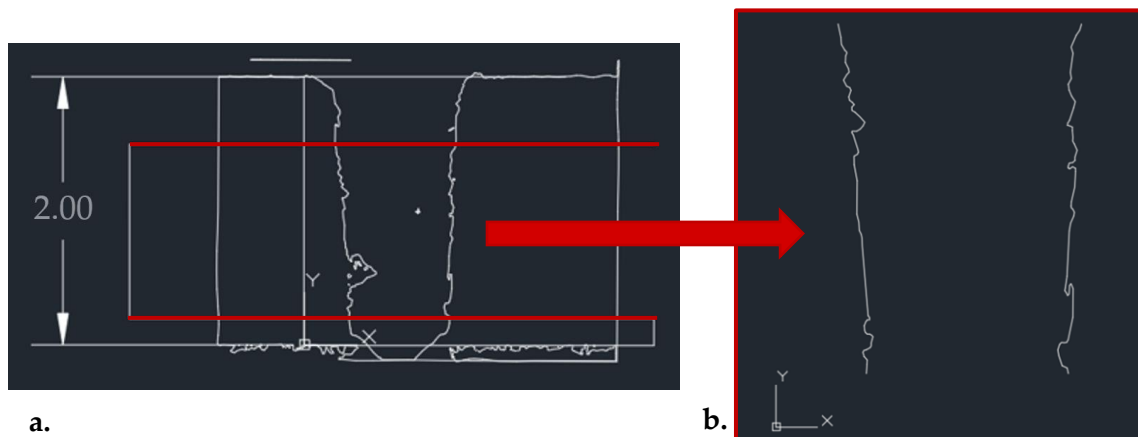


Figura 3.27. a. Creación de líneas que separan las distintas zonas; b. Puntos pertenecientes a la zona suave de corte SCR

En el lateral izquierdo había un fragmento de matriz termoplástica no desprendida del material. Este defecto, junto a otros que también pueden interferir en la medición del taper como el deshilachado de las fibras, se elimina al llegar a este punto de la metodología del taper. Así, tras eliminar el defecto se unen los puntos para formar un lateral continuo, obteniendo el perfil visualizado en la Figura 3.27.b.

Por último, en lo que a AutoCAD® se refiere, hay que dividir las líneas que conforman cada lateral de la ranura en el número de puntos que se desee. Se han hecho pruebas previas a la metodología donde se dividía el segmento en 20 puntos, 100 y 200.

Los resultados obtenidos con un segmento formado por 100 puntos son más exactos que los obtenidos por 20 puntos. Además, no hay diferencia notoria entre trabajar con 100 puntos o con 200. Por ello, para no sobrecargar la hoja de cálculo con 200 coordenadas diferentes por cada ranura de corte realizada, se ha decidido trabajar con 100 puntos (Figura 3.28). Esos puntos son extraídos del software con formato de tabla de coordenadas X e Y para ser introducidos en la hoja de cálculo.

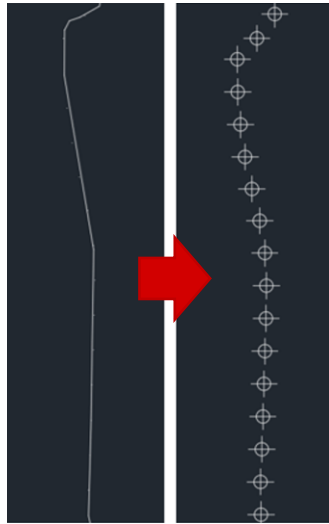


Figura 3.28. División de cada segmento en 100 puntos

La mayoría de pasos realizados en dicho software se encuentran automatizados de tal forma que se inserta la imagen vectorizada y se activan una serie de macros que realizan toda la metodología, a excepción de una única operación que hay que realizar manualmente. Por último, en la hoja de cálculo, los datos se ordenan en función a sus coordenadas. Se realizan las regresiones lineales del lateral izquierdo y derecho, las intersecciones con la altura 0 mm y la altura 2.00 mm (espesor, t) y los cálculos trigonométricos necesarios para hallar el ancho inferior (A_i) y superior (A_s), y los ángulos α ($^\circ$), β ($^\circ$) y el taper total, T ($^\circ$), mediante la ecuación Ec. 3.4. Las operaciones en la hoja de cálculo también se encuentran automatizadas de manera que abriendo el conjunto de datos extraídos de AutoCAD® y, activando las macros correspondientes se generen los resultados automáticamente.

$$T \text{ (}^\circ\text{)} = 2 \cdot \operatorname{atan}\left(\frac{\frac{A_s - A_i}{2}}{t}\right) \quad \text{Ec. 3.4}$$

3.5. Conclusiones

En este capítulo se ha descrito la metodología experimental establecida para la realización de este trabajo. Esta descripción incluye, además, los procedimientos seguidos, abordando aspectos básicos como el material empleado, procesos, parámetros

y caracterización y cuantificación de defectos generados. El objetivo principal de este trabajo es el estudio y análisis del postprocesado de materiales compuestos con matriz de poliuretano termoplástico reforzado con fibras de carbono (CF RTP). De este modo, se debe evaluar el comportamiento frente a diversas tecnologías a partir de los ensayos diseñados para cumplir dicho objetivo.

Para un mejor entendimiento del capítulo, la metodología se ha desarrollado en dos fases. La primera de ellas, Fase 1, realiza un estudio comparativo de los postprocesados mediante fresado y chorro de agua con abrasivo, con el fin de conocer la idoneidad de cada proceso en la misma plancha de material. Por otro lado, debido al interés industrial de la tecnología, la Fase 2 contempla una ampliación del postprocesado de chorro de agua con abrasivo, profundizando en el material y diversas disposiciones del refuerzo y la resina que ocasionan un porcentaje diferente entre ellos.

Todo ello se realiza posterior a una caracterización del material elaborada tras la recepción del mismo. De dicho procedimiento se han obtenido propiedades de los materiales de gran importancia para la evaluación de los postprocesados. Entre ellas, tal y como ha sido comentado anteriormente, destaca la resina termoplástica de poliuretano con una temperatura de transición vítrea de 145°C. Además, el refuerzo empleado es fibra de carbono con un espesor de fibras de 0.25 mm. Como resultado, tras el apilado de ambos materiales en un total de 7 capas, se genera mediante termoconformado, el CF RTP empleado en el experimento, con un espesor total de 2.08 mm. Este proceso se ha repetido variando el porcentaje de fibra y resina empleado en cada conformado, dando lugar a 1 + 7 planchas de CF RTP con diferentes propiedades mecánicas.

Debido a ello, ha sido necesario comparar los porcentajes iniciales de fibra y resina empleados en el conformado con los porcentajes obtenidos tras el conformado del compuesto. Para lograr este objetivo se ha hecho uso de la norma UNE-EN 2559/1997: Determinación de los contenidos de resina y fibra de la masa de fibra por unidad de superficie; donde, se ha hecho uso del método A: determinación del contenido en fibra y resina en porcentaje de masa. Este método emplea ácido sulfúrico como reactivo para disolver la resina del material compuesto, consiguiendo obtener en forma de masa, el porcentaje de fibras de carbono empleado. La metodología seguida para el cálculo de este porcentaje ha sido desarrollada minuciosamente, obteniéndose un error de porcentaje de 3.84% entre la fibra empleada para el conformado y la fibra obtenida tras el cálculo. Debido a ello, se concluye que la metodología seguida para la obtención del porcentaje ha otorgado resultados satisfactorios, considerando además, que el material compuesto fabricado es estable a lo largo de su superficie.

Por otro lado, el desarrollo de la Fase 1, ha comenzado por el postprocesado mediante fresado. Tal y como se vio en capítulos anteriores, la geometría de la herramienta es una de los parámetros principales en la generación de defectos en un

material compuesto polimérico. Por ello, se han establecido 5 tipos de geometría de herramienta diferente, las cuales tienen un diámetro de 6 mm. Las diferencias principales entre ellas se ven expuestas en el número de dientes que la conforman, contemplando desde 2 a 11 dientes; y su ángulo de hélice entre -10° y 30° .

Se ha hecho uso de un centro de mecanizado de 5 ejes para llevar a cabo el experimento, el cual pretende evaluar el comportamiento del material frente a trayectorias rectilíneas generadas en el mismo. Para ello, se ha hecho uso de un utillaje específico capaz de sujetar el material otorgando un gap de 2 mm de la herramienta con ambas paredes del utillaje. Diferentes combinaciones de parámetros se han establecido para el postprocesado mediante fresado alternando valores de velocidad de corte y velocidad de avance del cabezal.

Con el fin de evaluar los ensayos llevados a cabo, se ha establecido un protocolo de evaluación que permita caracterizar las herramientas y piezas mecanizadas. Para ello, se ha hecho uso de técnicas de microscopía estereoscópica (SOM) y microscopía electrónica de barrido (SEM), además de técnicas para la obtención de la calidad superficial en la superficie generada. Las macrográficas realizadas tras cada combinación de parámetros de corte, expondrán posibles mecanismos de desgaste generados en la herramienta, así como defectos macroscópicos y microscópicos tales como, delaminaciones en la intercara, deshilachado de fibras y pérdida de matriz. Por otro lado, la calidad superficial se ha evaluado mediante el parámetro R_z el cual permite obtener una mayor información del perfil generado en la sección de corte. Para ello y, con el fin de conseguir representatividad estadística, se han realizado 6 mediciones en cada pared de la sección mecanizada.

Por otro lado, se ha presentado la metodología seguida para el análisis del postprocesado mediante chorro de agua con abrasivo. Se han establecido diferentes combinaciones de parámetros entre presión hidráulica, velocidad de avance y caudal de abrasivo para realizar los ensayos. Las trayectorias de mecanizado vuelven a ser rectilíneas con el fin de poder comparar las tecnologías empleadas de la mejor manera posible.

Para llevar a cabo el experimento desarrollado en la Fase 1, se ha establecido una metodología de superficie de respuesta (RSM) con un total de 20 ensayos que será posteriormente corroborada mediante 12 ensayos extras. Sobre la base de esta metodología, se ha desarrollado un análisis ANOVA para obtener la influencia de los parámetros de entrada en las variables de salida. De nuevo, con el fin de conseguir una representatividad estadística, el conjunto de ensayos se ha mecanizado 3 veces, obteniendo por tanto 3 probetas con las mismas ranuras de corte. Gracias a ello, se han obtenido 3 valores de ángulo de conicidad por cada ranura realizada en cada una de las probetas y 3 valores de R_a por cada ranura en una única probeta.

Por otro lado, en el experimento desarrollado en la Fase 2, se han realizado un total de 27 ensayos combinando 3 presiones hidráulicas, 3 velocidades de avance y 3 caudales de abrasivo en cada una de las 7 planchas a mecanizar. No obstante, tal y como será discutido en capítulos posteriores, para el estudio de la calidad superficial en términos de R_a y R_z , el caudal de abrasivo es el parámetro menos influyente en los resultados generados. Por ello, se ha fijado el caudal de abrasivo en 225 g/min. Esto ha provocado que el ángulo de conicidad se haya evaluado únicamente en los ensayos donde más influye la calidad superficial, resultando en un total de 9 ensayos por cada una de las 7 planchas mecanizadas.

Para una correcta evaluación de los ensayos por chorro de agua tanto de la Fase 1, como de la Fase 2, se ha desarrollado un protocolo de evaluación donde se desglosan diferentes aspectos de gran relevancia para la obtención de defectos macro y microscópicos. Al igual que en el postprocesado mediante fresado se ha hecho uso de técnicas SOM y SEM para exponer posibles defectos generados en el material tales como, delaminaciones internas, deshilachado de fibras o pérdida de matriz.

Para la obtención de la calidad superficial, ya sea en términos de R_a o R_z , se han realizado 3 mediciones equidistantes a lo largo de la superficie de corte distanciadas 0.4 mm entre sí. Estas mediciones concuerdan con las zonas de entrada, intermedia y salida de la sección de corte (IDR, SCR, RCR).

Por último, debido a discrepancias encontradas en la literatura revisada de acuerdo al método de evaluar en ángulo de conicidad, se ha establecido una metodología para la obtención de dicho defecto, la cual comienza con la realización de macrografías de la sección de corte. Tal y como se ha podido comprobar anteriormente, el ángulo de conicidad es un defecto característico de la zona de daño suave, ubicada en la región intermedia de la sección de corte. Por ello, mediante un software de vectorización de imágenes se han eliminado las zonas de entrada y salida (IDR y RCR) para la medición de este defecto. Una vez aislado el tramo central se procede al tratamiento de la imagen para generar la división de dicho tramo en 100 puntos, tanto en la pared izquierda como en la derecha de la sección de corte. Por último, estos puntos darán lugar a una regresión lineal capaz de generar, mediante ecuaciones establecidas anteriormente, el ángulo de conicidad obtenido.

Como conclusión final, se ha establecido una cautelosa metodología para el desarrollo del postprocesado de materiales compuestos de resina termoplástica reforzados con fibras. Los protocolos generados implican al material empleado en el experimento, a los parámetros usados para cada tecnología y a la evaluación de defectos obtenidos tras los ensayos realizados.

3.6. Referencias

- [1] P. Masek, P. Zeman, P. Kolar, Development of a cutting tool for composites with thermoplastic matriz, *MM Sci. J.* October (2013) 422–427. https://doi.org/10.17973/MMSJ.2013_10_201312.
- [2] P. Masek, P. Kolar, P. Zeman, Optimization of trimming operations for machining carbon fibre reinforced thermoplastic composite, in: *Int. Conf. Adv. Manuf. Eng. Technol. Optim.*, 2013.
- [3] V. Franke, Drilling of long fiber reinforced thermoplastics - Influence of the cutting edge on the machining results, *CIRP Ann. - Manuf. Technol.* 60 (2011) 65–68. <https://doi.org/10.1016/J.CIRP.2011.03.078>.
- [4] UNE-EN 2559/1997, Determinación de los contenidos de resina y fibra de la masa de fibra por unidad de superficie, 1997.
- [5] P. Masek, P. Zeman, P. Kolar, Technology optimization of PPS/C composite milling using Taguchi method, in: *9th Int. Conf. Mach. Tools, Autom. Technol. Robot.*, 2012: p. 8.
- [6] P. Masek, P. Zeman, P. Kolar, F. Holesovsky, Edge trimming of C/PPS plates, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 101 (2019) 157–170. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2857-1>.
- [7] P. Kolar, P. Masek, P. Zeman, Milling tools for cutting of fiber-reinforced plastic, *J. Mach. Eng.* 14 (2014) 93–103.
- [8] J. Xu, M. Ji, P. Davim, M. Chen, M. El Mansori, V. Krishnaraj, Comparative study of minimum quantity lubrication and dry drilling of CFRP/titanium stacks using TiAlN and diamond coated drills, *Compos. Struct.* 234 (2020) 111727. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111727>.
- [9] F.-J. Wang, J.-B. Yan, M. Zhao, D. Wang, X.-N. Wang, J.-X. Hao, Surface damage reduction of dry milling carbon fiber reinforced plastic/polymer using left-right edge milling tool, *J. Reinf. Plast. Compos.* 39 (2020) 409–421. <https://doi.org/doi.org/10.1177/0731684420912018>.
- [10] D. Kumar, S. Gururaja, Machining damage and surface integrity evaluation during milling of UD-CFRP laminates: Dry vs cryogenic, *Compos. Struct.* 247 (2020) 112504. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112504>.
- [11] P.F. Mayuet, F. Girot, A. Lamíkiz, S.R. Fernández-Vidal, J. Salguero, M. Marcos, SOM/SEM based characterization of internal delaminations of CFRP samples machined by AWJM, *Procedia Eng.* 132 (2015) 693–700. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.549>.
- [12] I. Wong MM, A. Azmi, C. Lee, A. Mansor, Kerf taper and delamination damage minimization of FRP hybrid composites under abrasive water-jet machining, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 94 (2018) 1727–1744. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9669-y>.

- [13] R. Ruiz-Garcia, P.F. Mayuet Ares, J.M. Vazquez-Martinez, J. Salguero, Influence of abrasive waterjet parameters on the cutting and drilling of CFRP/UNS A97075 and UNS A97075/CFRP stacks, *Materials* (Basel). 12 (2018) 107. <https://doi.org/10.3390/ma12010107>.
- [14] M. El-Hofy, M.O. Helmy, G. Escobar-Palafox, K. Kerrigan, R. Scaife, H. El-Hofy, Abrasive water jet machining of multidirectional CFRP laminates, *Procedia CIRP*. 68 (2018) 535–540. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.12.109>.
- [15] R. Pahuja, M. Ramulu, M. Hashish, Surface quality and kerf width prediction in abrasive water jet machining of metal-composite stacks, *Compos. Part B Eng.* 175 (2019) 107134. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107134>.
- [16] V. Gupta, P.M. Pandey, M.P. Garg, R. Khanna, N.K. Batra, Minimization of kerf taper angle and kerf width using Taguchi's method in abrasive water jet machining of marble, *Procedia Mater. Sci.* 6 (2014) 140–149. <https://doi.org/doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.017>.
- [17] M. Li, M. Huang, Y. Chen, P. Gong, X. Yang, Effects of processing parameters on kerf characteristics and surface integrity following abrasive waterjet slotting of Ti6Al4V/CFRP stacks, *J. Manuf. Process.* 42 (2019) 82–95. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.04.024>.
- [18] D.K. Kalla, P.S. Dhanasekaran, B. Zhang, R. Asmatulu, Abrasive waterjet machining of fiber reinforced composites: A review, *AIP Conf. Proc.* 1431 (2012) 535–542. <https://doi.org/10.1063/1.4707606>.
- [19] Norma UNE-EN ISO 4288:1998, Especificación geométrica de producto (GPS). Calidad superficial: Método del perfil. Reglas y procedimientos para la evaluación del estado superficial, (ISO 4288:1996), 1998.
- [20] S. Vigneshwaran, M. Uthayakumar, V. Arumugaprabu, Abrasive water jet machining of fiber-reinforced composite materials, *J. Reinf. Plast. Compos.* 37 (2018) 230–237. <https://doi.org/10.1177/0731684417740771>.
- [21] R. Pahuja, M. Ramulu, M. Hashish, Abrasive waterjet profile cutting of thick titanium/graphite fiber metal laminate, in: *ASME Int. Mech. Eng. Congr. Expo. Proc.*, 2017: pp. 1–11.
- [22] M. Ramulu, R. Pahuja, M. Hashish, V. Isvilonanda, Abrasive waterjet machining effects on kerf quality in thin fiber metal laminate, in: *2015 WJTA-IMCA Conf. Expo*, 2015: p. 13.
- [23] A. Dhanawade, S. Kumar, Experimental study of delamination and kerf geometry of carbon epoxy composite machined by abrasive water jet, *J. Compos. Mater.* 51 (2017) 3373–3390. <https://doi.org/10.1177/0021998316688950>.
- [24] A. Sambruno, F. Bañón, J. Salguero, B. Simonet, M. Batista, Kerf taper defect minimization based on abrasive waterjet machining of low thickness thermoplastic carbon fiber composites C/TPU, *Materials* (Basel). 12 (2019) 4192. <https://doi.org/10.3390/ma12244192>.

- [25] F. Bañon, A. Sambruno, M. Batista, B. Simonet, J. Salguero, Study of the surface quality of carbon fiber-reinforced thermoplastic matrix composite (CF RTP) machined by abrasive waterjet (AWJM), *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 107 (2020) 3299–3313. <https://doi.org/doi.org/10.1007/s00170-020-05215-y>.

Análisis, evaluación y propuesta de mejora del rendimiento del mecanizado de materiales compuestos de naturaleza termoplástica CF RTP

Capítulo 4

Resultados

Tesis Doctoral

Alejandro Sambruno Ladrón de Guevara

Capítulo 4. Resultados

4.1. Introducción

En este capítulo se presentan y discuten los resultados obtenidos a partir de las diferentes fases y etapas experimentales descritas en el Capítulo 3. Siguiendo el orden marcado en dicho capítulo (Figura 4.1), la secuencia de presentación de resultados se iniciará con lo obtenido en el estudio del postprocesado mediante fresado -más concretamente mediante fresado periférico o de contornos- de la Fase 1 para, posteriormente, mostrar los resultados del estudio del postprocesado por chorro de agua con abrasivo de la Fase 1. Tras esta muestra de resultados se hará una discusión sobre los experimentos realizados y sus ventajas frente a distintas ramas del rendimiento del proceso.

Tras esta discusión comienza el desarrollo de resultados para la Fase 2 en la cual, tal y como se ha comentado, se analiza el postprocesado por chorro de agua con abrasivo de 7 planchas de material compuesto termoplástico reforzado con fibras de carbono con diversas configuraciones de material.

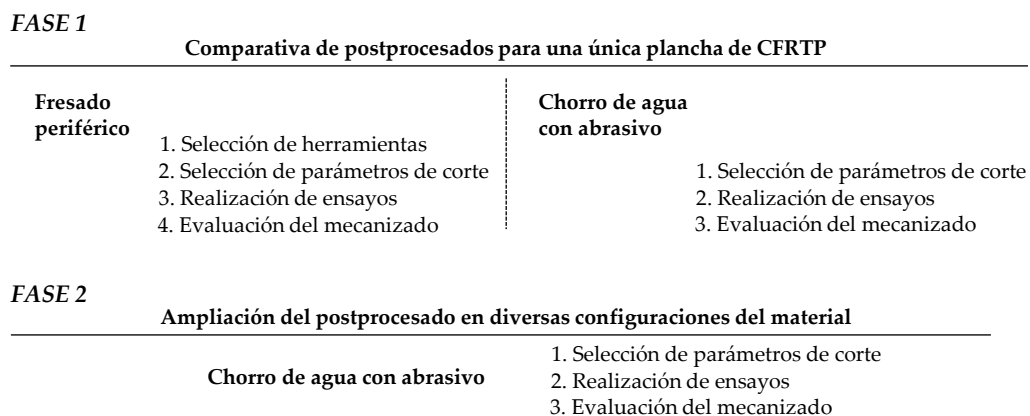


Figura 4.1. Diagrama de la metodología desarrollada en este trabajo

4.2. Análisis del postprocesado mediante fresado periférico en CF RTP

En este apartado se analizarán las calidades y defectos obtenidos tras el postprocesado de materiales compuestos de naturaleza termoplástica (CF RTP) por

fresado periférico. En primer lugar, se desea encontrar una herramienta de corte que minimice los defectos obtenidos tras el mecanizado. Para lograr este objetivo, tal y como se comentó en capítulos anteriores, el análisis se enfocará en el estudio de la calidad superficial obtenida tras el fresado periférico en términos de R_z . Además, se utilizarán macrografías de defectos como la rebaba en forma de deshilachado o las delaminaciones internas del material compuesto para contrastar la información cuantitativa obtenida en el estudio de la calidad superficial. Finalmente se desarrollará un último apartado con las conclusiones generales que engloben el análisis de todos los resultados previamente discutidos.

4.2.1. Análisis de la calidad superficial obtenida en el fresado periférico

Tal y como ha sido comentado, el parámetro R_z indica los valores medios entre las cinco crestas más altas del perfil de rugosidad y los cinco valles más bajos del perfil, dentro de la longitud básica. Se ha hecho uso de este parámetro para la evaluación de los datos obtenidos (Tabla 4.1) debido a que contiene más información del perfil evaluado y, por ende, puede llegar a ser más preciso que el parámetro rugosidad media aritmética (R_a). Esto se demuestra en numerosos artículos científicos donde, en el fresado de materiales compuestos y de apilados material compuesto/aleación metálica, se hace uso del parámetro R_z para evaluar los resultados de la operación realizada [1–3]. Tal y como se muestra en la Tabla 4.1 se puede observar cómo los valores de R_z obtenidos para el fresado a favor y el fresado en oposición aparecen en columnas diferentes. En general, los valores obtenidos con la estrategia de fresado en oposición son mucho más altos que los del fresado a favor. Esto tiene sentido debido a que, en oposición, hay una fuerza menor cuando el diente de la herramienta golpea el material. Este fenómeno en las aleaciones metálicas puede ser favorable, pero para los materiales compuestos una menor fuerza de corte puede hacer que las fibras se deformen, pero no se rompan (Figura 4.2.a), lo cual puede dar lugar a una menor calidad superficial final obtenida durante el mecanizado, lo que se refleja en los valores de la tabla. Estos resultados son coherentes con otros estudios, en los que diferentes autores observan un mejor mecanizado en CFRP siguiendo la estrategia de fresado ascendente o a favor [4–6]. Además, el defecto de arranque de fibras aparece en mayor medida en el lado derecho de la ranura, es decir, con la estrategia de fresado en oposición (Figura 4.2.b).

Por ejemplo, en la herramienta convencional (tipo A), aparecen valores entre 16.42 y 26.00 μm en el fresado a favor. Por otro lado, la variable R_z alcanza valores de hasta 57.11 μm en oposición, por lo que el empeoramiento de la calidad superficial se duplica si se comparan las dos estrategias de mecanizado. El mismo fenómeno se produce con el resto de las herramientas utilizadas en este experimento. Por lo tanto, parece que para el rendimiento funcional del fresado periférico de CF RTP, mantener una

estrategia de fresado a favor proporciona una mayor calidad superficial y menores deshilachados de las fibras.

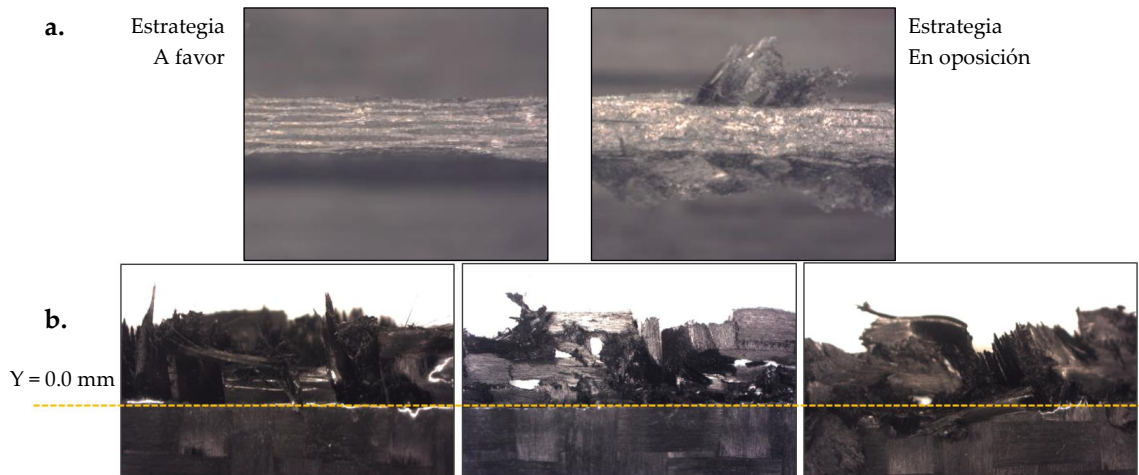


Figura 4.2. a. Inspección visual de la ranura de corte: estrategia a favor; estrategia en oposición; b. Defecto de deshilachado de la fibra generado en las piezas mecanizadas en oposición

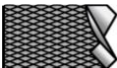
De forma general, si se echa un vistazo a los valores obtenidos en el postprocesados, el mayor valor de R_z lo genera la herramienta pulverizadora (tipo B) en 1000 rpm y 0.05 mm/diente, siendo $115.14 \mu\text{m}$, aunque la herramienta híbrida de hélice 0° (tipo D) también produce un valor muy alto de $103.44 \mu\text{m}$ a 1000 rpm y 0.03 mm/diente. Además, la mejor calidad superficial se da en la herramienta A con valores como $16.42 - 16.57 \mu\text{m}$. Uno de los objetivos de este experimento es conseguir una buena calidad superficial en el postprocesado mediante fresado del CF RTP, por ello, después de la discusión anterior se ha decidido analizar en detalle sólo los valores de R_z que siguen una estrategia a favor del mecanizado, ya que, son los valores más pequeños y, por ende, los que otorgan una mayor calidad superficial a la ranura.

Es por ello que la Figura 4.3 muestra los valores de R_z para el mecanizado del compuesto termoplástico siguiendo la estrategia de fresado a favor. El color de cada barra mostrada en el gráfico representa los 6 ensayos correspondientes a cada herramienta. De esta forma, se puede observar cómo, tal y como se ha comentado anteriormente, los valores más bajos de R_z los adquiere la herramienta A. Esta herramienta es la que tiene el mayor canal de evacuación de todas las herramientas empleadas, lo cual tiene gran relevancia ya que, la evacuación de la viruta es uno de los aspectos más relevantes en el mecanizado de materiales compuestos.

Como se ha mencionado en otros estudios [7,8], un canal de evacuación de viruta más pequeño podría provocar que la viruta se atascara en la herramienta, causando un aumento de las fuerzas de corte generadas durante el mecanizado. El CF RTP utilizado en este artículo tiene una baja temperatura de transición vítrea y, por tanto, el material se puede ver afectado por la temperatura provocada durante el proceso de mecanizado,

llegando a fundirse la matriz del compuesto y a adherirse las partículas de fibra de carbono que se desprenden durante el mecanizado. Esto significa que la viruta generada necesita suficiente espacio para ser evacuada y no interferir en la calidad superficial final del material compuesto.

Tabla 4.1. Valores de Rz obtenidos en el fresado periférico de CF RTP

Herramienta	Ensayo	Velocidad de corte V_c [rpm]	Avance por diente V_f [mm/tooth]	Rz Medio ¹ (a favor) [$\mu\text{m} \pm \mu\text{m}$]	Rz Medio ¹ (en oposición) [$\mu\text{m} \pm \mu\text{m}$]
A Convencional 	1	1000	0.03	17.71 $\pm$ 4.10	45.31 $\pm$ 23.70
	2	1000	0.05	24.53 $\pm$ 3.85	51.38 $\pm$ 21.25
	3	1000	0.07	16.57 $\pm$ 4.71	33.51 $\pm$ 16.15
	4	3000	0.03	16.42 $\pm$ 6.52	57.11 $\pm$ 38.54
	5	3000	0.05	26.00 $\pm$ 8.21	46.59 $\pm$ 16.64
	6	3000	0.07	16.54 $\pm$ 6.55	32.10 $\pm$ 4.62
B Pulverizadora 	1	1000	0.03	24.91 $\pm$ 4.26	77.74 $\pm$ 31.10
	2	1000	0.05	58.32 $\pm$ 12.02	115.14 $\pm$ 29.08
	3	1000	0.07	19.82 $\pm$ 2.77	35.36 $\pm$ 12.65
	4	3000	0.03	22.00 $\pm$ 5.35	31.88 $\pm$ 25.80
	5	3000	0.05	35.54 $\pm$ 6.85	42.69 $\pm$ 11.73
	6	3000	0.07	54.78 $\pm$ 8.98	30.03 $\pm$ 6.65
C Híbrida -10° 	1	1000	0.03	36.53 $\pm$ 17.53	59.90 $\pm$ 13.09
	2	1000	0.05	30.24 $\pm$ 8.89	58.12 $\pm$ 18.65
	3	1000	0.07	23.72 $\pm$ 9.69	49.25 $\pm$ 28.37
	4	3000	0.03	40.91 $\pm$ 13.98	27.29 $\pm$ 6.96
	5	3000	0.05	31.12 $\pm$ 9.22	36.34 $\pm$ 10.53
	6	3000	0.07	24.03 $\pm$ 6.50	24.09 $\pm$ 4.45
D Híbrida 0° 	1	1000	0.03	21.73 $\pm$ 13.30	103.44 $\pm$ 46.53
	2	1000	0.05	21.17 $\pm$ 5.62	63.77 $\pm$ 10.69
	3	1000	0.07	34.03 $\pm$ 5.48	62.83 $\pm$ 17.54
	4	3000	0.03	37.29 $\pm$ 5.84	53.71 $\pm$ 18.39
	5	3000	0.05	44.44 $\pm$ 7.92	62.62 $\pm$ 14.52
	6	3000	0.07	47.53 $\pm$ 14.61	54.23 $\pm$ 21.08
E Híbrida +10° 	1	1000	0.03	28.25 $\pm$ 17.18	66.03 $\pm$ 18.84
	2	1000	0.05	25.26 $\pm$ 8.71	62.38 $\pm$ 13.43
	3	1000	0.07	39.20 $\pm$ 10.87	82.89 $\pm$ 15.53
	4	3000	0.03	35.64 $\pm$ 18.09	53.52 $\pm$ 13.18
	5	3000	0.05	31.83 $\pm$ 6.21	37.15 $\pm$ 7.96
	6	3000	0.07	38.44 $\pm$ 6.85	54.45 $\pm$ 6.69

¹ Los valores medios están basados en 6 mediciones diferentes de Ra.

Tal y como se comentó en apartados anteriores, las herramientas C, D y E, tienen 8 dientes dispuestos a lo largo del diámetro, por lo que tienen un canal de evacuación más pequeño que la herramienta convencional A.

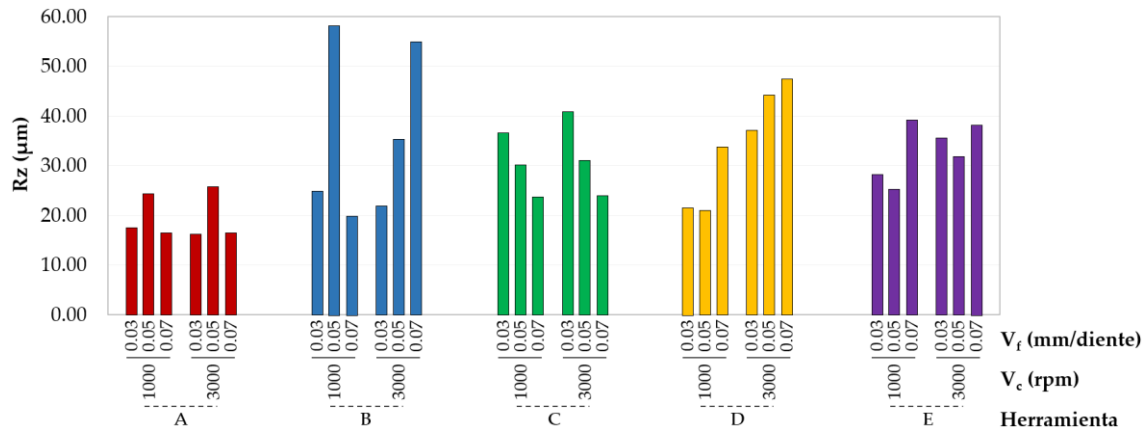


Figura 4.3. Representación gráfica de los valores de Rz obtenidos para cada herramienta de corte

Esto puede dificultar la evacuación de las virutas pudiendo quedar atascadas en la propia herramienta, tal y como se muestra en la Figura 4.4, donde la viruta se encuentra atascada en el canal de evacuación de la herramienta al finalizar uno de los ensayos. Esta puede ser una de las razones por las que estas tres herramientas toman un valor Rz más alto que la herramienta convencional A. La herramienta pulverizadora, B, es la más particular de las 5 herramientas empleadas, ya que, contiene 11 dientes distribuidos de forma helicoidal a lo largo del diámetro de la herramienta. Esto significa que los canales de evacuación generados entre los dientes son muy pequeños. Esta podría ser la razón de la aleatoriedad de los resultados mostrados en la Figura 4.3. Algunos de los valores de Rz obtenidos con la herramienta B son similares a los obtenidos con las otras 4 herramientas. Sin embargo, dos de ellos son los valores más altos del conjunto experimental.

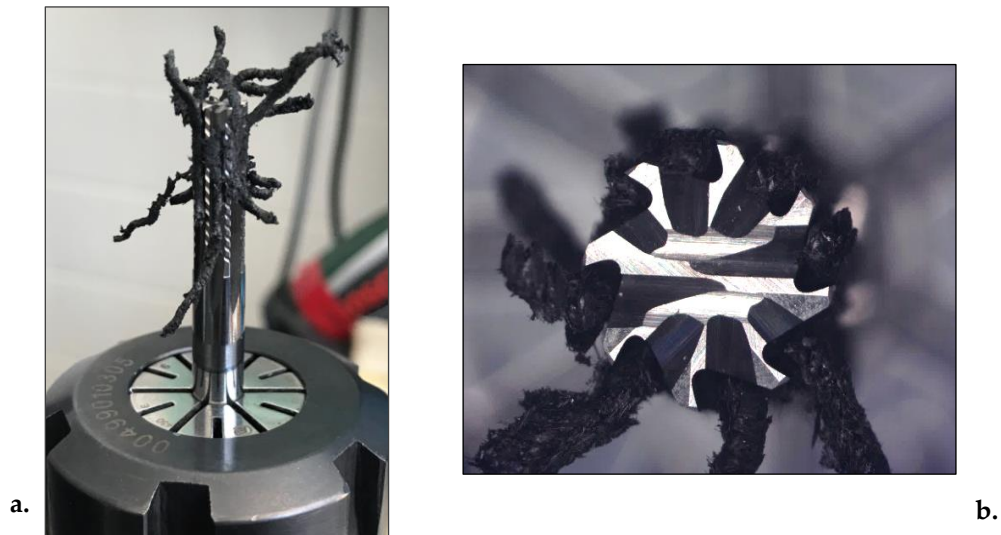


Figura 4.4. a. Partículas de fibra de carbono consolidadas con la matriz termoplástica formando un bloque de viruta encajada en los canales de evacuación de la herramienta híbrida 0°, D; b. vista de planta superior de la herramienta atascada

4.2.1.1. Análisis de la calidad superficial obtenida por herramienta

Para un mayor desglose de los resultados obtenidos, en este apartado se desarrolla el análisis de la calidad superficial obtenida para cada ensayo por tipo de herramienta. Para ello, en cada gráfico se representan los valores medios de Rz junto con sus desviaciones. Además, para cada combinación de parámetros se ha incluido también una macrografía de la rebaba o deshilachado de la fibra generada en ese ensayo. Sobre el conjunto de macrografías hay dos líneas discontinuas amarillas que indican el punto a partir del cual se genera la rebaba y el límite superior de este defecto.

Así, en la Figura 4.5 aparecen los valores obtenidos para la herramienta convencional, A. Se puede observar cómo los puntos más altos de Rz se producen con 0.05 mm/diente para ambas velocidades de corte. Además, las desviaciones generadas para 1000 rpm son menores que las de 3000 rpm. Una mayor velocidad de corte implica una mayor temperatura durante el proceso de mecanizado [9]. La temperatura hace que la posibilidad de adherencia de la matriz o las virutas de fibra aumente, haciendo que tanto la herramienta como el material sean susceptibles a este defecto. Esto puede justificar un mayor rango de valores de Rz para una velocidad de corte de 3000 rpm. Sin embargo, cabe destacar que la herramienta A es la que ha obtenido los mejores resultados de Rz. En concreto, una velocidad de corte de 3000 rpm y un avance de 0.03 y 0.07 mm/diente generan valores de 16.42 y 16.54 μm , respectivamente.

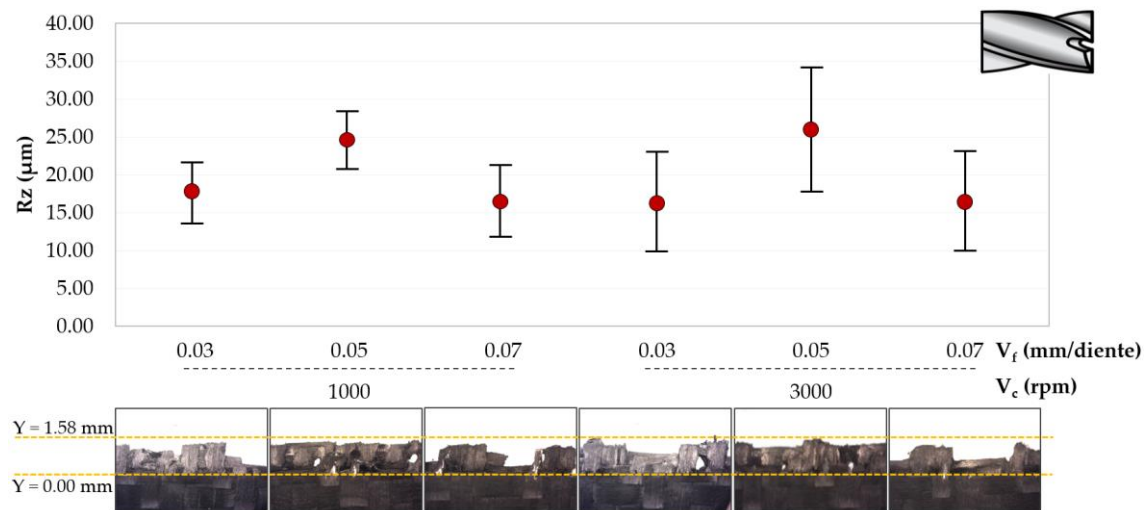


Figura 4.5. Representación gráfica de los valores medios y desviaciones de Rz y el deshilachado de las fibras ocasionado para la herramienta convencional, A

Por otro lado, se observa que la geometría de la herramienta convencional, A no es óptima para conseguir un buen acabado estético. La rebaba o deshilachado de las fibras aparece en todas las combinaciones de parámetros utilizadas, siendo 1.58 mm el valor más alto obtenido. La capa superior de fibra de carbono en el compuesto se deforma en el sentido de la rotación de la herramienta, pero no se rompe. Esta herramienta no está completamente diseñada para el mecanizado de materiales

compuestos, ya que, el número de dientes de una herramienta para el mecanizado de materiales compuestos es una de las variables más influyentes en el proceso [10–12].

Autores como Hintze W. et al. [13] coinciden en que un aumento del número de dientes genera peores resultados en cuanto a la calidad de la superficie, pero puede mejorar el defecto de arranque o las delaminaciones de los materiales compuestos. Esta discusión coincide con los resultados obtenidos en este experimento. Como se ha visto, la herramienta A es la que muestra los valores más bajos de Rz.

Por otro lado, como se ha mencionado anteriormente, la herramienta pulverizadora, B tiene 11 filos de corte distribuidos en forma helicoidal a lo largo del diámetro de la herramienta (Figura 4.6). Esta geometría de la herramienta está diseñada para realizar el acabado final de un proceso de contorneado en materiales compuestos, de tal forma que el elevado número de dientes hace que las fibras de carbono se rompan fácilmente. Esto se refleja en las macrográficas mostradas en la Figura 4.6. En comparación con la herramienta A, el defecto de deshilachado de las fibras generado es mucho menor y en algunos casos es incluso cercano a 0. Por el contrario, en la combinación de los parámetros de 1000 rpm y 0.05 mm/diente este defecto se aprecia de forma significativa. Cabe destacar que el deshilachado de las fibras coincide con el valor más alto de Rz obtenido en este conjunto de ensayos.

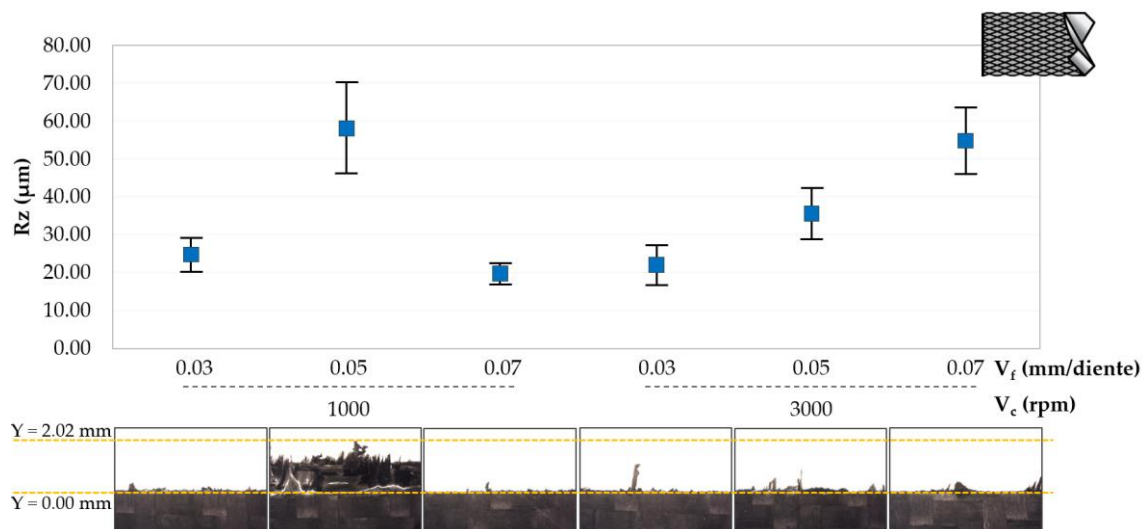


Figura 4.6. Representación gráfica de los valores medios y desviaciones de Rz y el deshilachado de las fibras ocasionado para la herramienta pulverizadora, B

Uno de los motivos por el cual se puede haber producido este defecto para esta combinación de parámetros de corte es que, con canales de evacuación tan pequeños e incluso insignificantes, puede producirse un bloqueo de la herramienta durante el mecanizado. Las partículas de fibra junto al adhesivo afectado por la temperatura podrían consolidarse y atascarse entre la herramienta y el material. Esto ha podido provocar la adhesión de partículas en la superficie mecanizada e incluso que la

herramienta pierda su capacidad de corte. No obstante, cabe recordar que el proceso de termoconformado para el conformado de materiales compuestos puede llegar a generar discontinuidades a lo largo de la superficie del material. Por ejemplo, en la Figura 4.7 se puede ver una inspección por ultrasonidos realizada a un stack CFRP/aluminio fabricado por termoconformado donde se aprecian cavidades representadas en color azul. Este es un claro ejemplo de que a la hora de postprocesar este material puede aparecer defectos ocasionado no por el mecanizado sino por el conformado del compuesto.

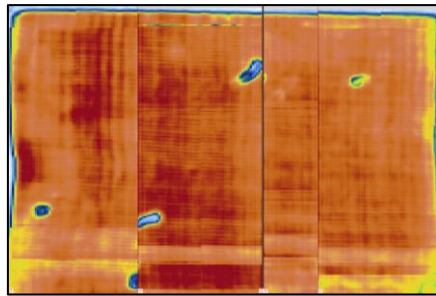


Figura 4.7. Inspección por ultrasonidos realizada a un stack CFRP/Aluminio [14]

Sin embargo, aparecen valores de R_z muy llamativos al mecanizar CFRTTP con este tipo de herramienta. En concreto, hay varias combinaciones de parámetros que alcanzan valores medios entre $19.82 - 24.91 \mu\text{m}$ con pequeñas desviaciones, similares a las obtenidas por la herramienta convencional, A. Por otro lado, esta herramienta contiene los valores más altos de R_z , alcanzando $70.34 \mu\text{m}$. Autores como Geier N. et al. [15] obtienen resultados similares. Con esta geometría de herramienta consiguen valores de R_z más altos en comparación con otros tipos de herramientas.

Por otro lado, las herramientas C, D y E son un híbrido entre los tipos A y B. Se sabe que un mayor número de filos de corte beneficia el mecanizado de materiales compuestos. Por esta razón, estas herramientas tienen 8 filos de corte. Además, un canal de evacuación es un elemento positivo que permite que la viruta no afecte en gran medida a la superficie final mecanizada. De esta forma, si se analizan los valores medidos para la herramienta C con un ángulo de hélice de -10° (Figura 4.8.a), se puede observar que, para una misma velocidad de corte, los valores de R_z disminuyen al aumentar el avance. Del mismo modo, las desviaciones mostradas siguen la misma tendencia que los valores medios, es decir, son menores a medida que aumenta la velocidad de avance. Esto provoca que la calidad final obtenida sea más homogénea con una mayor eliminación de material. En general, la herramienta D (Figura 4.8.b) y la herramienta E (Figura 4.8.c) muestran tendencias similares.

La precisión de los valores obtenidos es mayor a medida que aumenta la velocidad de avance. Además, en las 3 herramientas, a medida que aumenta la velocidad de corte, aumentan los valores de R_z .

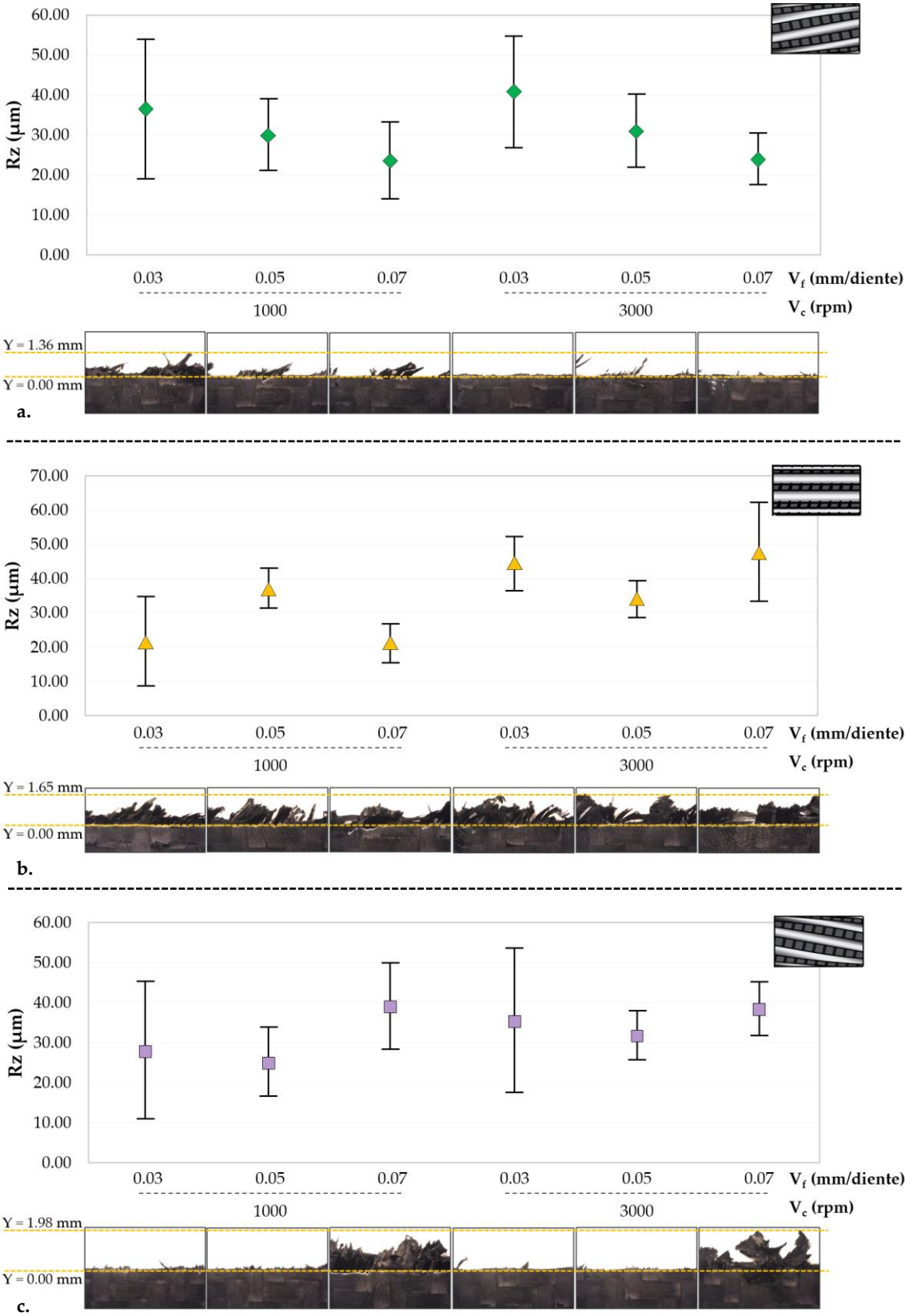


Figura 4.8. Representación gráfica de los valores medios y desviaciones de Rz y el deshilachado de las fibras ocasionado para: a. la herramienta híbrida -10°, C; b. la herramienta híbrida 0°, D; c. la herramienta híbrida, +10°, E

Este efecto también se produce con las herramientas anteriores. Un aumento de la velocidad de corte implica un aumento de la temperatura del proceso, lo que puede dar lugar a un corte menos limpio debido al defecto de adhesión.

Las 3 herramientas se encuentran en un rango similar de valores medios. Sin embargo, cabe destacar los resultados obtenidos para la herramienta híbrida 0°, D (Figura 4.8.b) con una combinación de 1000 rpm y 0,07 mm/diente. Esta combinación es la que genera un valor medio más bajo junto con una pequeña desviación. El ángulo de hélice negativo produce los valores de Rz más altos. Sin embargo, los valores de Rz obtenidos para un ángulo de hélice positivo son menores. En una estrategia de fresado a favor, un ángulo de hélice positivo puede llegar a provocar que el filo de la herramienta mecanice en la misma dirección que el ángulo de hélice, lo que podría dar lugar a una mejor eliminación de material.

Por otro lado, la herramienta híbrida C, con un ángulo de hélice negativo (-10°) genera una tendencia decreciente al aumentar el avance. Por el contrario, la tendencia de la herramienta E (ángulo de hélice positivo, 10°) aumenta a medida que aumenta también el avance.

En cuanto al defecto de deshilachado de las fibras, se observa cómo, en general, el elevado número de filos cumple su función. Este defecto aparece en menor medida en las herramientas que tienen un ángulo de hélice, ya sea positivo o negativo: C y E. En la herramienta C un aumento de la velocidad de corte conlleva una disminución del arranque de fibra de carbono. En cuanto a la herramienta E, se observa que a bajas velocidades de avance los resultados obtenidos son los mejores del conjunto de ensayos realizados. En cambio, a partir de un avance de 0.07 mm/diente, parece que la geometría de la herramienta dificulta el corte de estos hilos.

La herramienta D, con un ángulo de hélice de 0°, ha generado deshilachado de fibras en todos los ensayos. El ángulo de hélice de una herramienta da al canal de evacuación una forma curva, en la cual las virutas desprendidas pueden ser evacuadas más fácilmente. En este caso, como se puede observar en la Figura 4.4, parece que la ausencia de un ángulo de hélice ha dificultado la evacuación de la viruta durante el mecanizado, lo cual puede haber provocado un bloqueo de la herramienta con partículas de fibra consolidadas a la matriz del compuesto.

Algunos autores como Shengchao H. et al. [16] estudian el desgaste de este tipo de herramientas en el postprocesado mediante fresado de CFRPs. Concluyen que el uso de este tipo de herramientas disminuye la fuerza de corte requerida en el proceso. La menor fuerza de corte permite alcanzar mayores calidades superficiales. En este experimento, la herramienta D genera una calidad superficial similar a la obtenida por la herramienta A cuando se mecaniza a bajas velocidades de avance. Sin embargo, la

herramienta E, con un ángulo de hélice positivo (+10°) genera menos desprendimiento de fibras cuando el CF RTP se mecaniza a bajas velocidades de avance.

4.2.2. Conclusiones sobre el postprocesado mediante el fresado periférico

El fresado de compuestos de matriz termoplástica con diferentes tipos de geometrías de herramienta ha dado resultados significativos. En términos de calidad superficial, la herramienta convencional de 2 dientes (herramienta convencional, A), ha generado los valores Rz más bajos obtenidos en este experimento. La herramienta pulverizadora, B ha producido resultados muy dispares obteniendo valores de rugosidad bajos y altos. Hay que tener en cuenta que, aunque es capaz de realizar ranuras completas similares a las de este experimento, esta geometría de herramienta está diseñada para realizar el acabado superficial de materiales previamente mecanizados. Por lo tanto, cuando se realiza una ranura completa con este tipo de herramienta, puede haber un comportamiento imprevisible. Las herramientas híbridas C, D y E muestran valores de Rz ligeramente superiores a los provocados por la herramienta convencional (herramienta A). Sin embargo, estos valores tienen una tendencia bastante más clara que las mostradas por los otros dos tipos de herramientas.

En cuanto al defecto de deshilachado de las fibras, se observa que la herramienta convencional (A), obtiene los peores resultados. En todos los ensayos realizados con la herramienta A, este defecto se ha generado de forma homogénea. Se debe tener en cuenta que esta herramienta no está diseñada para realizar el mecanizado de materiales compuestos, lo cual implica que, aunque genere buenas calidades superficiales, no es capaz de eliminar las fibras que se encuentran en la capa superior del material sino simplemente deformarlas. Algo similar ha ocurrido con la herramienta D, sin embargo, el defecto de esta herramienta se debe a la ausencia de un ángulo de hélice lo cual ha provocado que la viruta en forma de fibra con la resina termoplástica afectada por la temperatura del proceso se consolide bloqueando el canal de evacuación de la herramienta. La herramienta pulverizadora, B ha ofrecido en general los mejores resultados en cuanto al deshilachado de las fibras. Tras la utilización de esta herramienta la altura de las fibras deshilachadas encontradas en el material es muy cercana a 0. La herramienta C, con un ángulo de hélice negativo (-10°) proporciona mejores resultados cuando se mecaniza el CF RTP a una velocidad de corte alta. Por el contrario, la herramienta E, con un ángulo de hélice positivo (+10°), se ve afectada por la velocidad de avance.

En general, el fresado periférico del CF RTP lleva intrínseco la creación de una serie de defectos típicos del proceso. Como ya ha sido mencionado, el uso de una matriz termoplástica hace que la temperatura de transición vítrea del material sea inferior a la de una resina termoestable por lo que, el material termoplástico puede verse más

afectado por la temperatura del proceso de fresado periférico que el CFRP. Esto se refleja en la calidad superficial obtenida en otros estudios experimentales donde los valores de Rz son mucho más bajos que los obtenidos en este experimento [17]. Por otro lado, al igual que en el caso del CFRP [18,19], este tipo de fresado produce continuamente el deshilachado de las fibras del material debido a los esfuerzos realizados por la herramienta de corte.

El mecanizado de este tipo de material en otras tecnologías no convencionales como el mecanizado por chorro de agua abrasivo, AWJM, podría ser interesante en términos de calidad superficial. En general, la temperatura generada en el AWJM es inferior a la provocada por el fresado convencional [20]. Esto puede hacer que la matriz termoplástica de un material compuesto se vea menos afectada por el mecanizado. Sin embargo, la selección de una geometría adecuada de la herramienta de corte puede conseguir defectos estéticos realmente buenos que el chorro de agua podría no conseguir. Hoy en día, se fabrican herramientas de corte como las B, C, D y E, diseñadas para eliminar defectos como el deshilachado de las fibras, las delaminaciones internas o la pérdida de la matriz durante el mecanizado.

Por otro lado, tras examinar las estrategias de fresado a favor y en oposición con las 5 herramientas utilizadas en este experimento, se ha visto como la estrategia de fresado en oposición, en general, obtiene siempre valores de Rz más altos que los resultantes de la estrategia de fresado a favor. En el fresado periférico en oposición, se genera una fuerza de corte menor cuando la herramienta incide en el material. En las aleaciones metálicas esta fuerza de corte puede generar una mejor calidad superficial. En cambio, en el mecanizado de materiales compuestos, una fuerza de corte baja puede hacer que los hilos de las fibras se deformen por la trayectoria de la herramienta, pero no se rompan.

Haciendo resumen a nivel cuantitativo de los resultados obtenidos, la herramienta convencional (A) es la que ha obtenido los mejores resultados de Rz, siendo 16.42 μm el valor medio mínimo para el experimento completo. La herramienta B consigue valores medios de Rz bastante bajos, como 19.82 μm , pero al mismo tiempo obtiene los valores más altos de todo el experimento, 58.32 μm o 54.78 μm . Las herramientas híbridas C, D y E tienen un rango de valores similar de aproximadamente 21 a 47 μm . Sin embargo, muestran tendencias diferentes entre sí. La herramienta C muestra una disminución de los valores de Rz a medida que aumenta la velocidad de avance. En las herramientas D y E, los valores de Rz aumentan también con el avance.

Por otro lado, la herramienta híbrida -10°, C genera el mínimo deshilachado de las fibras a velocidades de corte de 3000 rpm. La herramienta híbrida +10°, E, también genera una mínima cantidad de este defecto a bajas velocidades de avance 0.03-0.05 mm/diente.

Asumiendo toda la información discutida y analiza, se puede llegar a la conclusión de que la geometría de herramienta más completa para el mecanizado de compuestos termoplásticos es la herramienta C, con 8 filos de corte y un ángulo de hélice de -10° . Con esta herramienta a velocidades de avance de 0.07 mm/diente y una velocidad de corte de 3000 rpm se han obtenido valores medios de Rz similares a los valores mínimos de todo el experimento completo alcanzados por la herramienta A. Además, con esta combinación de parámetros se consigue un mínimo defecto de deshilachado de fibras.

4.3. Análisis del postprocesado mediante chorro de agua con abrasivo en CF RTP

Tras haber realizado el postprocesado mediante fresado del compuesto termoplástico reforzado con fibras de carbono, se va a desarrollar un apartado donde se analizarán las calidades y defectos obtenidos tras el postprocesado de materiales compuestos de naturaleza termoplástica (CF RTP) por chorro de agua con abrasivo (AWJM) de la Fase 1. En primer lugar, se estudiará el efecto de los parámetros de corte seleccionados en el ángulo de conicidad de la ranura obtenida. Posteriormente, se analizará la calidad superficial obtenida en términos de Ra. Finalmente se desarrollará un último apartado con una conclusión general que englobe el análisis de todos los resultados previamente discutidos por separado.

4.3.1. Análisis del ángulo de conicidad obtenido

Tal y como se comentó en apartados anteriores, los valores de ángulo de conicidad se han obtenido mediante la medición en 3 probetas postprocesados con las mismas combinaciones de parámetros de corte (Tabla 4.2), obteniéndose T1, T2 y T3, con el fin de realizar una media y su desviación estándar de los 3 valores obtenidos.

Todos los resultados de los valores medios indicados en la Tabla 4.2 son positivos. Esto significa que, según la ecuación Ec. 3. 1, la anchura superior del corte es siempre mayor que la inferior. De ello se deduce que la forma geométrica obtenida en todas las ranuras mecanizadas tiene forma de «V».

$$T (^{\circ}) = 2 \cdot \operatorname{atan}\left(\frac{\frac{A_s - A_i}{2}}{t}\right) \quad \text{Ec. 3. 1}$$

Este efecto geométrico es producido por el espesor del material junto con la velocidad de avance transversal y la cantidad de energía (presión y diámetro de la boquilla). Estas variables afectan a la distorsión de la forma de la ranura [21]. Cabe destacar que el defecto de conicidad de la ranura generado en el corte por chorro de agua es independiente del espesor del material. Este defecto será mayor o menor en función

de dicho espesor, pero siempre se producirá, incluso en materiales de pequeños espesores, como el CFRTP utilizado en este experimento.

Tabla 4.2. Valores de ángulo de conicidad o taper obtenidos en el experimento

Ensayo	Presión (P) [bar]	Velocidad de avance (V) [mm/min]	Caudal de abrasivo (A) [g/min]	T1 [°]	T2 [°]	T3 [°]	Taper medio (T) [° ± (°)]
1	1200	100	170	4.71	3.23	3.92	3.95 ± 0.60
2	1200	100	340	4.09	5.25	4.67	4.67 ± 0.47
3	1200	300	225	6.14	4.92	6.25	5.77 ± 0.60
4	1200	500	170	6.51	7.18	9.58	7.76 ± 1.32
5	1200	500	340	7.53	7.80	7.73	7.69 ± 0.11
6	2500	100	225	1.39	3.34	2.91	2.55 ± 0.84
7	2500	300	170	1.96	3.62	3.41	3.00 ± 0.74
8	2500	300	225	2.43	3.43	3.13	3.00 ± 0.42
9	2500	300	225	5.12	2.16	6.39	4.55 ± 1.77
10	2500	300	225	4.22	2.03	5.98	4.07 ± 1.62
11	2500	300	225	4.77	2.26	3.25	3.43 ± 1.03
12	2500	300	225	5.12	2.85	3.16	3.71 ± 1.00
13	2500	300	225	4.54	4.40	3.26	4.07 ± 0.57
14	2500	300	340	3.39	5.59	4.70	4.56 ± 0.90
15	2500	500	225	5.88	6.10	4.94	5.64 ± 0.50
16	3400	100	170	1.61	2.11	3.08	2.27 ± 0.61
17	3400	100	340	0.75	2.91	4.84	2.83 ± 1.67
18	3400	300	225	2.16	1.48	2.81	2.15 ± 0.54
19	3400	500	170	1.52	2.69	3.31	2.51 ± 0.74
20	3400	500	340	1.68	2.16	3.68	2.51 ± 0.85

Los valores medios obtenidos oscilan entre 2.15° y 7.69°. Algunas de las publicaciones científicas revisadas [18,19,22] muestran valores cercanos al rango obtenido en este experimento, aunque otros valores específicos del ángulo de conicidad son diferentes. Se debe tener en cuenta que no existe literatura sobre el análisis del ángulo de conicidad en CFRTPs por lo que los materiales compuestos empleados en otros artículos están fabricados con una resina termoestable. La mayoría de ellos contienen una temperatura de transición vítrea más alta que la resina termoplástica utilizada en este experimento. Además, existen variables que permanecen fijas como el diámetro de la boquilla y el tamaño del grano del abrasivo que, en cambio, son diferentes pudiendo llegar a producir un efecto de mezclado (agua, aire, abrasivo) distinto.

Por otra parte, no toda la bibliografía existente tiene en cuenta las tres zonas generadas en la ranura de corte: la región de daño inicial (IDR), la región de corte suave (SCR) y la región de corte rugoso (RCR). En este experimento se hace hincapié en el tratamiento independiente de dichas zonas, sin embargo varios autores en sus artículos

[9,18,19,22] calculan el defecto taper sin tener en cuenta esta indicación. Esto podría hacer que los valores de la conicidad se vean alterados por el radio de redondeo generado en la superficie superior del material mecanizado. Este radio se produce cuando el chorro de agua impacta la superficie a mecanizar. Las partículas abrasivas, en un primer instante de contacto, se encuentran con una pared que deben atravesar, lo cual produce que no todas ellas sean capaces de hacerlo, por lo que se dispersan por la superficie superior del material, produciendo un redondeo en la entrada del corte.

Además, tener en cuenta la zona de corte rugoso (RCR) puede implicar cierto error al calcular los valores de ángulo de conicidad debido a que, en esta zona, el chorro de agua sale del material mecanizado, lo que da lugar a una divergencia del mismo. En los materiales compuestos, las fibras de carbono y la matriz pueden desprenderse creando hilos sueltos o cavidades. Por ello, tras varias pruebas previas realizadas en el CF RTP empleado en este trabajo, se ha elegido el 10% de la ranura de corte desde la cara inferior del material como zona RCR.

En relación con lo anterior, se ha comprobado como en todos los ensayos se muestra un redondeo producido en la cara superior de la ranura de corte. Por ejemplo, en la Figura 4.9 se muestran dos macrográficas de la sección de corte de dos ranuras mecanizadas en CF RTP con diferentes combinaciones de parámetros. En ambas se puede ver como aparece este defecto, el cual suele estar causado por la colisión del chorro de agua y las partículas abrasivas con la cara superior del material. El radio obtenido en la Figura 4.9.a es de 0.063 mm, mientras que el radio generado en la Figura 4.9.b es de 0.037 mm.

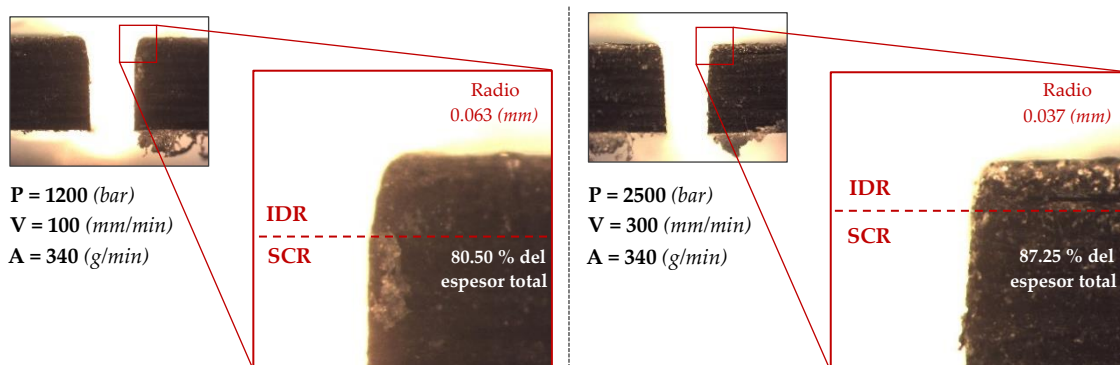


Figura 4.9. Macrografía de la ranura de corte en condiciones: a. P 1200 bar, V 100 mm/min, A, 340 g/min; b. P 2500 bar, V 300 mm/min, A 340 g/min

Esto confirma la aleatoriedad que puede llegar a obtenerse en dos ranuras mecanizadas en el mismo material. Por otro lado, la línea que separa la zona inicial de daño de la zona de corte suave se encuentra a diferentes alturas, siendo la altura de la Figura 4.1.a equivalente al 80.50% del espesor total (2 mm) y la de la Figura 4.1.b equivalente a 87.25% de dicho espesor.

Por lo tanto, teniendo en cuenta el espesor del material mecanizado utilizado en este experimento, las diferentes secciones quedan divididas de la siguiente manera: 0-10% del espesor para la zona de corte rugoso, 10-75% para la zona de corte suave y 75-100% para la zona de daño inicial. Tal y como se explicó en el Capítulo 2 en este experimento se considerará el ángulo de conicidad obtenido en la zona de corte suave (Figura 4.10).

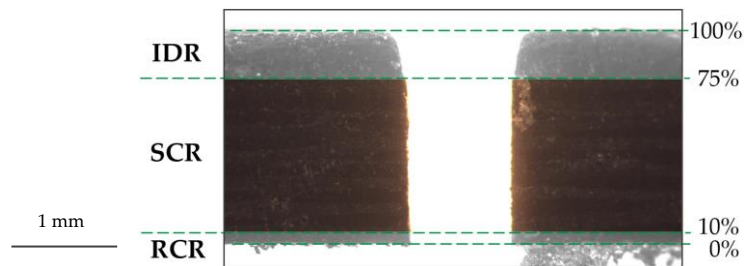


Figura 4.10. Detalle de una sección real de corte donde se pueden ver las zonas: de corte rugoso (RCR) 0-10%, de corte suave 10-75% (SCR), de daño inicial 75-100% (IDR)

4.3.1.1. Estudio estadístico del ángulo de conicidad

Por otro lado, se ha realizado un análisis ANOVA de los valores obtenidos del ángulo de conicidad (Tabla 4.3). Se ha empleado un modelo cuadrático de segundo orden que permite relacionar los parámetros de entrada utilizados en el experimento (presión, velocidad de avance y caudal de abrasivo) con los resultados obtenidos tras el mecanizado. La relación entre las variables permite crear una mayor o menor precisión entre ellas. El valor P de este modelo es inferior a 0.05, lo que indica que es estadísticamente significativo. Además, un valor alto de la variable F hace que la variable en cuestión sea más relevante en el análisis.

Tabla 4.3. Análisis ANOVA de los valores del ángulo de conicidad obtenido en este experimento

	DF	Adj SS	Adj MS	Valor F	Valor P
Modelo	9	48.2278	5.3586	16.95	0.00
Presión (bar)	1	30.6617	30.6617	97.00	0.00
Velocidad de avance (mm/min)	1	9.8658	9.8658	31.21	0.00
Caudal de abrasivo (g/min)	1	0.7668	0.7668	2.43	0.15
Error	10	3.1610	0.3161		
Lack-of-Fit	5	1.6498	0.3300	1.09	0.46
Error Puro	5	1.5112	0.3022		
Total	19	51.3888			

Como se puede ver en la Tabla 4.3 la presión y la velocidad de avance son los parámetros más significativos en el defecto de conicidad. Esto se deduce porque el valor P es 0, es decir, tiene una significancia máxima. Se observa que el caudal de abrasivo es

el parámetro menos influyente en la generación del defecto taper debido a su valor P de 0.15. Además, se observa que el valor F para la variable presión triplica al obtenido para la velocidad de avance. Este hecho permite deducir que, aunque ambas variables son significativas, la presión hidráulica tiene mayor peso en la generación del ángulo de conicidad.

La ecuación **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra el modelo matemático obtenido para la metodología de superficie de respuesta analizada. Esta ecuación presenta un R² del 93.85%, lo que implica un ajuste predictivo bastante exacto.

$$KT = 1.00 + (0.7P + 124.8V + 153A + 0.08V^2 - 0.17A^2 - 0.04P * V - 0.13V * A) \quad \text{Ec. 4.1}$$

Estos resultados estadísticos son coherentes con los artículos relacionados con el tema estudiado [19,23]. Por lo tanto, se puede concluir que, para la generación de un defecto taper, el orden de los parámetros según su influencia es la presión hidráulica, la velocidad de avance y el caudal de abrasivo.

4.3.1.2. Efecto de la presión hidráulica en el ángulo de conicidad

Para analizar la influencia de la presión hidráulica en el ángulo de conicidad, las variables velocidad de avance y caudal de abrasivo han sido mantenidas fijas y en su nivel intermedio (V = 300 mm/min; A = 225 g/min). Cada ángulo de conicidad obtenido (T1, T2 y T3), ha sido clasificado en un color diferente (Figura 4.11).

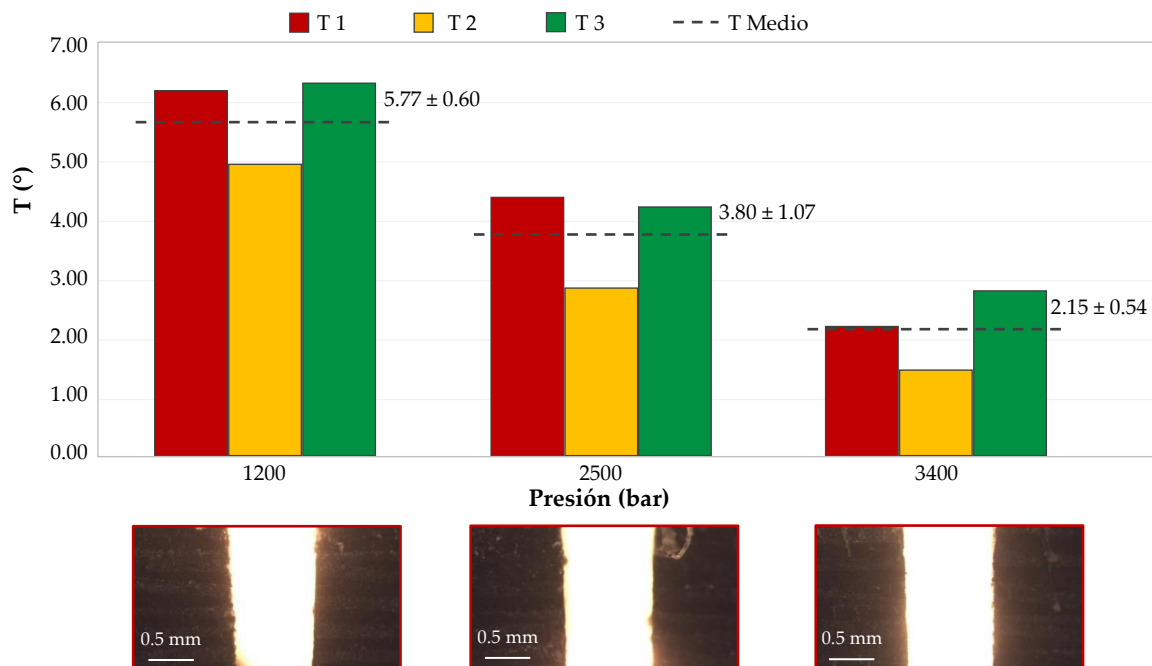


Figura 4.11. Variación del ángulo de conicidad en tres ranuras en función de la presión hidráulica (V = 300 mm/min; A = 225 g/min)

Así, el color rojo corresponde a la probeta 1, el amarillo a la probeta 2 y el verde a la probeta 3. Además, cada figura muestra el valor medio del defecto de conicidad obtenido para cada combinación de parámetros. Este valor ha sido representado con una línea discontinua seguida del valor medio y la desviación resultante. Con el fin de demostrar que la presión hidráulica es una de las variables más influyentes en el mecanizado, la Figura 4.11 contiene imágenes que facilitan la comprensión de esta información.

A primera vista, en la Figura 4.11, el ángulo de conicidad disminuye al aumentar la presión. Observando los valores medios obtenidos y las presiones implicadas, se puede ver cómo los datos resultantes se ajustan en gran medida a una regresión lineal. Una mayor presión supone un aumento de la energía cinética generada por el chorro de agua. Este aumento de la energía cinética conlleva un mayor arranque de material. En consecuencia, las paredes de la ranura están sometidas a una mayor fuerza de cizalla que provoca una pared final con menos ángulo de inclinación.

Además, teniendo en cuenta cada taper obtenido de forma independiente, se puede ver cómo el taper 2 (barra amarilla) tiene en todas las combinaciones de parámetros un ángulo de conicidad menor que el taper 1 y 3 (barras roja y verde, respectivamente). Este efecto puede haber sido producido por la naturaleza del CFRTTP. El material está compuesto por largas fibras de carbono y láminas de matriz termoplástica. La disposición de estos elementos a lo largo del material compuesto es crucial para llevar a cabo el mecanizado, de tal forma que un hilo de fibra desplazado en el momento de la fabricación o una consolidación irregular de la matriz a lo largo de la superficie podrían alterar su homogeneidad (Figura 4.12). No obstante, la tendencia a la disminución del defecto taper a medida que aumenta la presión hidráulica se refleja en tres ángulos obtenidos y estudiados. En este caso, un valor de presión de 3400 bar genera el menor ángulo de conicidad, siendo de 2.15° . Hay que tener en cuenta que el material compuesto empleado tiene un espesor de 2 mm lo cual puede hacer que el material se considere de poco espesor, lo cual podría facilitar que la energía cinética creada por la presión genere una pared homogénea en la ranura.

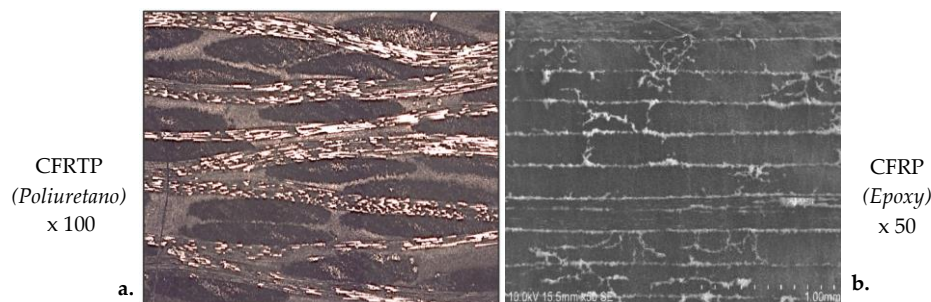


Figura 4.12. Macrográficas de la sección de corte de un material compuesto con: a. matriz termoplástica; b. matriz termoestable [23]

Un estudio realizado por Dhanawade et al. [18] muestra una tendencia similar a la generada en esta investigación. El material utilizado en su estudio es un compuesto formado por fibras de carbono y resina epoxi termoestable. Coinciden en que un aumento de la presión genera una disminución del defecto de conicidad. Además, Dhanawade et al. utilizan una presión hidráulica que alcanza los 4000 bar, obteniendo un ángulo de conicidad que oscila entre los 2.2° y los 3.8°. Se puede deducir que estos resultados coinciden con los obtenidos en este experimento. Por lo tanto, si se analiza el parámetro de la presión de forma aislada, parece que el tipo de resina utilizada en el material compuesto no influye en gran medida en la conicidad generada por el material.

Ruiz-García et al. [23] realizaron un estudio sobre el análisis del defecto del ángulo de conicidad en el mecanizado por chorro de agua abrasivo de un apilado CFRP/UNS A97075. En ese trabajo, los resultados del taper obtenidos se encontraron en un rango de 1°. En dicho estudio se utilizaron velocidades de avance inferiores a las utilizadas en este experimento, lo cual puede dar como resultado una mayor homogeneidad del defecto taper, así como una menor variación de los resultados. Por otro lado, la matriz utilizada por el mismo fue resina epoxi la cual tiene una temperatura de transición vítrea más alta que la resina termoplástica utilizada en este experimento (TPU-poliuretano, 145 °C). El uso de una resina termoestable podría permitir al material compuesto alcanzar mejores propiedades mecánicas que las que contiene el CF RTP empleado en este experimento.

4.3.1.3. Efecto de la velocidad de avance en el ángulo de conicidad

De la misma forma, se ha graficado el efecto de la velocidad de avance sobre el ángulo de conicidad generado en la ranura (Figura 4.13). La distribución de los elementos en el gráfico es similar a la mostrada en la Figura 4.11. Al igual que en el apartado anterior, esta figura contiene 3 macrografías de cada ranura con el fin de facilitar la comprensión del gráfico. Se puede observar cómo, a diferencia de lo ocurrido con la presión, los valores medios del ángulo de conicidad aumentan a medida que se incrementa la velocidad de avance.

Al configurar una velocidad de 100 mm/min se produce un corte más lento provocando una fractura más homogénea a lo largo de la superficie del material. En este caso, el chorro de agua es capaz de atravesar el material y eliminar cada capa de fibra de carbono y matriz de forma ordenada, llegando a reducir la influencia de la naturaleza del material compuesto en la generación del ángulo de taper. Por lo tanto, se deduce que, aplicando una baja velocidad de avance, la conicidad de la ranura conseguida será menor o, en otras palabras, la anchura superior e inferior de la ranura tienen valores más cercanos entre sí.

Por otro lado, cuando se aplica una velocidad de avance alta, se genera una pérdida de energía cinética en el canal de corte. Esto podría producir una disminución de la eliminación de material y una disminución de las partículas abrasivas que afectan a la superficie del material. En esta ocasión, el chorro de agua es más susceptible a la naturaleza del material. Las diferentes capas de fibra de carbono y la matriz aprovechan la energía reducida del chorro para dificultar el paso a través del material compuesto lo cual puede llevar a que las paredes de la ranura no sean verticales, lo que hace que la anchura superior de la ranura sea mayor que la inferior.

Así, el menor valor de conicidad se producirá para un avance de 100 mm/min, siendo de 2.55° , y el mayor valor se producirá con un avance de 500 mm/min, resultando de 5.64° . El menor espesor del material empleado, combinado con una baja tasa de avance, son parámetros que ayudan a crear un corte homogéneo mediante AWJM.

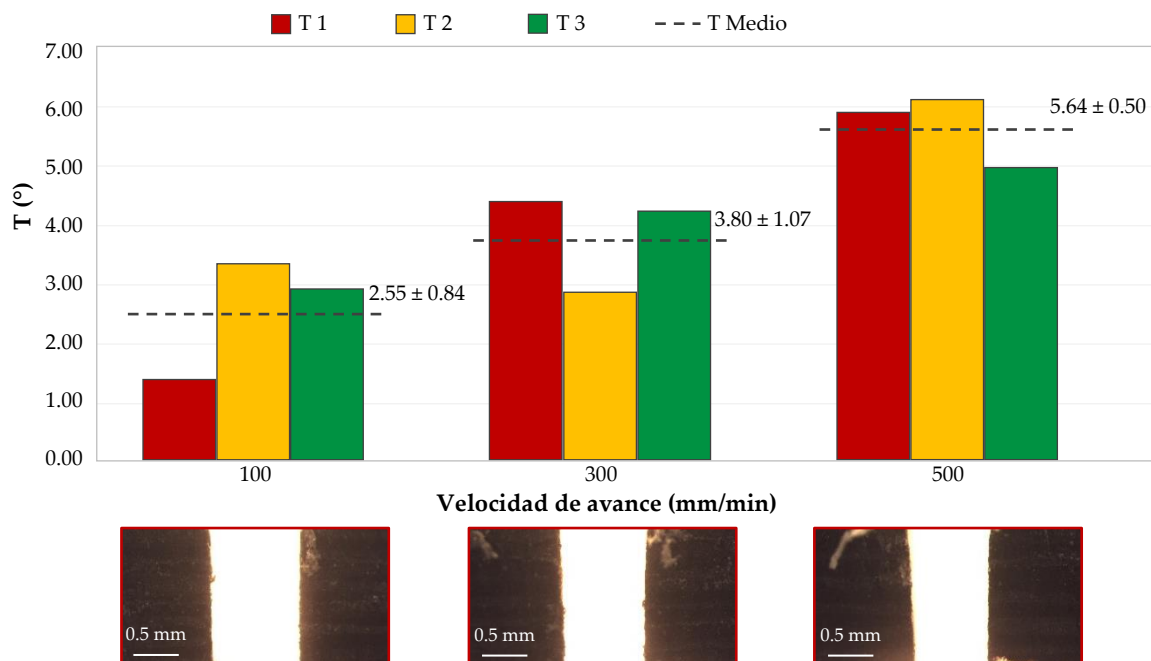


Figura 4.13. Variación del ángulo de conicidad en tres ranuras en función a la velocidad de avance ($P = 2500$ bar; $A = 225$ g/min)

Todo lo expuesto anteriormente coincide lo presentado por Wong et al. [24] en uno de sus artículos, donde analizan los defectos de conicidad en una matriz termoestable de fibra de carbono (epoxi). La velocidad de avance utilizada es algo más elevada que la empleada en este experimento oscilando los 1000-2500 mm/min. Sin embargo, los autores concluyen que una mayor velocidad de avance implica una menor cantidad de partículas abrasivas que afecten al material y, por ende, una disminución de estas partículas abrasivas puede provocar un corte menos homogéneo y aleatorio.

A medida que aumenta la velocidad de corte, disminuyen las anchuras superior e inferior de la ranura. Sin embargo, la anchura de la superficie inferior tiene una

tendencia de disminución mayor que la de la superficie superior. Esto coincide con los artículos que estudian el defecto de conicidad en otros tipos de materiales [25,26].

4.3.1.4. Efecto del caudal de abrasivo en el ángulo de conicidad

La influencia del caudal de abrasivo (A) en la generación del defecto taper se muestra en la Figura 4.14. En el apartado 4.3.1.1. se concluyó que este parámetro es el menos influyente de los tres modificados en este experimento. Sin embargo, este hecho no implica que la cantidad de abrasivo empleada no afecte a los resultados. De hecho, observando la tendencia de los valores medios del taper graficados en la Figura 4.14, se puede ver cómo ascienden a medida que aumenta la cantidad de abrasivo empleada en el corte. La tendencia al alza causada por el caudal de abrasivo es menor que la causada por la presión y el avance, lo cual coincide con lo establecido en el análisis ANOVA, siendo el parámetro menos influyente.

Hay que tener en cuenta que un aumento excesivo de la cantidad de abrasivo puede provocar una pérdida de energía cinética. En este caso, es más probable que las partículas abrasivas choquen entre sí, provocando un corte más irregular, lo que se traduce en una mayor erosión a la entrada de la ranura, una mayor diferencia entre las anchuras superior e inferior de la misma, y un mayor deshilachado en la superficie de salida del material [27].

En este experimento se obtiene un ángulo de taper menor empleando una pequeña cantidad de abrasivo, 170 g/min, dando lugar a un ángulo medio de 3.00° . Para la mayor cantidad de abrasivo empleado 340 g/min, se obtiene un ángulo medio de 4.56° .

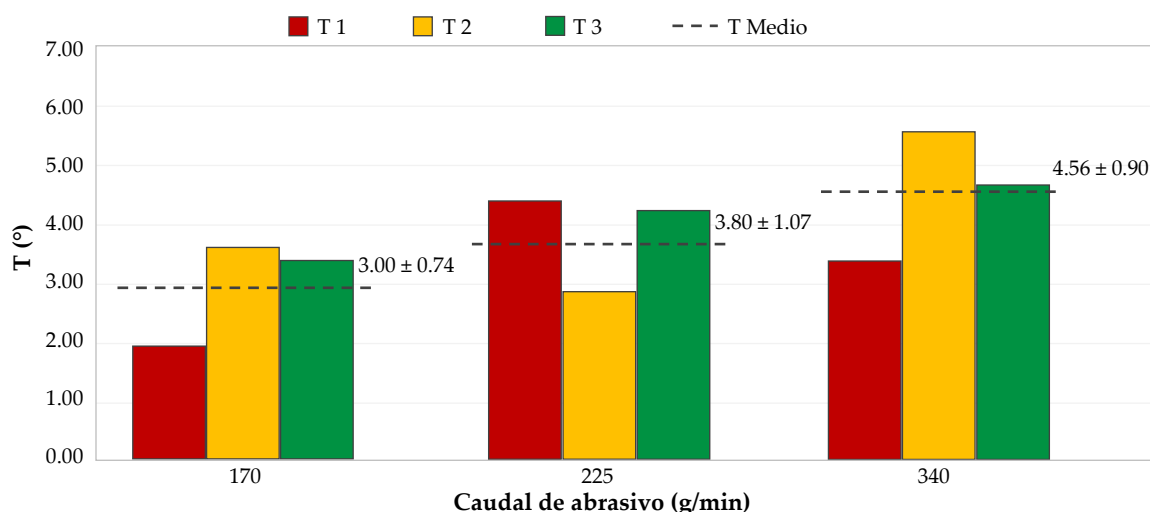


Figura 4.14. Variación del ángulo de conicidad en tres ranuras en función al caudal de abrasivo (P = 2500 bar; V = 300 mm/min)

Ruiz-García et al. [23] consiguieron una tendencia ascendente similar a la obtenida en este experimento. El uso de un mayor caudal de abrasivo supone una mayor

diferencia entre la anchura superior de la ranura y la inferior, lo cual implica que el caudal de abrasivo utilizado en la AWJM, normalmente no está relacionado con el tipo de resina empleada en la fabricación del compuesto.

Tras haber analizado de forma marginal el ángulo de conicidad obtenido en el postprocesado de CFRTP mediante chorro de agua con abrasivo, se procede a interpretar los resultados obtenidos mediante una superficie de respuesta. Este tipo de representación permite que dos parámetros de entrada interactúen con una variable de salida, manteniendo todos los demás parámetros constantes. El análisis ANOVA realizado en el Apartado 4.3.1.1. dio mayor importancia a la presión hidráulica y la velocidad de avance en el proceso de mecanizado. Por lo tanto, V y P se han representado junto con el ángulo de conicidad en la Figura 4.15, manteniendo fijo el caudal de abrasivo en su valor intermedio, $A = 225$ g/min.

Como se puede ver en dicha figura, ambos parámetros parecen muy significativos. Un valor de presión hidráulica cercano a 3400 bar combinado con las diferentes velocidades de avance ofrece los valores más bajos de taper (Figura 4.16). Según el análisis ANOVA realizado, el valor P marcaba una influencia directa de la presión y la velocidad, sin embargo, el valor F resultaba el triple en la velocidad de avance, lo cual hace que aumente su influencia en el taper generado. Esto puede ser visto en la Figura 4.15, donde una única presión (3000 bar) da lugar a uno de los rangos de valores de taper (valores $< 3^\circ$) para toda la gama de velocidades de avance utilizadas en este experimento.

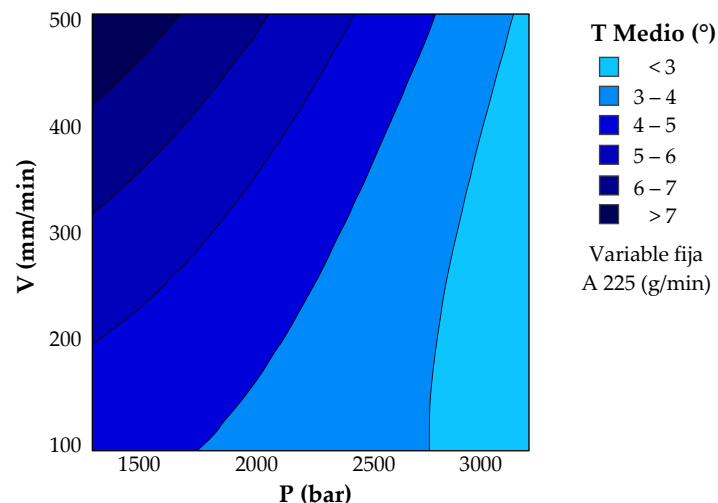


Figura 4.15. Gráfica de contorno del defecto taper en función a las variables más influyentes; presión y velocidad de avance

Por otro lado, la combinación de 1200 bar de presión y 500 mm/min de avance parece ser la más desfavorable en el estudio del taper. A medida que aumenta la velocidad, la capacidad de corte disminuye debido a la pérdida de energía cinética del

chorro de agua. A este efecto hay que añadirle la reducción del número de partículas abrasivas que afectan al material. Además, la matriz de poliuretano aplicada en este experimento tiene una temperatura de fusión de 145 °C.

El corte por chorro de agua abrasivo es una tecnología que genera una temperatura más baja que otras tecnologías de mecanizado convencionales, como el fresado periférico o el taladrado [20]. Este proceso facilita el mecanizado de materiales sensibles a la temperatura. Las altas temperaturas podrían provocar el reblandecimiento de la matriz termoplástica, generando defectos en la calidad final de la ranura. Los valores de conicidad resultantes en este experimento son similares a los estudiados por Wong et al. [24]. Esto podría significar que el efecto de la temperatura sobre la matriz termoplástica no es suficiente para alterar el ángulo de conicidad o taper obtenido.



Figura 4.16. Combinación de parámetros que minimiza el defecto taper (P = 3400 bar; V = 100 mm/min; A = 340 g/min)

4.3.1.5. Validación del modelo matemático obtenido para el ángulo de conicidad

Tal y como se ha comentado anteriormente, se ha realizado un diseño experimental complementario (Tabla 4.4) para comparar valores de conicidad obtenidos de dicho diseño (T Experimental) junto con los mismos valores predichos por la Ecuación 4.1 (T Predichos). Para evaluar el modelo matemático realizado en este experimento, se ha llevado a cabo una comparación entre las combinaciones de parámetros no utilizadas en el DOE original y los valores predichos, la cual se ha representado en la Figura 4.17.

Cabe destacar que, en la mayoría de los casos, los valores experimentales están por debajo de los predichos a una distancia similar. Cuando se observan los errores tabulados en la Tabla 4.4, se puede ver que, para presiones de 1200 y 2500 bar, los errores oscilan en un rango de 0-20%, mientras que la presión más alta de 3400 bar genera errores elevados con valores de hasta 49.84%.

El error medio obtenido es del 20.49%. Los valores experimentales siguen la tendencia de los valores predichos, pero mantienen una diferencia casi constante entre ellos. Esta diferencia puede deberse a la anisotropía y a la naturaleza del material, como se observa en la Figura 4.12. Este modelo podría utilizarse para predecir la tendencia que

seguirá la conicidad del taper en función de los parámetros utilizados, aunque se debe tener en cuenta el error obtenido.

Tabla 4.4. Diseño de experimentos complementario para la validación del modelo matemático (taper)

Ensayo	Presión [bar]	Velocidad de avance [mm/min]	Caudal de abrasivo [g/min]	T Experimental [°]	T Predicho [°]	Error [%]
1	1200	100	225	3.73	4.13	10.81
2	1200	300	170	6.52	5.46	16.21
3	1200	300	340	5.99	5.98	0.12
4	1200	500	225	6.77	7.95	17.47
5	2500	100	170	2.23	2.75	23.19
6	2500	100	340	4.01	3.76	6.39
7	2500	500	170	4.68	4.89	4.37
8	2500	500	340	4.17	5.00	19.85
9	3400	100	225	1.60	2.28	42.33
10	3400	300	170	1.40	1.91	36.27
11	3400	300	340	1.67	2.50	49.84
12	3400	500	225	2.32	2.76	19.07

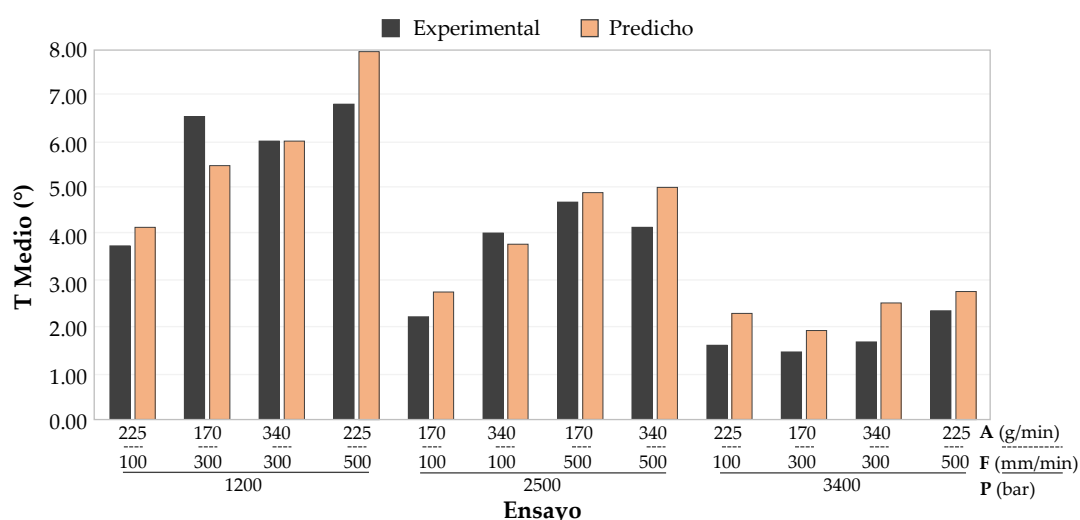


Figura 4.17. Valores de ángulo de conicidad obtenidos (experimentales y predichos)

4.3.2. Análisis de la calidad superficial obtenida

Al igual que se ha analizado el ángulo de conicidad, en este apartado se muestran los valores de R_a (Tabla 4.5) obtenidos en las tres regiones de la ranura de corte (entrada, centro y salida, R_a 1, R_a 2 y R_a 3, respectivamente), así como su rugosidad media aritmética y su desviación estándar (R_a Medio).

En la mayoría de los ensayos, los valores más altos de R_a se observan en la zona correspondiente a la entrada del chorro de agua. El primer contacto de las partículas abrasivas con el material produce una zona muy afectada por la erosión hasta que el

chorro consigue penetrar en el espesor del material. Sin embargo, en dos ensayos, los valores de Ra en la salida son superiores a los valores en la entrada.

Debido a la baja viscosidad del polímero termoplástico [28], la integración entre la matriz y el refuerzo (fibras de carbono) puede ser superada por los esfuerzos de cizallamiento generados por el chorro de agua al mecanizar el material. Esto produce que la matriz termoplástica no se elimine completamente, pudiendo quedar adherida a la superficie [29] o no desprenderse completamente al final del corte, provocando un defecto de deshilachado.

Tabla 4.5. Valores de Ra obtenidos en el experimento

Ensayo	Presión (P) [bar]	Velocidad de avance (V) [mm/min]	Caudal de abrasivo (A) [g/min]	Ra 1 [μm]	Ra 2 [μm]	Ra 3 [μm]	Ra Medio (Ra) [μm ± (μm)]
1	1200	100	170	6.45	5.87	5.28	5.87 ± 0.48
2	1200	100	340	7.45	6.83	6.58	6.95 ± 0.37
3	1200	300	225	6.99	6.61	5.81	6.47 ± 0.49
4	1200	500	170	6.13	5.00	4.75	5.29 ± 0.60
5	1200	500	340	6.74	6.88	6.57	6.73 ± 0.13
6	2500	100	225	6.76	4.88	5.56	5.73 ± 0.78
7	2500	300	170	6.14	5.39	4.46	5.33 ± 0.69
8	2500	300	225	5.87	5.85	5.35	5.69 ± 0.24
9	2500	300	225	5.09	5.59	5.73	5.66 ± 0.27
10	2500	300	225	5.39	5.01	5.56	5.29 ± 0.23
11	2500	300	225	5.34	5.31	5.10	5.21 ± 0.11
12	2500	300	225	5.80	6.46	5.34	5.90 ± 0.46
13	2500	300	225	5.31	5.59	5.28	5.44 ± 0.14
14	2500	300	340	6.00	5.94	5.76	5.90 ± 0.10
15	2500	500	225	6.63	5.18	5.19	5.67 ± 0.68
16	3400	100	170	4.88	4.74	4.69	4.77 ± 0.08
17	3400	100	340	6.73	5.53	5.45	5.90 ± 0.59
18	3400	300	225	6.87	5.51	5.29	5.89 ± 0.70
19	3400	500	170	6.44	5.69	4.75	5.63 ± 0.69
20	3400	500	340	6.73	5.12	5.13	5.66 ± 0.76

Cuando el rugosímetro evalúa la región de salida, el desprendimiento de la matriz termoplástica en forma de deshilachado puede alterar la medición recogida, obteniendo estos valores de Ra más altos. Por lo tanto, se puede suponer que no hay diferencias estadísticamente significativas entre los valores obtenidos.

Se han obtenido valores medios de Ra entre 4.77 y 6.95 μm. En comparación con la bibliografía estudiada sobre el mecanizado por chorro de agua abrasivo de materiales compuestos termoestables, se han obtenido valores cercanos a pesar de utilizar una matriz termoplástica de bajo punto de fusión [19,22,24,30].

Por el contrario, en comparación con los resultados obtenidos por Kakinuma et al. [29] en CFRTP (2.5 μm), se han obtenido valores más altos posiblemente debido al uso de un termoplástico diferente. Kakinuma et al. utilizaron una resina termoplástica de poliamida 66 modificada (Nylon66) que puede alcanzar una temperatura de transición vítrea de 260 °C. En comparación, el poliuretano aplicado en este experimento tiene una temperatura de transición vítrea de 145 °C. Esto puede provocar la pérdida de la matriz termoplástica y dar lugar a una peor calidad de la superficie.

Tal como se ha explicado en apartados anteriores, la literatura revisada indica la formación de tres regiones de diferente calidad superficial tras el mecanizado con chorro de agua abrasivo en cualquier tipo de material. La creación de estas regiones está relacionada con la selección de los parámetros de corte [23,31].

En los resultados obtenidos en este experimento, no existe una gran diferencia entre las tres regiones evaluadas, encontrándose valores de R_a mayores en la zona de entrada debido a la erosión de las partículas abrasivas a la entrada del chorro de agua. Del mismo modo, en comparación con los resultados obtenidos en [23,24] no se observa la formación de una tercera zona más rugosa. Esto podría deberse a las propiedades de la matriz termoplástica y al bajo espesor del material.

La tercera región suele estar asociada a una pérdida muy elevada de energía cinética del chorro de agua cuando el espesor es muy alto. Esta pérdida de energía cinética reduce la capacidad de corte del proceso, generando defectos como cavidades y una peor calidad superficial final. Sin embargo, cuando se mecaniza un espesor tan pequeño, la pérdida de energía cinética que sufre el chorro de agua no es significativa. Por lo que se puede deducir que se obtienen superficies muy homogéneas mediante el mecanizado de CFRTPs para espesores pequeños.

4.3.2.1. Influencia de la presión hidráulica en la calidad superficial

Al igual que para la evaluación del ángulo de conicidad, en la Figura 4.18 se muestra el efecto de la variación de la presión hidráulica en la calidad de la superficie en términos de R_a . Tal y como se observa en la figura se obtiene un aumento de la energía cinética obtenida al aumentar la presión, obteniendo valores de R_a que son más bajos y cercanos entre sí, principalmente en las zonas intermedias y de salida del canal de corte. Un aumento de la presión proporciona una mayor energía cinética a las partículas abrasivas y al chorro de agua aumentando su capacidad de corte [23,32]. Sin embargo, un aumento de la presión produce un mayor efecto erosivo en la entrada que lleva a valores más altos de R_a en la entrada del chorro.

Como se indica en la bibliografía, la formación de una zona afectada por la erosión (ZAE) en la entrada del chorro es un defecto inherente a este proceso. Esto se

aprecia en la Figura 4.19, donde se aprecia visualmente el cambio en la calidad de la superficie.

Los restos de partículas abrasivas tras el impacto del chorro de agua a la entrada del material aparecen adheridos a la superficie generada tras el corte [32]. Pueden haberse adherido a la superficie debido a la pérdida de energía cinética durante el proceso. Estas partículas pueden generar una zona más rugosa aumentando los valores de Ra a la entrada.

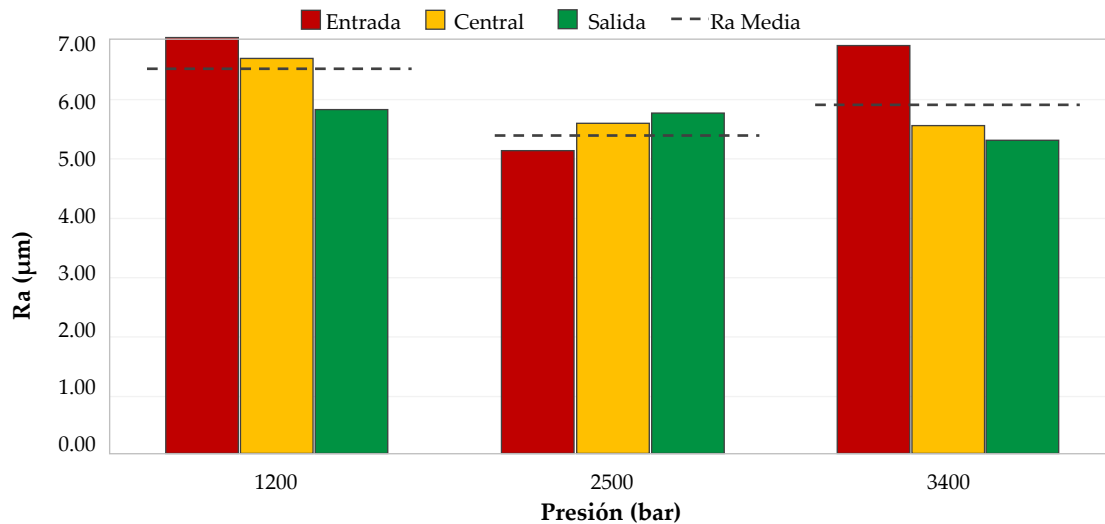


Figura 4.18. Variación de Ra en las tres zonas de la ranura en función a la presión hidráulica ($V = 300$ mm/min; $A = 225$ g/min)

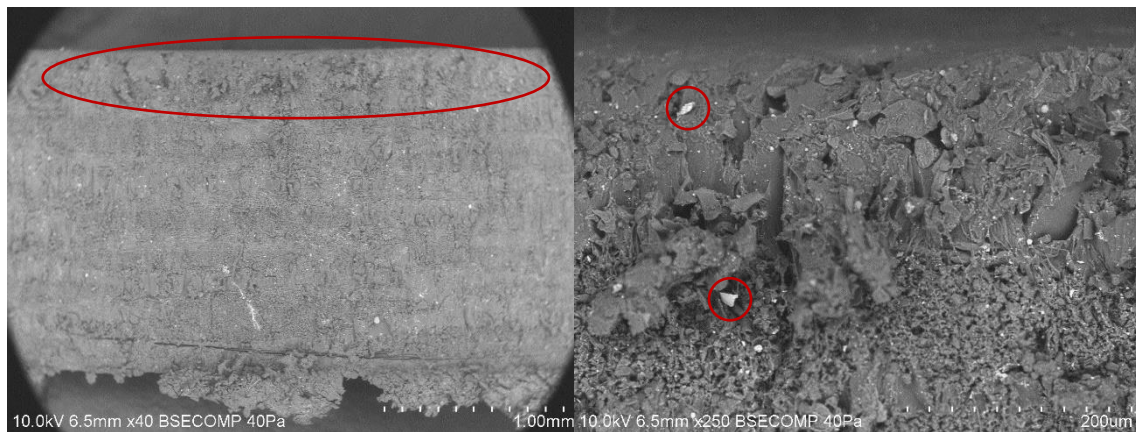


Figura 4.19. Zona afecta por la erosión (ZAE) debido a la acción de partículas a la entrada del chorro de agua (x40 y x250)

4.3.2.2. Influencia de la velocidad de avance en la calidad superficial

De acuerdo con [9,32,33], se obtienen valores de Ra más altos en la entrada del chorro de agua (Figura 4.20). Descartando esta zona, no se aprecia la influencia de la velocidad de avance en los valores de Ra obtenidos en las otras dos zonas del canal de

corte. Un aumento de este parámetro genera valores de Ra más cercanos en las tres zonas evaluadas, generando una superficie más homogénea.

De los resultados obtenidos, la superficie más homogénea tras el mecanizado se obtiene a una velocidad de desplazamiento de 300 mm/min. Sin embargo, un aumento de este valor combinado con el efecto erosivo del chorro da lugar a una mayor dispersión, produciendo una peor calidad superficial. Si la velocidad transversal no es adecuada, el efecto abrasivo a la entrada del chorro puede aumentar. La utilización de velocidades transversales de 100 mm/min ofrece los valores de Ra más bajos en casi todos los espesores. No obstante, la zona afectada por la erosión es más pronunciada. Esto puede deberse a un exceso de partículas abrasivas que afectan a la entrada del material durante un tiempo muy prolongado produciendo un aumento de la rugosidad generada en esta zona. Por el contrario, un exceso de velocidad de avance podría indicar que no se mecaniza todo el espesor de forma homogénea, generando variaciones entre la entrada y la salida del chorro [24].

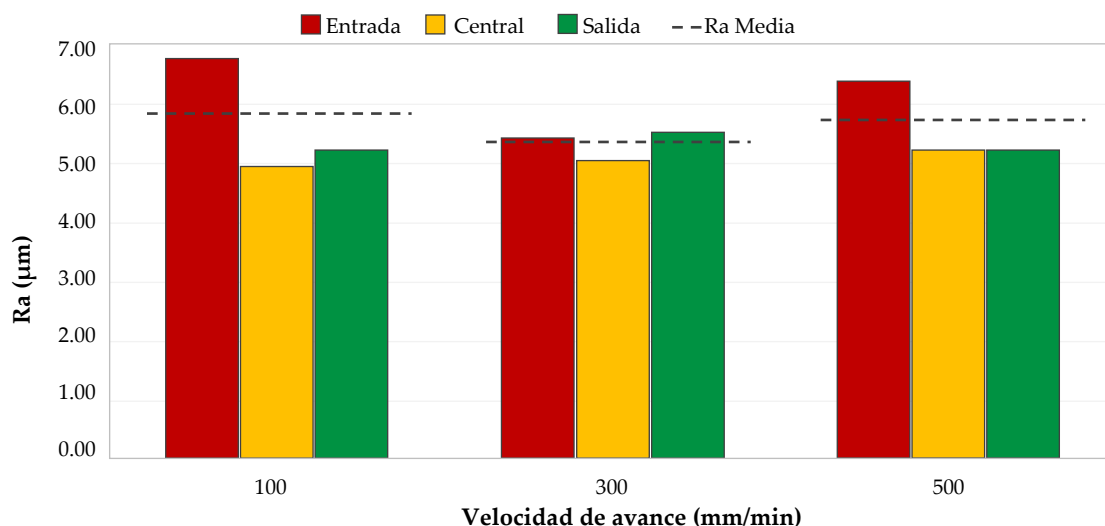


Figura 4.20. Variación de Ra en las tres zonas de la ranura en función a la velocidad de avance (P = 2500 bar; A = 225 g/min)

Sin embargo, dentro del rango de parámetros de corte seleccionados, no hay influencia en la rugosidad media aritmética obtenida en el espesor. Se obtienen valores medios muy próximos de Ra para los tres casos de estudio. Podría decirse que la variación de la velocidad transversal parece afectar únicamente a la calidad superficial correspondiente a la entrada del chorro de agua en el material.

Además, se han generado defectos que podrían influir en los resultados obtenidos. Así, en la Figura 4.21 se observan dos defectos en el mecanizado de CF RTPs mediante AWJM. Por un lado, hay una zona en la que son visibles las fibras de carbono sin matriz en forma de delaminación. Esto se debe al efecto erosivo del chorro de agua que ha eliminado la matriz, lo cual coincide con los resultados obtenidos en [32].

Por otro lado, la matriz termoplástica no parece desprenderse en la zona de salida del chorro de agua, quedando adherida a la superficie generada. Este defecto se conoce como rebaba en los estudios realizados en [34,35], debido a que la matriz termoplástica se desprende por las temperaturas alcanzadas en los procesos convencionales, dejando las fibras de carbono sin refuerzo. Sin embargo, en el mecanizado por chorro de agua, también puede generarse el efecto contrario, siendo las fibras de carbono eliminadas de forma correcta mientras que la matriz termoplástica no se desprende de la superficie dando lugar a un defecto de rebaba provocado por la matriz.

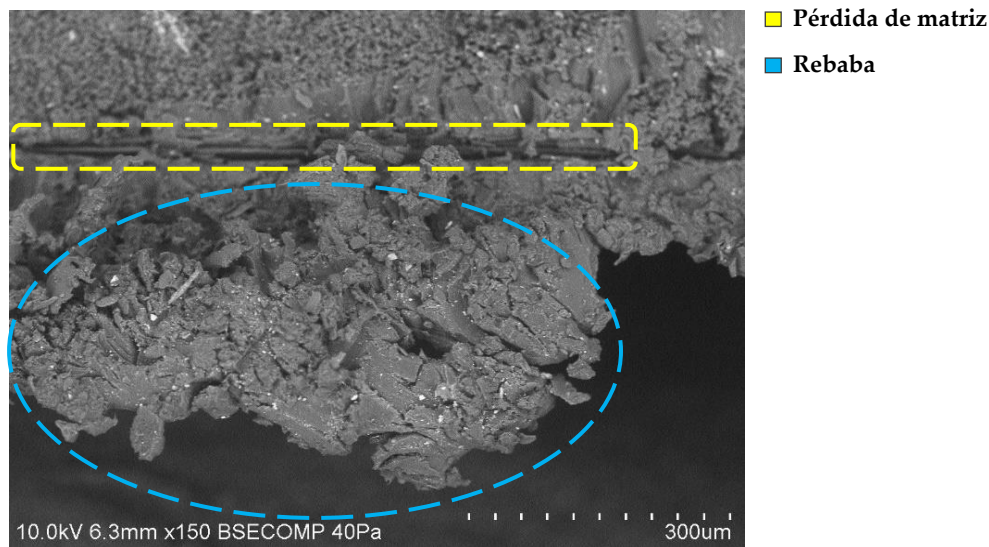


Figura 4.21. Rebaba generada a la salida del chorro de agua y pérdida de matriz (x150)

Estos defectos en la salida del canal de corte pueden alterar los valores de R_a , pudiendo dar lugar a valores más altos en la salida que en las zonas intermedias o de entrada, como en el ensayo 9 correspondiente a una presión de 2500 bar, un caudal de abrasivo de 225 g/min y una velocidad de avance de 300 mm/min.

4.3.2.3. Influencia del caudal de abrasivo en la calidad superficial

La influencia de la cantidad de abrasivo en la calidad superficial se representa en la Figura 4.22. Se obtiene un aumento de la R_a media al aumentar el caudal de abrasivo de 170 a 340 g/min, debido a un mayor número de partículas de abrasivo que impactan sobre el material, alcanzando una mayor capacidad de corte. Esto es coherente con los resultados obtenidos por el análisis ANOVA, el cual indica que el caudal de abrasivo es el parámetro con mayor significación estadística en la calidad superficial.

Además, se observa cómo, a medida que la cantidad de partículas abrasivas aumentan, el valor de R_a tiende a disminuir, lo cual puede ser debido a la pérdida de energía cinética en las partículas abrasivas si se aumenta excesivamente el caudal de abrasivo. Si el caudal de abrasivo sigue aumentando, las colisiones entre las partículas

abrasivas podrían producir un peor acabado superficial [27]. Un caudal de abrasivo de 170 g/min parece generar el menor valor medio de Ra, aunque incluso en este caso, aumenta la dispersión generada en todo el espesor, debido a que la cantidad de partículas utilizadas para el corte es insuficiente para generar un corte suave a la entrada del material.

El principal defecto en el mecanizado de materiales compuestos por chorro de agua es la delaminación [32]. Las delaminaciones se consideran como el colapso o ruptura en la zona de unión de las capas que componen el material compuesto debido a la formación de una grieta perpendicular al corte [18].

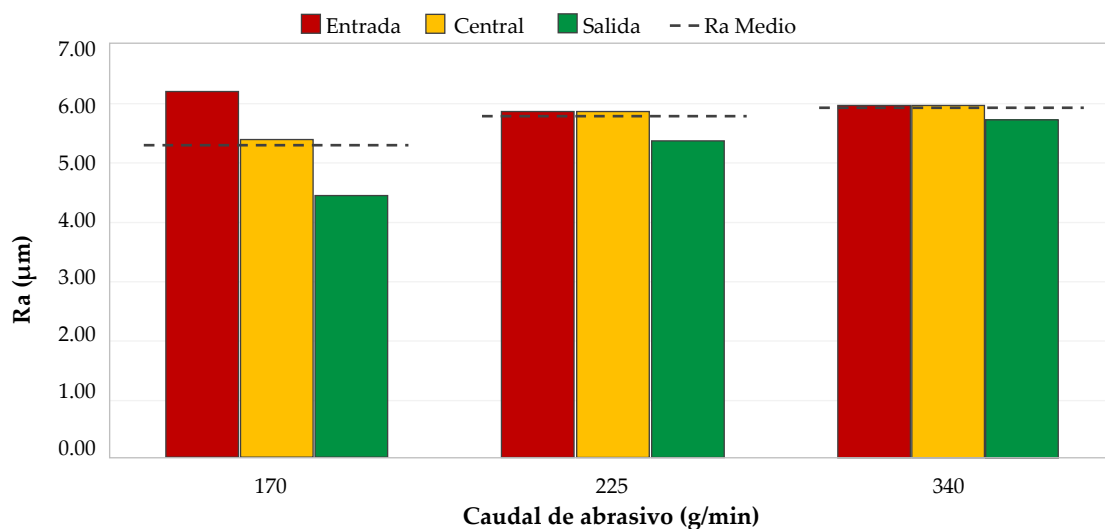


Figura 4.22. Variación de Ra en las tres zonas de la ranura en función al caudal de abrasivo (P = 2500 bar; V = 300 mm/min)

Cuando el chorro de agua incide sobre el material, el espesor del material no mecanizado se reduce constantemente. Esto produce una disminución de su resistencia a la deformación que puede dar lugar a que la adhesión entre capas (matriz, refuerzo) no soporte las tensiones generadas produciendo el defecto de delaminación [32]. Al mismo tiempo, cuando se genera la separación inicial de las capas y el material no está completamente mecanizado, el flujo de agua penetra a través de las pequeñas cavidades generadas. Esto produce, por un lado, un aumento de la longitud máxima de las delaminaciones producidas y, por otro, la posibilidad de penetración e incrustación de partículas abrasivas en las cavidades generadas [36], aumentando el tamaño de la delaminación producida (Figura 4.23).

Este defecto sólo se ha generado para la combinación de una presión de 1200 bar con un caudal de abrasivo de 340 g/min y una velocidad de avance de 100 mm/min. Esto es habitual también en el mecanizado de materiales compuestos de matriz termoestable y ha sido publicado previamente en [28,32,37].

Las partículas abrasivas se introducen en las cavidades aumentando la separación entre las capas que componen el CF RTP. La combinación de una velocidad transversal muy baja con un caudal de abrasivo muy alto facilita la eliminación de la matriz termoplástica. Esto permite que las partículas abrasivas eliminen las fibras de carbono y produzcan la delaminación.



Figura 4.23. Partículas abrasivas entre las capas de CF RTP provocando una delaminación (x40 y x100)

4.3.2.4. Análisis estadístico de la calidad superficial

En la Tabla 4.6 se muestra un análisis ANOVA de los valores de R_a obtenidos. Por otro lado, a la hora de relacionar las variables de entrada y salida implicadas en un experimento se suelen utilizar modelos cuadráticos de segundo orden debido a su alta fiabilidad [31,37,38]. El modelo cuadrático de segundo orden aplicado tiene un valor p inferior a 0.05, lo que indica que es estadísticamente significativo.

Tabla 4.6. Análisis ANOVA de los valores de R_a obtenidos en este experimento

	DF	Adj SS	Adj MS	Valor F	Valor P
Modelo	9	4.21331	0.46815	5.74	0.006
P (bar)	1	1.27804	1.27804	15.68	0.003
V (mm/min)	1	0.01400	0.01400	0.17	0.687
A (g/min)	1	1.86589	1.86589	22.89	0.001
Error	10	0.81522	0.08152		
Lack-of-Fit	5	0.46115	0.09223	1.30	0.389
Error Puro	5	0.35407	0.07081		
Total	19	5.02854			

La presión hidráulica y el caudal de abrasivo son las variables que influyen directamente en los valores de R_a . Por el contrario, la velocidad de avance tiene valores P superiores a 0.05, lo que indicaría que es una variable menos influyente. La

significación de cada parámetro viene determinada por el valor F, donde valores más altos de F indican una alta influencia en la respuesta. Observando el análisis realizado se puede indicar que el principal parámetro que afecta a la calidad es el caudal de abrasivo, seguido de la presión hidráulica. Esto es consistente con los resultados de la literatura consultada.

El modelo matemático obtenido mediante la metodología de superficie de respuesta se muestra en la Ec. 4.2. y presenta un R^2 del 83%, lo que indica un buen ajuste con los resultados experimentales.

$$Ra = 5.614 - 0.346P - 0.025V + 0.426A + 0.438P^2 - 0.042V^2 - 0.127A^2 + 0.176P * V - 0.170P * A - 0.094V * A \quad \text{Ec. 4.2}$$

Al igual que para el ángulo de conicidad, las superficies de contorno se han obtenido mediante un RSM, graficando la interacción de dos parámetros de entrada y la variable de salida, manteniendo constantes el resto de parámetros. Tal y como se ha establecido mediante el análisis ANOVA, la presión hidráulica y el caudal de abrasivo, son los parámetros más significativos en la medición de la calidad superficial.

En esta ocasión, el parámetro más influyente en la calidad superficial es el caudal de abrasivo (Figura 4.24), donde un valor cercano a 170 g/min combinado con presiones hidráulicas entre 1200 y 3400 bar ofrece los valores de Ra más bajos. Por el contrario, la combinación de parámetros de 1200 bar y cantidad de abrasivo de 340 g/min aumenta considerablemente los valores de Ra, lo que se traduce en una peor calidad superficial. Esto puede ser debido a la baja energía cinética que reciben las partículas abrasivas, lo cual puede reducir la capacidad de corte del chorro de agua.

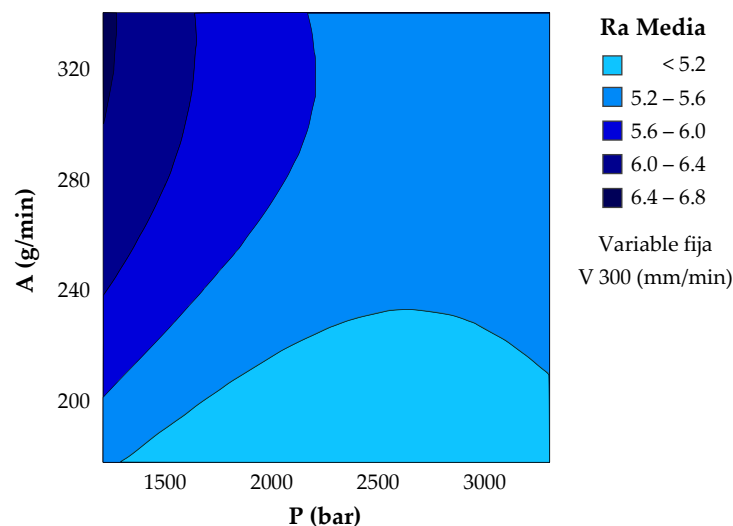


Figura 4.24. Gráfica de contorno del parámetro Ra en función a las variables más influyentes; presión y caudal de abrasivo

De hecho, esta pérdida de la energía cinética se puede ver reflejada en algunos ensayos donde aparecen zonas afectadas por la erosión. En la Figura 4.25 se muestran

dos macrografías de la sección de corte generada para diferentes combinaciones de parámetros empleadas en este experimento. La Figura 4.25.a corresponde al mayor caudal de abrasivo empleado 340 g/min, y se puede ver como la zona afectada por la erosión (ZAE) parece ser más pequeña, lo cual se puede observar en la primera sección del espesor correspondiente a la zona inicial de entrada del chorro de agua. En esta zona, la erosión generada por las partículas abrasivas parece ser menos visible, ofreciendo una superficie más homogénea en todo el espesor.

Por otro lado, en la Figura 4.25.b realizada con el caudal de abrasivo menor 170 g/min, se aprecia visualmente la diferencia de calidad superficial en esta zona inicial respecto al resto del espesor. Esto indicaría que la zona afectada por la erosión es mayor con esta elección de cantidad de abrasivo. Por otro lado, en la Figura 4.25.b, se emplea una presión de 2500 bar lo cual genera una mayor capacidad de corte al chorro de agua, pudiendo eliminar completamente la matriz termoplástica a la salida del material y, por ende, eliminando el defecto de deshilachado a la salida. Sin embargo, en ambas macrografías, se aprecia la pérdida de la matriz por el efecto erosivo del chorro, produciendo grietas con fibras de carbono visibles.

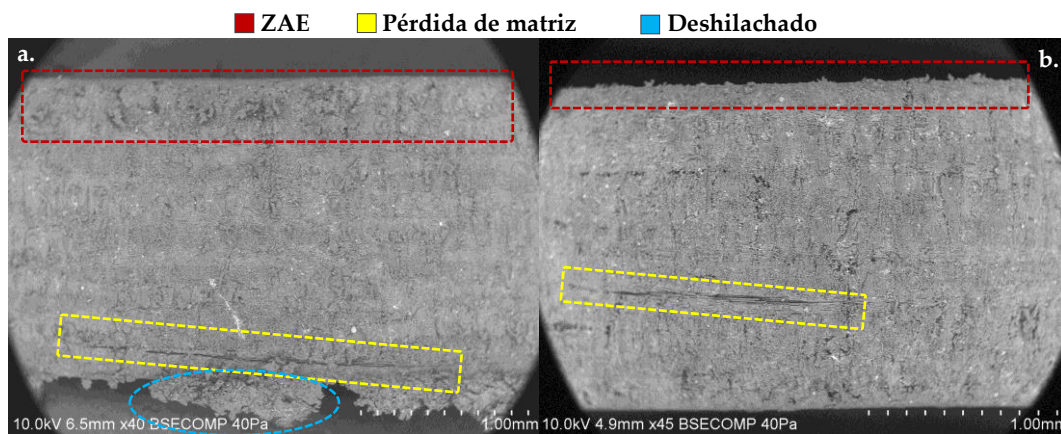


Figura 4.25. Comparación de calidad superficial obtenida en: dos combinaciones de parámetros diferentes: a. P = 1200 bar, A = 340 g/min (x40); b. P = 2500 bar, A = 170 g/min (x45)

4.3.2.5. Validación del modelo matemático obtenido para la calidad superficial

Se ha realizado un diseño experimental complementario, con el fin de validar los resultados obtenidos mediante la metodología de superficie de respuesta. En este diseño se han empleado combinaciones de parámetros de corte no incluidas en el DOE original con el fin de poder comparar los valores de Ra obtenidos por el experimento con los predichos por el modelo original para estas mismas combinaciones de parámetros (Tabla 4.7). La Figura 4.26 muestra los valores obtenidos en el experimento y los predichos de forma gráfica para una mejor comprensión.

Aunque hay diferencias importantes, el error máximo obtenido ha sido del 12.95%. Se ha obtenido un muy buen ajuste para el modelo matemático utilizado. Cabe destacar la disparidad de resultados obtenidos en la literatura sobre el mecanizado de CF RTP.

Tabla 4.7. Diseño de experimentos complementario para la validación del modelo matemático (Ra)

Ensayo	Presión [bar]	Velocidad de avance [mm/min]	Caudal de abrasivo [g/min]	Ra Experimental [°]	Ra Predicho [°]	Error [%]
1	1200	300	170	6.13	5.68	7.34
2	1200	100	225	6.51	6.56	0.77
3	1200	500	225	5.58	6.15	10.22
4	1200	300	340	7.72	6.87	11.01
5	2500	100	170	5.28	4.95	6.25
6	2500	500	170	5.08	5.09	0.20
7	2500	100	340	6.71	5.99	10.73
8	2500	500	340	5.33	5.75	7.88
9	3400	300	170	4.71	5.32	12.95
10	3400	100	225	5.38	5.51	2.42
11	3400	500	225	5.71	5.81	1.75
12	3400	300	340	5.20	5.83	12.12

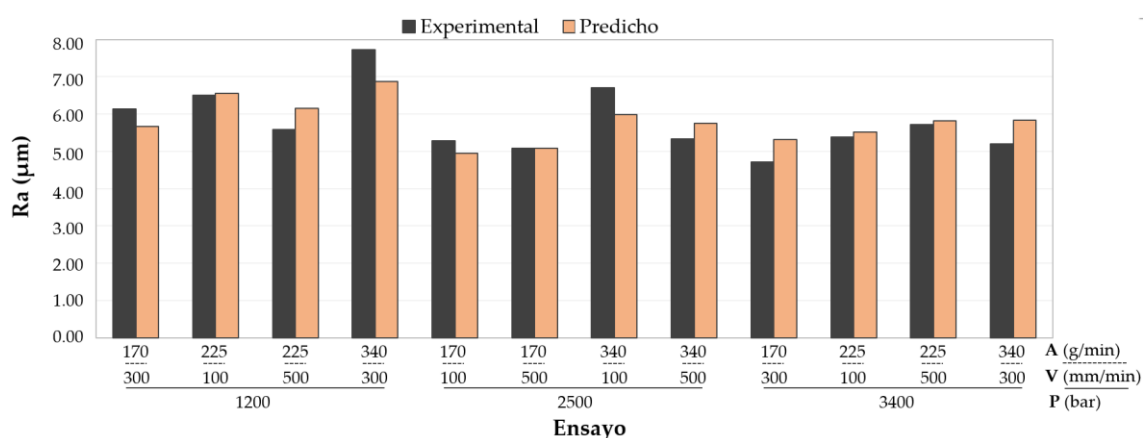


Figura 4.26. Valores de Ra obtenidos (experimentales y predichos)

Además, este error puede estar causado por la anisotropía de este tipo de materiales y por defectos como el deshilachado, cavidades o rebabas que pueden alterar los valores de calidad superficial. Este modelo podría utilizarse para predecir y mejorar la calidad superficial en el mecanizado por chorro de agua abrasivo de los CF RTP.

4.3.3. Conclusiones sobre el postprocesado mediante el AWJM

En primer lugar, cabe señalar la obtención de 3 zonas a lo largo del espesor del material: la zona de corte rugoso (RCR) en el 0-10%, la zona de corte suave (SCR) en el

10-75% y la zona de daño inicial (IDR) en el 75-100%. La definición de las 3 zonas en la sección de corte del CF RTP ha permitido realizar el estudio del ángulo de conicidad y de la calidad superficial de una forma más exacta. En esta ocasión el defecto taper ha sido medido en la zona de corte suave (SCR) y la calidad superficial se ha obtenido a partir de varias medidas tomadas en cada una de las zonas diferenciando, por ende, las calidades en las diferentes zonas del espesor del material.

Mediante el análisis ANOVA realizado se han llegado a deducir una serie de conclusiones. El análisis realizado para el defecto taper indica que la presión hidráulica y la velocidad de avance son los parámetros más influyentes en el mecanizado por chorro de agua abrasiva. En el caso de la calidad superficial los parámetros más influyentes han sido la presión hidráulica y el caudal de abrasivo.

Asimismo, el modelo matemático obtenido por la metodología de superficie de respuesta analizada para el defecto taper ha presentado un R^2 del 93,85%. El modelo matemático obtenido para la rugosidad media aritmética ha presentado un R^2 del 83%.

Ambas variables estudiadas coinciden en el parámetro de presión hidráulica como influyente en el proceso de mecanizado. Las paredes de las ranuras mecanizadas se vuelven más verticales a altas presiones lo cual es debido a una mayor concentración de energía que impacta sobre el material compuesto a mecanizar. Este cúmulo de energía se traduce por tanto en una mayor cantidad de material eliminado tras el proceso.

Por otro lado, para el ángulo de conicidad la velocidad transversal es el segundo parámetro más influyente en el proceso de mecanizado. En cambio, en el cálculo de la rugosidad media aritmética R_a , el caudal de abrasivo es el parámetro que más influye en el proceso junto a la presión hidráulica. La velocidad y el abrasivo son parámetros que se analizan de mejor manera en conjunto. La velocidad transversal tiene un papel fundamental en combinación con la erosión de las partículas abrasivas a la entrada del chorro de agua [23,37]. Si la velocidad transversal aumenta hasta 300 mm/min, se produce una dispersión entre la cantidad de partículas que están mecanizando la parte superior del material en comparación con la parte inferior del mismo. Esto produce una diferencia en la capacidad de corte a lo largo del espesor que produce una zona más rugosa. Sin embargo, debido a este aumento de velocidad, se reduce la cantidad de partículas abrasivas que erosionan la zona de entrada del chorro de agua en un intervalo de tiempo, produciendo una zona inicial menos rugosa.

Por otro lado, el efecto de la temperatura no parece influir en la calidad de los resultados obtenidos por AWJM. Tras una concisa revisión bibliográfica, parece que los resultados obtenidos en el ángulo de conicidad y en la rugosidad media aritmética coinciden con los obtenidos por otros autores científicos.

En ambos casos se ha hecho uso de un segundo diseño experimental para verificar la ecuación polinómica de segundo orden generada en la calidad superficial y el defecto taper, que contrasta las combinaciones de parámetros no utilizadas en el DOE original con los valores predichos por el modelo. En el caso del ángulo de conicidad o taper se ha obtenido un error del 20.49%, y para la calidad superficial en términos de Ra se ha obtenido un error máximo de 12.95%. Estos errores pueden considerarse pequeños si se tiene en cuenta la anisotropía y la naturaleza del material compuesto mecanizado.

Se ha encontrado una combinación de parámetros de corte que minimiza el ángulo de conicidad, resultando en una presión de 3400 bar, una velocidad de avance de 100 mm/min, y un caudal de abrasivo de 340 g/min, produciendo una relación de anchura superior-inferior cercana a 1, es decir, $0,75^\circ$. De la misma manera, se ha encontrado una combinación de parámetros de corte que minimiza el Ra, resultando en una presión de 3400 bar, un caudal de abrasivo de masa de 170 g/min y una velocidad de avance de 100 mm/min, produciendo un Ra de $4.77 \mu\text{m}$.

Se puede ver como trabajar a altas presiones hidráulicas y bajas velocidades de avance es un punto a favor en el mecanizado de materiales compuestos en chorro de agua con abrasivo. Además, tal y como se ha demostrado en el análisis del ángulo de conicidad, el caudal de abrasivo es el parámetro con una tendencia menor respecto a las otras dos variables analizadas. Este dato junto a la aleatoriedad de resultados provocada por el impacto de las partículas abrasivas y la pérdida de energía cinética de las mismas a lo largo del recorrido de la ranura de corte hace que este parámetro sea uno de los menos influyentes en el proceso.

Por otro lado, mediante este experimento se ha observado que la zona con peor calidad superficial es la zona inicial (IDR) debido al efecto erosivo de las partículas abrasivas, que incluso parecen adherirse a la matriz termoplástica. Además, la formación de deshilachados a la salida del chorro de agua en la zona de corte rugoso (RCR) puede provocar un deterioro de la calidad superficial del material. Además, uno de los principales defectos causados por el AWJM en los materiales compuestos termoplásticos es la delaminación interna entre capas del compuesto. Se ha podido ver como este efecto no ha sido provocado en ninguna de las combinaciones de parámetros realizadas en este experimento.

Para concluir, los valores de Ra y de taper obtenidos son muy cercanos a los de los estudios centrados en compuestos de matriz termoestable. Todo esto incluso teniendo en cuenta que el empleo de una resina termoplástica en un material compuesto puede dificultar su mecanizado debido a propiedades intrínsecas de la matriz.

4.4. Comparativa de postprocesados: fresado periférico frente a chorro de agua con abrasivo

En este apartado se van a comparar los postprocesados realizados en la Fase 1 con el fin de poder tomar una decisión sobre qué tecnología parece ser la más apropiada para el material compuesto termoplástico empleado en este experimento. Para ello se pondrán en común los diferentes parámetros de corte, herramientas y variables de salida estudiadas en los mecanizados llevados a cabo (Figura 4.27). De esta forma para el fresado periférico se contemplarán como variables de entrada: la velocidad de corte (rpm), la velocidad de avance por diente (mm/diente) y la geometría de herramienta (en función al número de filos y ángulo de hélice); y como variables de salida: el valor medio de los valores de Rz con la estrategia a favor (μm) y las desviaciones de los valores de Rz con la estrategia a favor (μm), así como los valores medios y desviaciones de Rz con la estrategia en oposición.

De igual manera en el caso del mecanizado por chorro de agua se tendrá en cuenta como parámetros de entrada: la presión hidráulica (bar), la velocidad transversal (mm/min) y el caudal de abrasivo (g/min); y como variables de salida: el valor medio del ángulo de conicidad o taper ($^{\circ}$), las desviaciones del taper ($^{\circ}$), el valor medio de Ra (μm) y las desviaciones de Ra.

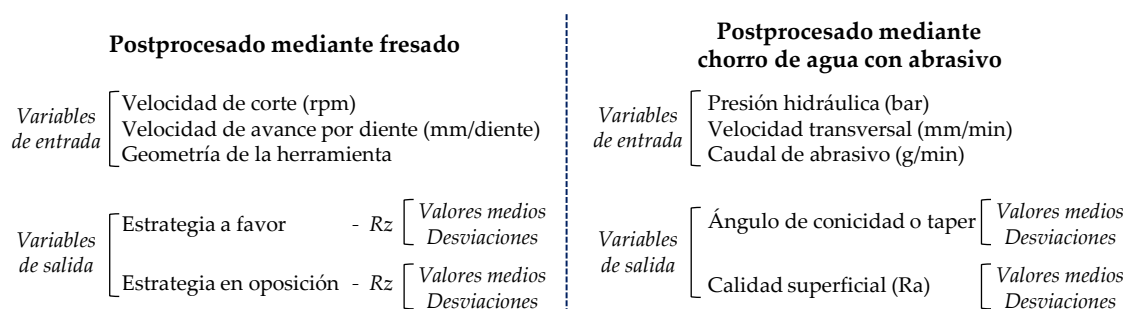


Figura 4.27. Diagrama de parámetros de entrada y variables de salida influyentes en la matriz de ponderación

Para que esta comparativa sea posible es necesario tratar las variables de salida de la misma forma, para ello se codificarán bajo la misma nomenclatura. Se va a realizar una ponderación de cada una de ellas con una puntuación del 1 al 10. De esta forma el valor 10 implicará que la variable estudiada tiene una connotación negativa: muy cara, genera peor resultado, genera un mayor valor de Ra, por ejemplo; y el valor 1 implicará que la variable estudiada tiene una connotación positiva: tiene un menor coste, genera la mejor calidad superficial, etc. Una vez explicado esto se procede a describir cuál va a ser el procedimiento para otorgarle la ponderación a cada una de las variables y, llegados a este punto, es necesario distinguir entre valor medio y desviación:

- **Ponderación de los valores medios**

Para el caso de los valores medios, ya sea, los de calidad superficial en términos de Rz del fresado periférico (a favor y en oposición), los del ángulo de conicidad de AWJM o los de la calidad en términos de Ra de AWJM, se codificará con 1 al menor valor medio y con 10 al mayor valor medio. Esos valores medios se establecerán como máximo y mínimo y el resto de valores que se encuentren entre ellos serán ponderados mediante una interpolación lineal que les otorgará un resultado como el mostrado en la Figura 4.28.

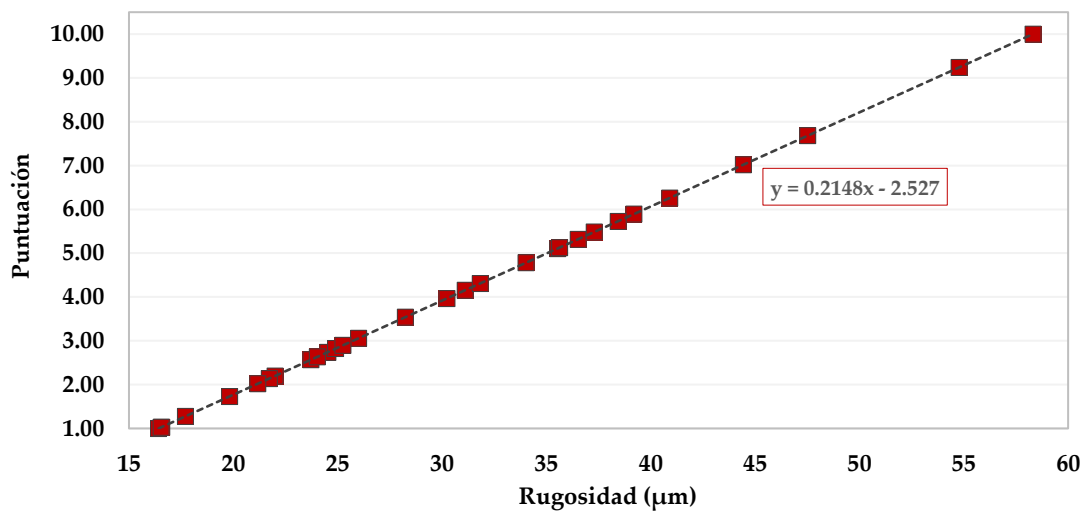


Figura 4.28. Representación gráfica de los valores medios de Rz para la estrategia a favor ponderados del 1 al 10 mediante una interpolación lineal

- **Ponderación de las desviaciones**

Para ponderar las desviaciones de cada variable de salida se codificará con un 1 el menor valor numérico y con 10 al mayor valor numérico. Al igual que para los valores medios, estos extremos se establecen como máximo y mínimo, y el resto de valores que se encuentren entre ellos serán ponderados en función a una interpolación.

En este caso la interpolación realizada será exponencial y no lineal, ya que se entiende que cuanto mayor sea la desviación más difícil será repetir la medida y por lo tanto menor fiabilidad tendrá (Figura 4.29).

Por ello, el ajuste exponencial hace que un mayor valor de desviación tengo un castigo más severo sobre las desviaciones pequeñas. Por poner un ejemplo, para conseguir repetibilidad y reproducibilidad en un proceso de mecanizado, sería preferible obtener una rugosidad media aritmética con un valor medio de 15 µm y una desviación de 1 µm, que una rugosidad media aritmética con un valor de 10 µm y una desviación de 9 µm.

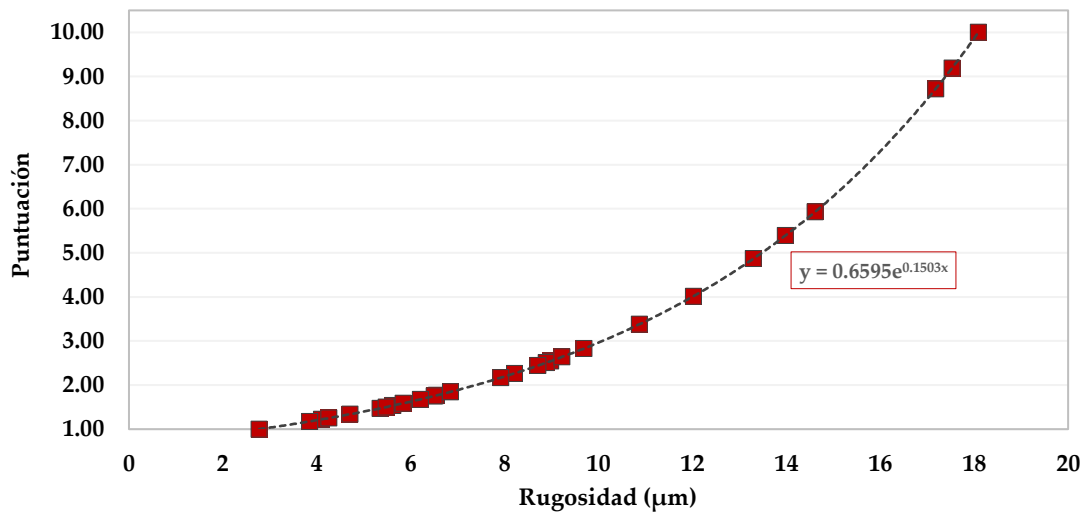


Figura 4.29. Representación gráfica de las desviaciones de Rz para la estrategia a favor ponderados del 1 al 10 mediante una interpolación exponencial

4.4.1. Análisis de las variables de salida ponderadas

En la Tabla 4.8 se muestran los valores medios y desviaciones de Rz obtenidos tras el fresado periférico, en este caso ponderados del 1 al 10. Para realizar las interpolaciones lineal y exponencial se ha seleccionado el valor mínimo y máximo de cada estrategia, de cada valor medio y de cada desviación. De la misma forma se ha procedido con los datos mostrados en la Tabla 4.9 con los datos de Ra y ángulo de conicidad generados en AWJM. Se ha distinguido también entre valor medio y desviación de cada variable. Mediante esta ponderación se puede ver como todas las variables de salida se muestran bajo la misma codificación lo cual implica que, aunque sean variables diferentes entre sí, comparten elementos en común que serán de utilidad para su posterior comparativa.

Una vez tabulados los datos con los que se va a realizar la comparativa, se procede a graficarlos para facilitar la comprensión del sistema empleado en esta discusión. Así, en la Figura 4.30 se grafican los valores medios de las diferentes calidades obtenidas para el postprocesado AWJM y el fresado periférico.

Como se puede ver, en esta gráfica carece de sentido comparar los diferentes resultados obtenidos mediante el eje x, ya que, este muestra una rugosidad en μm que en el caso de AWJM es la rugosidad media aritmética y en el caso del fresado es el valor Rz. No obstante, este eje será de ayuda para complementar la información obtenida por las interpolaciones lineales.

Tabla 4.8. Valores medios y desviaciones ponderadas de Rz en las estrategias a favor y en contra

Herramienta	Ensayo	Velocidad de corte V_c [rpm]	Avance por diente V_f [mm/diente]	Estrategia a favor		Estrategia en oposición	
				Rz Medio	Desviación Rz	Rz Medio	Desviación Rz
A	1	1000	0.03	1.28	1.22	3.10	2.87
	2	1000	0.05	2.74	1.18	3.70	2.51
	3	1000	0.07	1.03	1.34	1.93	1.90
	4	3000	0.03	1.00	1.76	4.26	6.46
	5	3000	0.05	3.06	2.27	3.22	1.95
	6	3000	0.07	1.03	1.76	1.79	1.01
B	1	1000	0.03	2.82	1.25	6.30	4.30
	2	1000	0.05	10.00	4.02	10.00	3.85
	3	1000	0.07	1.73	1.00	2.11	1.57
	4	3000	0.03	2.20	1.47	1.77	3.22
	5	3000	0.05	5.11	1.85	2.84	1.49
	6	3000	0.07	9.24	2.54	1.59	1.13
C	1	1000	0.03	5.32	9.19	4.54	1.60
	2	1000	0.05	3.97	2.51	4.36	2.17
	3	1000	0.07	2.57	2.83	3.49	3.70
	4	3000	0.03	6.26	5.39	1.32	1.15
	5	3000	0.05	4.16	2.64	2.21	1.39
	6	3000	0.07	2.63	1.75	1.00	1.00
D	1	1000	0.03	2.14	4.87	8.84	10.00
	2	1000	0.05	2.02	1.53	4.92	1.41
	3	1000	0.07	4.78	1.50	4.83	2.05
	4	3000	0.03	5.48	1.59	3.93	2.14
	5	3000	0.05	7.02	2.17	4.81	1.74
	6	3000	0.07	7.68	5.93	3.98	2.48
E	1	1000	0.03	3.54	8.72	5.15	2.20
	2	1000	0.05	2.90	2.44	4.78	1.63
	3	1000	0.07	5.89	3.38	6.81	1.83
	4	3000	0.03	5.13	10.00	3.91	1.61
	5	3000	0.05	4.31	1.68	2.29	1.21
	6	3000	0.07	5.73	1.85	4.00	1.13

En primer lugar, se puede ver como la pendiente de cada regresión lineal marca una tendencia clara para conjunto de rugosidad estudiado. De esta forma, se puede ver como el valor de la pendiente implica valores de rugosidad más cercanos o lejanos entre sí, por ende, una mayor o menor precisión del mecanizado. En el caso de la rugosidad media aritmética (R_a) para el mecanizado AWJM, la pendiente tiene un valor de 4.1284, haciendo que el conjunto de datos de R_a se encuentre muy cercanos entre sí en lo que al eje X se refiere, es decir, en lo que a valores de rugosidad se refiere.

En el caso del fresado periférico, los conjuntos de datos a favor y en oposición aparecen con una tendencia menos elevada, es decir, con una pendiente más pequeña que la del caso de la Ra. La pendiente obtenida para el fresado periférico con una estrategia a favor es 0.2148 y para la estrategia en oposición 0.0988. Estos datos hablan por sí mismos, mostrando en la gráfica una gran dispersión entre los valores de cada uno de los conjuntos. Así, para la estrategia a favor los valores de Rz se muestran entre 17 y 60 μm , aproximadamente, y para la estrategia en oposición se observan valores entre 23 y 115 μm .

De la misma forma, en la Figura 4.31 se muestran las regresiones exponenciales de las desviaciones de cada conjunto de datos analizado en la gráfica anterior. En este caso el parámetro más influyente en la comparativa será el exponente de cada ecuación representada.

Tabla 4.9. Valores medios y desviaciones ponderadas de Ra y taper (T) obtenidos en AWJM

Ensayo	Presión (P) [bar]	Velocidad de avance (V) [mm/min]	Caudal de abrasivo (A) [g/min]	T Medio	Desviación de T	Ra Medio	Desviación de Ra
1	1200	100	170	3.89	1.97	5.54	3.73
2	1200	100	340	5.04	1.65	10.00	2.60
3	1200	300	225	6.81	1.97	8.02	3.85
4	1200	500	170	10.00	5.36	3.15	5.53
5	1200	500	340	9.89	1.00	9.09	1.18
6	2500	100	225	1.64	2.75	4.96	10.00
7	2500	300	170	2.36	2.40	3.31	7.44
8	2500	300	225	2.36	1.54	4.80	1.69
9	2500	300	225	4.85	10.00	4.67	1.87
10	2500	300	225	4.08	8.12	3.15	1.64
11	2500	300	225	3.05	3.58	2.82	1.10
12	2500	300	225	3.50	3.44	5.67	3.49
13	2500	300	225	4.08	1.89	3.77	1.22
14	2500	300	340	4.87	2.99	5.67	1.07
15	2500	500	225	6.60	1.72	4.72	7.20
16	3400	100	170	1.19	2.00	1.00	1.00
17	3400	100	340	2.09	8.70	5.67	5.35
18	3400	300	225	1.00	1.82	5.62	7.69
19	3400	500	170	1.58	2.40	4.55	7.44
20	3400	500	340	1.58	2.79	4.67	9.36

Así, un mayor exponente implicará una mayor cercanía de los datos graficados y por ende una menor desviación del conjunto de datos. Como era de esperar, las tendencias de estas regresiones se comportan de manera similar a las regresiones lineales. De mayor a menor, los exponentes obtenidos para cada regresión serían:

exponencial de Ra (AWJM) con un exponente de 3.2894, exponencial de Rz a favor con un exponente de 0.1503 y exponencial de Rz en oposición con un exponente de 0.0547.

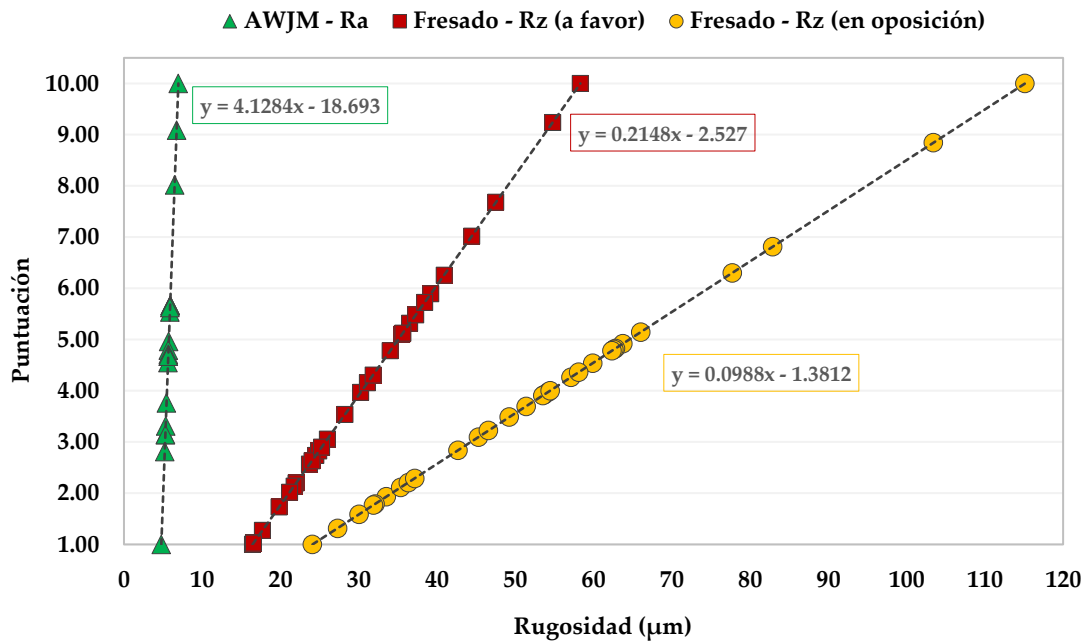


Figura 4.30. Valores medios de la calidad superficial obtenidos en los diferentes postprocesados. De izquierda a derecha aparece: Ra – AWJM; Rz (a favor) – Fresado Periférico y Rz (en oposición) – Fresado Periférico

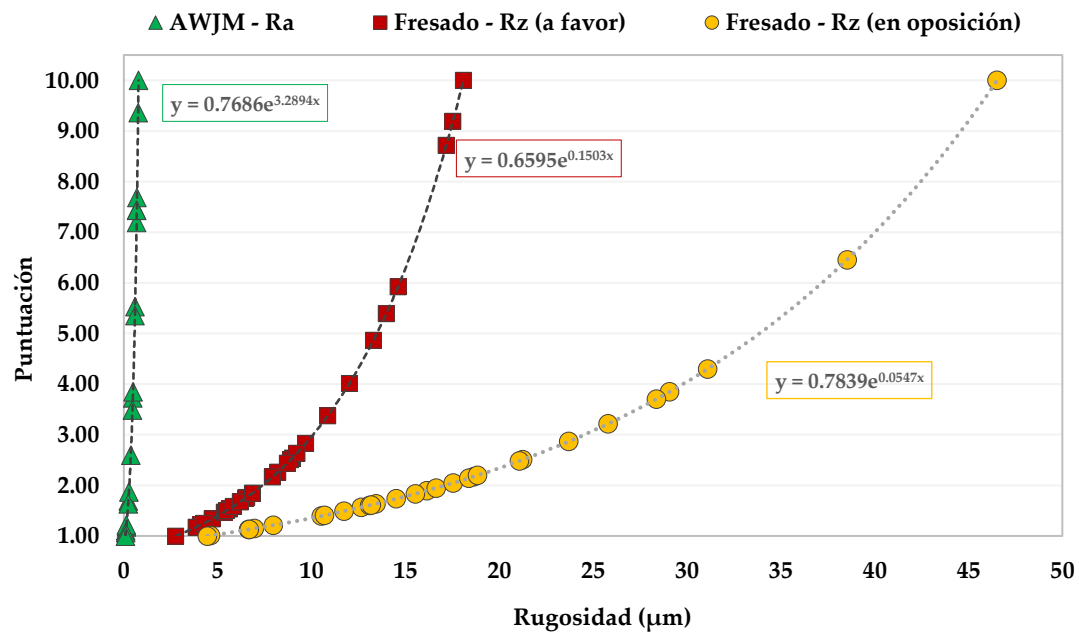


Figura 4.31. Desviaciones de la calidad superficial obtenida en los diferentes postprocesados. De izquierda a derecha aparece: Ra – AWJM; Rz (a favor) – Fresado Periférico y Rz (en oposición) – Fresado Periférico

Estas gráficas permiten verificar varias discusiones realizadas en apartados anteriores. En primer lugar, la estrategia en oposición realizada en el fresado periférico

da resultados peores en cuanto a calidad superficial se refiere en comparativa con la estrategia a favor. La dispersión entre sus valores triplica la dispersión de los datos obtenidos en la estrategia a favor.

Tal y como se comentó en apartados anteriores la estrategia en oposición genera una fuerza de cizalla menor entre el diente de la herramienta y el material a mecanizar. Este fenómeno en las aleaciones metálicas puede ser favorable, pero para los materiales compuestos una menor fuerza de corte puede hacer que las fibras se deformen, pero no se rompan, lo cual puede dar lugar a una menor calidad superficial final obtenida durante el mecanizado y, por ende, una mayor dispersión de los valores de R_z obtenidos. Estos resultados son coherentes con otros estudios, en los que diferentes autores observan un mejor mecanizado en CFRP siguiendo la estrategia de fresado ascendente [4–6]. Además, aunque no haya sido cuantificado, el deshilachado de las fibras aparece en mayor medida en el lado derecho de la ranura, es decir, cuando la herramienta mecaniza en oposición.

Por otro lado, cualquier valor de R_z obtenido por cualquier herramienta empleada en el experimento tanto en la estrategia a favor como en la estrategia en oposición da lugar a unos resultados de calidad superficial mucho más dispersos que los obtenidos en el corte por chorro de agua con abrasivo. Aunque los parámetros R_a y R_z no sean comparables entre ellos, sí se puede hablar de la dispersión de los datos y, por ende, de la precisión del mecanizado.

Tanto en el fresado periférico como en el corte por agua se produce una fuerza de arranque de material perpendicular a la herramienta de corte que provoca en el efecto de cizalla en el material pasando por las fases deformación – rotura. Esta fuerza está provocada por la velocidad de avance que tenga la herramienta en cada tecnología. En cambio, en el mecanizado por chorro de agua se añade una fuerza perpendicular al material provocada por la energía cinética que lleva intrínseca la presión hidráulica seleccionada para realizar el corte.

Este conjunto de fuerzas aplicadas de forma constante en AWJM, junto a las menores temperaturas que aparecen en el proceso y a una evacuación de viruta instantánea que no intercede entre la herramienta y el material a mecanizar, hace que la tecnología de chorro de agua con abrasivo sea una mejor alternativa para el mecanizado de CFRTTPs que el fresado periférico, otorgando una mayor precisión en la toma de datos analizados.

Con el fin de complementar el análisis, en la Figura 4.32 se muestran los valores medios y desviaciones obtenidos para el ángulo de conicidad generado en AWJM. El valor de la pendiente de la regresión lineal es 1.6043 y el valor del exponente en la regresión exponencial es 1.3871. Estos valores están por encima de los obtenidos para

cualquier estrategia en el fresado periférico. Lo cual recalca la precisión con la que la tecnología por chorro de agua con abrasivo realiza el mecanizado de este material compuesto de resina termoplástica de bajo espesor.

Por último, tras las discusiones realizadas anteriormente y bajo la ponderación realizada en este apartado, no cabe duda de que la tecnología de corte por chorro de agua con abrasivo ha generado unos resultados más precisos que serán en mayor medida reproducibles y repetibles y, por ende, será la tecnología empleada en la Fase 2 del experimento, dejando a un lado, al menos en esta ocasión, el estudio del fresado periférico de materiales compuestos de matriz termoplástica.

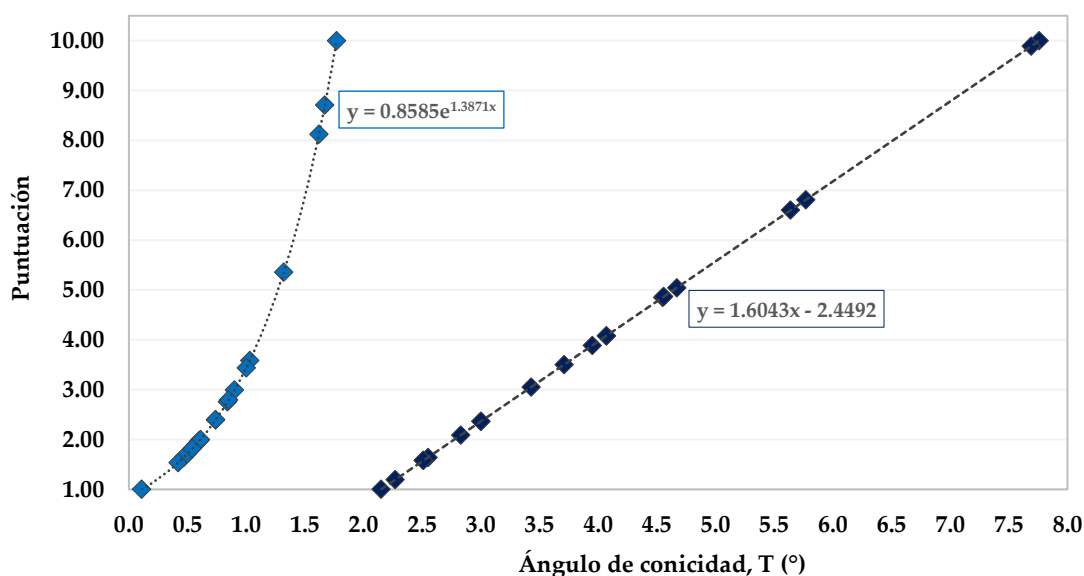


Figura 4.32. Valores medios y desviaciones ponderadas del ángulo de conicidad o taper obtenido en AWJM

4.5. Estudio extendido del postprocesado AWJM: Influencia de la configuración del material

En este apartado se va a analizar el postprocesado de 7 planchas de fibra de carbono termoplástico designadas como A, B, C, D, E, F, G en su conformado con AWJM. Todas las planchas se han fabricado mediante termoconformado, aplicando presión y temperatura durante un tiempo de curado. A cada una de estas planchas se les han realizado ensayos de tracción y cortadura interlaminar para conocer sus propiedades, las cuales han sido mostradas en la Tabla 3.2.

En este apartado se expondrán los resultados de una inspección visual mediante las macrografías obtenidas en las ranuras tras la realización del postprocesado por chorro de agua con abrasivo, para analizar defectos, combinaciones de parámetros y la fabricación de las planchas. Posteriormente, se realizarán diferentes representaciones

gráficas de los datos obtenidos para la calidad superficial en términos de Ra y Rz; además del ángulo de conicidad generado en cada una de las ranuras.

Tabla 3.2. Propiedades mecánicas de las 7 planchas empleadas en este trabajo

Designación	Resistencia a tracción (Mpa)	Módulo elástico (GPa)	Resistencia a flexión (MPa)	Módulo de flexión (GPa)	Resistencia a compresión (MPa)	Resistencia al cizallamiento (MPa)
A	754	23.4	620	9.1	142	8.1
B	742	24.1	582	8.8	157	9.9
C	751	26.8	631	8.1	136	8.3
D	732	24.5	590	8.9	156	9.1
E	757	23.8	628	8.9	148	8.1
F	749	27.8	640	8.4	136	9.8
G	748	26.5	629	8.0	144	8.8

4.5.1. Análisis de la defectología obtenida en función de la configuración del material

En este apartado se exponen las macrografías obtenidas mediante Microscopía Óptica Estereoscópica de las ranuras de corte tras el postprocesado. En principio, la misión de estas macrografías era la misma que para los experimentos de la Fase 1: corroborar los valores, mejores o peores, de calidad superficial o defectos geométricos mediante las imágenes reales de las ranuras. Sin embargo, la obtención de las imágenes ha otorgado resultados significativos para la discusión de los experimentos.

En la Figura 4.33 se muestran macrografías de la sección de corte tomadas de las planchas A, B y C, como se puede ver con dos tipos de macrografías diferentes. La primera de ellas, la Figura 4.33.a, tiene una luz telescópica señalando la superficie exterior de la fibra con el fin de mostrar defectos que puedan surgir a la entrada del mecanizado como por ejemplo rebaba en forma de resina termoplástica tal y como se aprecia en dicha figura. En cambio, en las Figura 4.33.b y Figura 4.33.c, se han orientado las luces telescópicas al canal de corte, omitiendo la superficie de la fibra. Tal y como se explicó en el Capítulo 3. Metodología, esto se realiza para definir la geometría generada por el chorro de agua y, así poder definir el ángulo de conicidad en la zona de corte suave (SCR).

Independientemente a lo comentado en el párrafo anterior, este apartado pretende dejar claro de forma visual el buen estado que presente el canal de corte obtenido tras el mecanizado en estas planchas. Este resultado se extrapola también a las planchas E y D. En esas cinco planchas (A, B, C, D, E) el canal de corte se encuentra tan bien definido que permite una aplicación correcta de la metodología de obtención del ángulo de conicidad. Además, al obtener resultados de la calidad superficial en términos de Ra y Rz, la sección de corte también se encuentra en el mismo estado por lo que la

medición se puede realizar con claridad y además y más importante, defectos como el deshilachado de la fibra, las delaminaciones internas o la rebaba de la resina termoplástica no interfieren en la obtención de estos resultados.

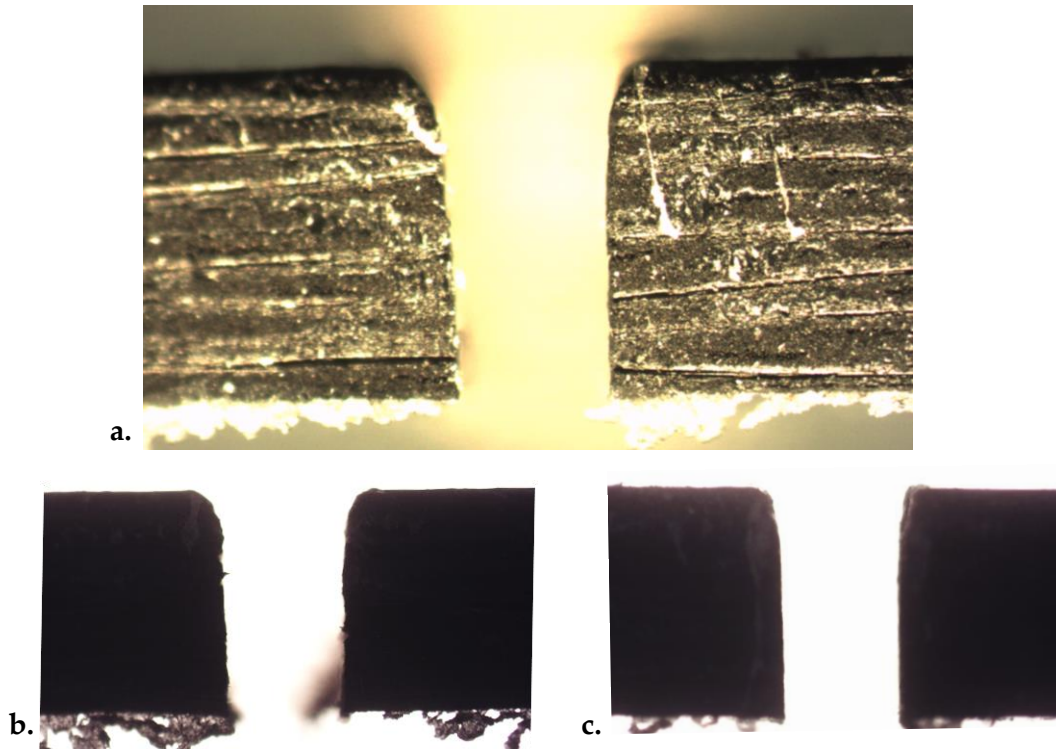


Figura 4.33. Macrografías realizadas a x2.5 de la sección de corte a la entrada de varias fibras mecanizadas mediante AWJM: a. Plancha A; b. Plancha B; c. Plancha C

Esto no ocurre con el mecanizado resultante de las planchas F y G donde, tal y como se aprecia en la Figura 4.34 la obtención del ángulo de conicidad y la calidad superficial se hace imposible.

Llegados a este punto se desea recordar que las combinaciones de parámetros empleadas en estos mecanizados han sido las mismas en las 7 planchas analizadas. En dicha figura se pueden ver toda clase de defectos. Entre ellos aparecen deshilachados de fibras que se han deformado, pero no han llegado a ser mecanizadas por el chorro de agua. Delaminaciones provocadas entre las capas de la fibra y la resina tal y como se aprecia en la imagen superior central de la Figura 4.34 donde en la cara superior del compuesto, el material ha delaminado y se ha deformado dejando una superficie curva.

Parece que este resultado puede haber sido provocado por una falta de porcentaje de resina aplicado a la hora de consolidar el material compuesto. Un mayor porcentaje de resina podría haber hecho que las fibras de carbono (no pre-impregnadas previamente) se adhirieran de una mejor manera entre sí. Esto podría haber hecho que las planchas de material compuesto F y G soportaran los esfuerzos provocados por el

chorro de agua. Por otro lado, se puede obtener otra deducción sobre el tiempo de curado empleado en el proceso de fabricación. Así, un tiempo de curado insuficiente puede provocar que la resina no alcance la temperatura suficiente para volverse maleable y poder hacer de componente adhesivo entre elementos del material compuesto.

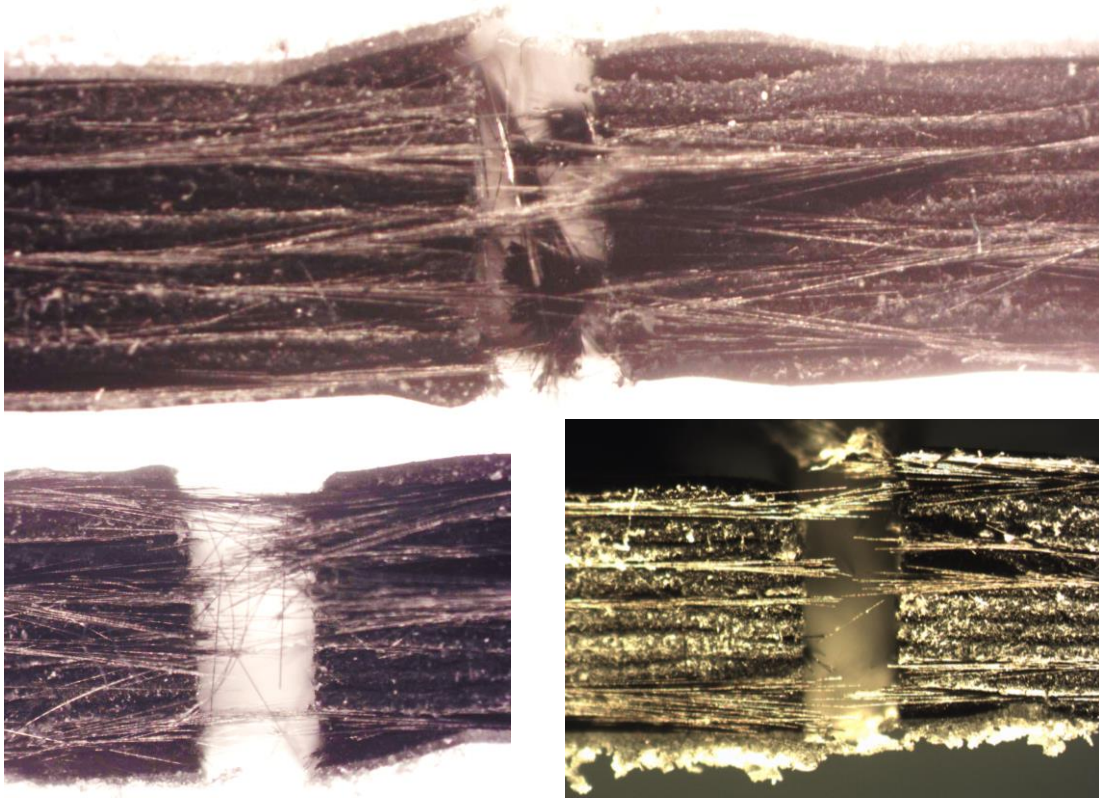


Figura 4.34. Macrografías realizadas a x2.5 de la sección de corte a la entrada de varias fibras mecanizadas mediante AWJM donde se aprecia el deshilachado de las fibras

Todo esto ha provocado que las planchas F y G no hayan sido examinadas en mayor profundidad ya que se entiende que, al haber sido mecanizadas con las mismas combinaciones de parámetros, el problema viene originado por alguno de los elementos influyentes en el proceso de fabricación del CF RTP.

Por lo tanto, en los siguientes subapartados de esta fase experimental se analizarán en términos geométricos y de calidad superficial únicamente las planchas A, B, C, D y E, las cuales presentan una ranura de corte lo suficientemente aceptable como para ser medible.

4.5.2. Análisis preliminar de los resultados obtenidos

En este experimento se van a discutir dos sucesos ocasionados tras el mecanizado por chorro de agua de las 5 planchas de CF RTP (A, B, C, D, y E). En primer lugar, se va a desarrollar un subapartado donde se va a demostrar, al igual, que en la fibra

mecanizada en la Fase 1, que el caudal de abrasivo es la variable menos influyente en el proceso de corte, dando la posibilidad de fijar dicho valor para los análisis posteriores. Por otro lado, se va a desarrollar otro subapartado donde se podrá ver la proporción entre las variables de salida Ra y Rz. Este fenómeno es poco común sobre todo en materiales compuestos, por lo que es necesario incidir en ello de cara a los análisis posteriores.

4.5.2.1. Influencia de presión, velocidad y caudal de abrasivo en la calidad superficial

Como se comentó en el Capítulo 3. Metodología se han combinado los parámetros presión hidráulica, velocidad transversal y caudal de abrasivo con 3 niveles cada uno, dando lugar a un diseño de 27 ranuras totales en cada una de las 5 planchas de CF RTP (Tabla 4.10).

Tabla 4.10. Valores medios de Ra para las 5 planchas analizadas: A, B, C, D y E; en función de la presión hidráulica (P), la velocidad transversal (V) y el caudal de abrasivo (A)

Ensayo	P [bar]	V [mm/min]	A [g/min]	Plancha A Ra Medio [μm]	Plancha B Ra Medio [μm]	Plancha C Ra Medio [μm]	Plancha D Ra Medio [μm]	Plancha E Ra Medio [μm]
1	1200	100	170	3.59	4.29	4.07	3.38	3.59
2	1200	100	225	3.57	3.89	3.51	3.39	3.86
3	1200	100	340	3.27	3.48	3.57	3.02	3.27
4	1200	300	170	3.79	4.17	3.96	3.46	3.79
5	1200	300	225	4.06	4.07	3.56	3.75	4.14
6	1200	300	340	4.51	4.52	4.49	4.14	4.51
7	1200	500	170	3.70	3.93	4.05	4.59	3.70
8	1200	500	225	4.71	3.62	4.37	5.38	4.44
9	1200	500	340	4.09	4.23	4.25	3.84	4.09
10	2500	100	170	3.21	3.47	3.57	3.63	3.21
11	2500	100	225	3.13	3.10	3.02	2.95	3.22
12	2500	100	340	3.27	3.00	3.43	3.17	3.27
13	2500	300	170	3.78	3.35	4.18	3.75	3.78
14	2500	300	225	3.44	3.77	4.50	3.53	4.00
15	2500	300	340	3.52	3.78	3.91	3.78	3.52
16	2500	500	170	4.03	3.78	4.14	3.39	4.03
17	2500	500	225	4.08	4.09	4.55	3.51	3.56
18	2500	500	340	3.51	4.05	3.33	3.55	3.51
19	3400	100	170	2.78	3.50	3.12	2.78	2.78
20	3400	100	225	3.68	3.68	3.70	3.32	2.82
21	3400	100	340	3.20	3.10	3.27	3.29	3.20
22	3400	300	170	3.11	3.47	3.50	3.33	3.11
23	3400	300	225	3.83	3.49	3.63	3.37	3.39
24	3400	300	340	3.45	3.26	3.33	3.33	3.45
25	3400	500	170	3.35	3.58	3.92	3.54	3.35
26	3400	500	225	3.26	3.24	3.80	3.33	3.39
27	3400	500	340	3.42	3.12	3.46	3.76	3.42

Mediante el análisis de la varianza se puede ver la influencia de estos parámetros de entrada en las variables de salida obtenidas. Para realizar esta discusión se ha decidido elegir los valores medios de la variable Ra como variable de salida y los parámetros presión, velocidad y caudal de abrasivo como parámetros de entrada.

Todos los valores obtenidos se muestran en la A continuación, se procede a realizar el análisis de la varianza del valor medio de Ra para cada una de las planchas de CFRTP, de esta forma se podrá ver la influencia de los parámetros en cada plancha.

Además, en la Tabla 4.11 se muestra el valor p y el valor F obtenido para cada parámetro de entrada (P, V y A) en función a la Ra obtenida en cada plancha. Un menor valor de p implica una mayor influencia del parámetro en la variable de salida. De la misma forma, un mayor valor de F implica una mayor influencia. Si se analiza la plancha A se puede ver como la presión hidráulica tiene un valor p de 0.001, junto a la velocidad de avance que tiene un valor p de 0.003. Sin embargo, el caudal de abrasivo tiene valor p de 0.491.

Tabla 4.11. Valores p y F resultantes del análisis de la varianza realizado para los valores medios de Ra

		Valor F	Valor P
Plancha A	P (bar)	16.08	0.001
	V (mm/min)	11.83	0.003
	A (g/min)	0.50	0.491
Plancha B	P (bar)	18.94	0.000
	V (mm/min)	2.60	0.125
	A (g/min)	0.57	0.461
Plancha C	P (bar)	6.71	0.019
	V (mm/min)	8.62	0.009
	A (g/min)	0.88	0.361
Plancha D	P (bar)	8.81	0.009
	V (mm/min)	13.06	0.002
	A (g/min)	0.00	0.986
Plancha E	P (bar)	37.11	0.000
	V (mm/min)	16.15	0.001
	A (g/min)	0.74	0.401

Esto implica que los parámetros de entrada más influyentes en la plancha A son la presión y la velocidad de avance. Además, la presión parece ser más influyente que la velocidad debido al valor F. La presión tiene un valor F de 16.08 mayor que el de la velocidad de avance 11.83.

Este análisis se repite en todas las planchas analizadas en este experimento. De tal forma que el caudal de abrasivo siempre es la variable menos influyente en los resultados obtenidos, llegando incluso a un valor F igual a 0 en algunos casos, por ejemplo, en la plancha D, lo que implicaría que la influencia es nula.

Por otro lado, mediante este análisis no se puede asegurar qué variable es más influyente si la presión hidráulica o la velocidad de avance. Ambos parámetros van alternando su influencia en función a la plancha que se analice. De esta forma en las planchas A, B y E la presión tiene un mayor valor F y un menor valor P que la velocidad de avance, en cambio en las planchas C y D ocurre justamente lo contrario. Este último análisis será discutido en apartados posteriores.

Como resumen, cabe señalar la poca influencia del caudal de abrasivo en planchas de CF RTP de 2 mm de espesor. En base al análisis de la varianza realizado y de cara a análisis y discusiones posteriores se ha decidido dejar fijo el caudal de abrasivo en su valor intermedio, 225 g/min.

4.5.2.2. Análisis de la relación entre los parámetros de rugosidad Ra y Rz

En este experimento la combinación de la presión hidráulica y la velocidad de avance han dado lugar a 9 ensayos por plancha de CF RTP (A, B, C, D y E). Cabe recordar que el caudal de abrasivo es una de las variables menos influyentes en el proceso de corte y por ello se ha mantenido fija en su valor intermedio de los 3 escogidos para el experimento de la Fase 1, a 225 g/min. Las variables de salida cuantificadas en este experimento han sido el ángulo de conicidad o taper y la calidad superficial de la superficie generada en términos de Ra y Rz. En primer lugar, el análisis se centrará en los resultados obtenidos para la calidad superficial debido a una relación que existe entre la variable Ra y Rz que será discutida a continuación.

En la Tabla 4.12 se muestran los valores medios de Ra y Rz obtenidos en el experimento junto al ratio Rz/Ra que forman estas dos variables para cada uno de los ensayos de cada plancha. Debido a una gran similitud entre los valores obtenidos es necesario repetir esta información añadiendo el ratio entre ambos parámetros. Así, se puede ver cómo existe una similitud entre los valores del ratio Rz/Ra para todos los ensayos realizados. Incluso si se analiza el ratio promedio por plancha (última columna de la Tabla 4.12) se puede ver cómo los valores son prácticamente idénticos entre sí, oscilando entre 5.88 y 5.99.

Esto implica una gran similitud entre la variable Rz y la variable Ra medida en cada sección de la ranura. La Figura 4.35 muestra esta relación en una de las planchas del experimento, el material compuesto designado como A. En el eje vertical izquierdo de la figura corresponde a la variable Ra, y el eje vertical derecho corresponde a la variable Rz. A simple vista se puede apreciar la relación comentada anteriormente entre dichas variables. Los datos se encuentran prácticamente en el mismo nivel de altura por lo tanto en el mismo nivel de rugosidad Ra y Rz, respectivamente. Esto ocurre en todas las 5 planchas analizadas tal y como se puede observar en los valores de la Tabla 4.12.

Tabla 4.12. Ratio entre los valores medios de Ra y Rz

Plancha	Ensayo	Presión (P) [bar]	Velocidad de avance (V) [mm/min]	Ra Medio [μm]	Rz Medio [μm]	Ratio Rz/Ra	Ratio Medio
A	1	1200	100	3.57	21.86	6.13	5.96
	2	1200	300	4.06	23.58	5.80	
	3	1200	500	4.71	27.14	5.76	
	4	2500	100	3.13	18.63	5.95	
	5	2500	300	3.44	20.69	6.02	
	6	2500	500	4.08	23.96	5.87	
	7	3400	100	3.68	22.99	6.25	
	8	3400	300	3.83	22.75	5.95	
	9	3400	500	3.26	19.22	5.90	
B	1	1200	100	3.89	22.77	5.86	5.88
	2	1200	300	4.07	24.09	5.92	
	3	1200	500	3.62	20.59	5.68	
	4	2500	100	3.10	18.45	5.96	
	5	2500	300	3.77	20.32	5.39	
	6	2500	500	4.09	23.32	5.71	
	7	3400	100	3.68	21.74	5.90	
	8	3400	300	3.49	22.65	6.48	
	9	3400	500	3.24	19.48	6.02	
C	1	1200	100	3.51	21.45	6.12	5.93
	2	1200	300	3.56	20.57	5.78	
	3	1200	500	4.37	25.44	5.82	
	4	2500	100	3.02	19.07	6.32	
	5	2500	300	4.50	26.90	5.98	
	6	2500	500	4.55	24.36	5.35	
	7	3400	100	3.70	23.15	6.25	
	8	3400	300	3.63	20.63	5.69	
	9	3400	500	3.80	23.03	6.05	
D	1	1200	100	3.39	20.36	6.01	5.97
	2	1200	300	3.75	22.58	6.03	
	3	1200	500	5.38	31.27	5.81	
	4	2500	100	2.95	18.19	6.17	
	5	2500	300	3.53	20.20	5.73	
	6	2500	500	3.51	19.82	5.65	
	7	3400	100	3.32	21.30	6.42	
	8	3400	300	3.37	19.53	5.80	
	9	3400	500	3.33	20.25	6.08	
E	1	1200	100	3.86	24.36	6.30	5.99
	2	1200	300	4.14	23.48	5.67	
	3	1200	500	4.44	23.74	5.35	
	4	2500	100	3.22	19.05	5.91	
	5	2500	300	4.00	23.81	5.96	
	6	2500	500	3.56	22.51	6.32	
	7	3400	100	2.82	17.02	6.04	
	8	3400	300	3.39	20.75	6.12	
	9	3400	500	3.39	21.19	6.25	

Este fenómeno ha sido analizado por otros autores en varios experimentos. Así, Palásti-Kovács et al. [39], en su artículo llegaron a definir relaciones entre Rz y Ra para diferentes procesos de mecanizado. Palásti-Kovács et al., estudian como tras realizar diferentes ranuras en fresado las relaciones entre Rz y Ra se encuentran en el rango 5.36-5.83.

Por otro lado, la mecanizar dichas ranuras con chorro de agua con abrasivo la relación entre las variables se encuentra entre 4.91-6.99. La relación más llamativa viene con el proceso de pulido en la cual el rango Rz/Ra se encuentra entre 8.33 y 8.67.

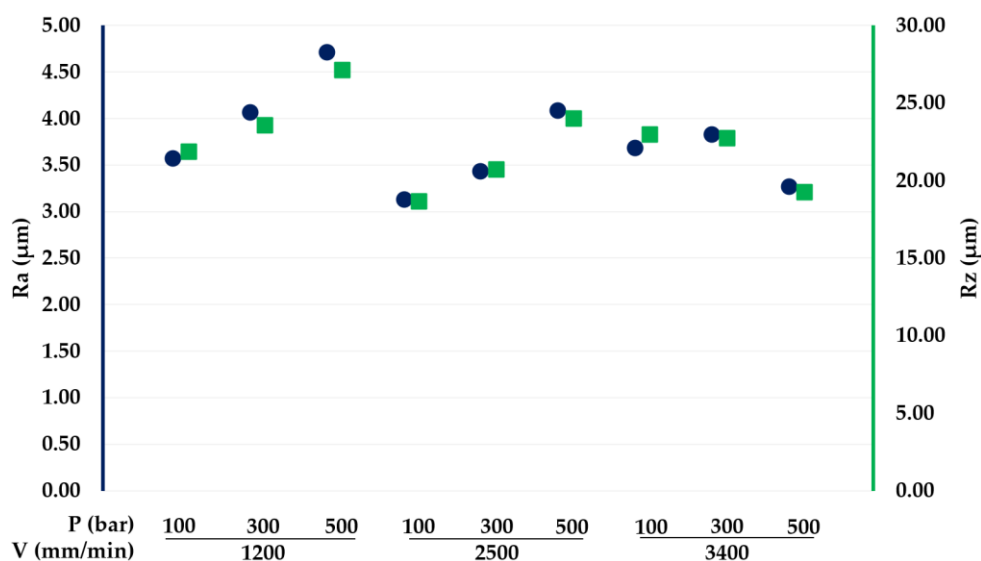


Figura 4.35. Representación gráfica de los valores medios de Ra y Rz obtenidos en la plancha A

Estas relaciones se suelen dar en material metálicos, los cuales tras realizar una operación de mecanizado suelen dejar una superficie más homogénea pudiendo dar lugar a este fenómeno. En cambio, los materiales compuestos de fibra de carbono suelen generar secciones de corte más aleatorias, con delaminaciones internas, deshilachados de fibras o exceso de resina no mecanizada. En esta ocasión se puede ver se obtiene un rango de valores de Ra más bajo para 5 fibras diferentes (2.82 - 5.38 μm) que el rango obtenido para la fibra de la Fase 1 (4.77 - 6.95 μm), por lo que se puede llegar a la conclusión que los parámetros de fabricación de las 7 planchas han sido modificados dando lugar a un compuesto más consolidado. Además, este fenómeno ocurrido entre Ra y Rz, puede haber sido influenciado por la resina termoplástica empleado en el material compuesto. Como bien se ha comentado en otros apartados, el poliuretano empleado como resina tiene una temperatura de transición vítrea de 145 °C, esto da lugar a que dicha resina sea más moldeable que algunas resinas termoestables.

Este análisis permite hacer la deducción de que las variables son proporcionales entre sí, con una proporción numérica de 6 entre ellas. Esto da lugar a que el análisis de los resultados obtenidos en la Fase 2 del experimento pueda llevarse a cabo únicamente

con una de las variables mostradas. Por lo tanto, con el fin de no repetir información en este manuscrito se ha decidido analizar en profundidad la variable Ra, ya que es el término más utilizado por diferentes sectores industriales como el aeronáutico. Los valores obtenidos para la variable Rz se irán mencionando de forma complementaria a lo largo de la discusión con el fin de detallar alguna información relevante.

4.5.3. Análisis del parámetro Ra

En la Tabla 4.13 se muestran los valores medios y las desviaciones de Ra obtenidos mediante la medición de la variable en las tres zonas de la sección de la ranura de corte (entrada, centro y salida) en cada plancha de CF RTP empleado en este experimento.

Al igual que en el experimento de la Fase 1, en los resultados obtenidos no existe una gran diferencia entre las tres regiones evaluadas por ello se ha decidido trabajar en este caso con los valores medios y sus desviaciones. Como se comentó en apartados anteriores, en comparación con resultados obtenidos en artículos científicos [23,24] tampoco se observa la formación de una tercera zona más rugosa. Todo ello podría haber sido afectado por el bajo espesor del material aplicado en el experimento.

Tabla 4.13. Valores de Ra generados en la Fase 2 del experimento (A = 225 g/min)

Ensayo	P [bar]	V [mm/min]	Plancha A Ra Medio [$\mu\text{m} \pm \mu\text{m}$]	Plancha B Ra Medio [$\mu\text{m} \pm \mu\text{m}$]	Plancha C Ra Medio [$\mu\text{m} \pm \mu\text{m}$]	Plancha D Ra Medio [$\mu\text{m} \pm \mu\text{m}$]	Plancha E Ra Medio [$\mu\text{m} \pm \mu\text{m}$]
1	1200	100	3.57 $\pm$ 0.33	3.89 $\pm$ 0.19	3.51 $\pm$ 0.31	3.39 $\pm$ 0.11	3.86 $\pm$ 0.31
2	1200	300	4.06 $\pm$ 0.57	4.07 $\pm$ 0.58	3.56 $\pm$ 0.39	3.75 $\pm$ 0.13	4.14 $\pm$ 0.34
3	1200	500	4.71 $\pm$ 0.49	3.62 $\pm$ 0.23	4.37 $\pm$ 0.05	5.38 $\pm$ 0.36	4.44 $\pm$ 0.26
4	2500	100	3.13 $\pm$ 0.27	3.10 $\pm$ 0.38	3.02 $\pm$ 0.04	2.95 $\pm$ 0.22	3.22 $\pm$ 0.30
5	2500	300	3.44 $\pm$ 0.36	3.77 $\pm$ 0.26	4.50 $\pm$ 0.98	3.53 $\pm$ 0.45	4.00 $\pm$ 0.10
6	2500	500	4.08 $\pm$ 0.45	4.09 $\pm$ 0.17	4.55 $\pm$ 0.12	3.51 $\pm$ 0.43	3.56 $\pm$ 0.33
7	3400	100	3.68 $\pm$ 0.23	3.68 $\pm$ 0.20	3.70 $\pm$ 0.27	3.32 $\pm$ 0.28	2.82 $\pm$ 0.16
8	3400	300	3.83 $\pm$ 0.39	3.49 $\pm$ 0.63	3.63 $\pm$ 0.53	3.37 $\pm$ 0.15	3.39 $\pm$ 0.13
9	3400	500	3.26 $\pm$ 0.13	3.24 $\pm$ 0.15	3.80 $\pm$ 0.46	3.33 $\pm$ 0.05	3.39 $\pm$ 0.51

Analizando todos los valores del conjunto, se puede ver cómo se han obtenido valores medios de Ra menores que los obtenidos para la plancha de CF RTP empleada en el experimento de la Fase 1. Las 7 planchas utilizadas en este experimento se han fabricado con condiciones de fabricación diferentes a las empleadas en la fibra del primer experimento.

Aunque la empresa facilitadora del material no ha comentado las condiciones exactas de la fabricación, se estima que el tiempo de curado ha sido mayor, introduciendo incluso un ciclo de curado más para aumentar el consolidado del refuerzo y la matriz. Esto da lugar a los valores tan bajos de Ra obtenidos en este experimento en

comparación con el anterior, consiguiendo valores medios que se encuentran entre 2.95 y 5.38 μm .

En general en la mayoría de ensayos, los valores más altos de R_a se observan en las combinaciones correspondientes a presiones hidráulicas bajas, siendo el valor 1200 bar junto a la velocidad de avance 500 mm/min la combinación que ha generado los valores más altos del experimento. Por otro lado, cabe señalar la combinación de parámetros generado por una presión de 2500 bar y una velocidad de avance de 100 mm/min, en la cual se han generado los valores mínimos de R_a . Todo ello será analizado a continuación mediante gráficas marginales de los resultados obtenidos.

A continuación, se muestran una serie de figuras que contienen gráficas marginales generadas para facilitar la comprensión del análisis llevado a cabo (Figuras 4.38 - 4.42). Cada una de las figuras corresponde a cada una de las 5 planchas analizadas en este experimento. Además, se muestran barras que representan el valor medio de R_a para cada velocidad de avance junto con sus desviaciones y una línea discontinua representando el valor medio de la R_a obtenido para cada presión analizada.

En la Figura 4.38 se muestra el análisis marginal para la plancha A. Tal y como se puede ver en la figura, la disminución de valores de R_a a medida que aumenta la presión hidráulica es significativa. Esto supone una mayor energía cinética a la vez que aumenta dicha presión, obteniendo valores más cercanos entre sí con desviaciones más pequeñas. Un aumento de la presión proporciona un aumento de la energía cinética al chorro de agua y a las partículas abrasivas que lo acompañan, aumentando así su capacidad de corte [23,32]. Debido a esto, los valores de rugosidad obtenidos para una presión de 1200 bar son más elevados que el resto, incluso el mayor tamaño de las desviaciones muestra la aleatoriedad posible al realizar un corte con menos energía cinética.

Este efecto se ve propagado en el resto de planchas estudiadas en este experimento. Así, las Figuras 4.39 – 4.42 muestran tendencias similares de R_a al aumentar la presión hidráulica. En apartados anteriores se demostró mediante el análisis de la varianza de los resultados obtenidos que la presión hidráulica era el parámetro más influyente en cuanto a calidad superficial se refiere. Esta influencia en algunos casos era más acusada para el parámetro de velocidad de avance (planchas C y D).

En la Figura 4.40 correspondiente a la plancha C se puede ver como la disminución de R_a respecto al aumento de la presión hidráulica no es tan relevante tal y como indicaba el análisis de la varianza. En la Figura 4.41 correspondiente a la plancha D, hay gran similitud entre los resultados obtenidos para presiones de 2500 y 3400 bar. Sin embargo, se aprecia un pico de rugosidad para la presión de 1200 bar a velocidades de 500 mm/min.

Tal y como se ha comentado, la pérdida de energía cinética provocada por una baja presión hidráulica junto a la dispersión del chorro de agua generada por las altas velocidades de avance, puede ocasionar que el corte realizado no sea homogéneo pudiendo llegar a generar delaminaciones internas como la mostrada en la Figura 4.36. Esto es habitual en el mecanizado de materiales compuestos [28,32,37], donde las partículas abrasivas junto a velocidades altas y presiones bajas facilitan la eliminación de la matriz termoplástica, lo cual puede dar lugar a que las partículas abrasivas eliminen las fibras de carbono de esa zona y produzcan la delaminación.

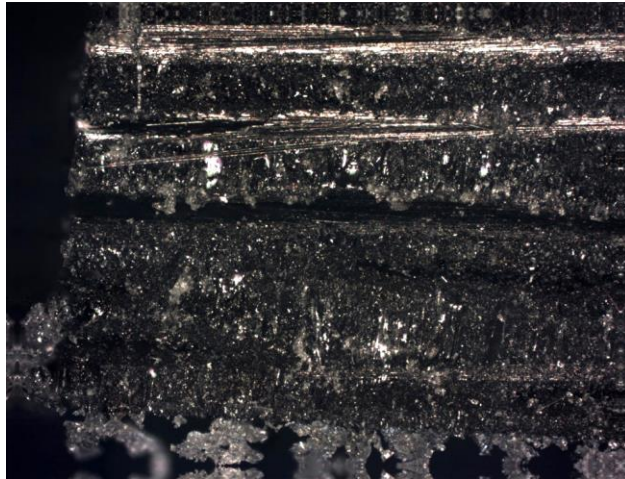


Figura 4.36. Delaminación interna provocada en la plancha D para una combinación de 1200 bar y 500 mm/min

Respecto a la velocidad de avance, en la Figura 4.38 se puede ver como en términos generales, a medida que aumenta este valor también lo hace la rugosidad generada en la superficie. Al mecanizar la ranura con una velocidad de avance más elevada el chorro de agua se podría dispersar provocando una divergencia que provoque la pérdida de capacidad de corte a lo largo de la ranura de mecanizado. De la misma forma, tal y como se observa para la presión de 2500 bar, las desviaciones aumentan junto a los valores medios. Esto se debe a que una mayor velocidad aumenta la aleatoriedad de los resultados obtenidos debido a la divergencia del chorro y, por ende, la pérdida de la energía cinética. Si la velocidad transversal no es adecuada el efecto erosivo provocado durante el mecanizado puede aumentar.

La velocidad 100 mm/min es la más conservadora del experimento y esto se muestra en los resultados obtenidos, donde para 1200 y 2500 bar aparecen los valores más bajos de R_a en comparación con el resto de velocidades analizadas. Para la presión de 3400 bar, tal y como se ha comentado anteriormente, la capacidad de corte aplicada en el proceso aumenta, lo cual puede dar lugar a que el efecto de la energía cinética sea tan elevado que iguale los valores de R_a obtenidos para las 3 velocidades, independientemente de la velocidad que se haya seleccionado.

La tendencia ascendente provocada por el aumento de la velocidad de avance se extrapola al resto de análisis marginales (Figuras 4.39 – 4.42). En líneas generales, el mecanizado en las planchas B, C, D y E muestran resultados similares. En la mayoría de casos una velocidad de 100 mm/min ofrece los valores de Ra más bajos en casi todos los ensayos realizados. Sin embargo, se debe tener cuidado con la acción erosiva del chorro de agua a velocidades de avance bajas. Un exceso de partículas abrasivas incidiendo sobre el material pueden afectar a la entrada del material durante un cierto tiempo produciendo un aumento de la rugosidad tras la ejecución del corte [9,33]. Esto se puede apreciar en ensayos como el que corresponde a la plancha B con presión 1200 bar y velocidad de avance 100 mm/min, donde la rugosidad a dicha velocidad es superior a la obtenida a 500 mm/min. Por otro lado, un exceso de velocidad de avance podría indicar que no se mecaniza todo el espesor de forma homogénea, generando variaciones a lo largo del espesor de la ranura mecanizada [24]. Además, la pérdida de homogeneidad a la hora de llevar a cabo el corte puede dar lugar a efectos en la resina termoplástica. Por ejemplo, en la Figura 4.37 se puede apreciar la resina adherida a la superficie inferior del CF RTP. La energía proporcionada por el chorro para realizar el corte no ha sido suficiente como para eliminar la resina en el canal de corte, deformándola y dejándola adherida a dicha superficie.

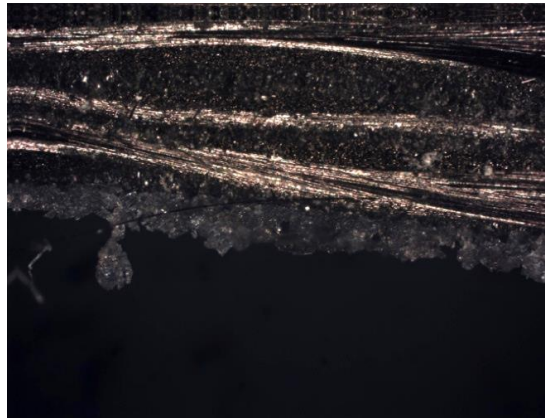


Figura 4.37. Efecto de matriz termoplástica no desprendida provocada en la plancha C bajo condiciones de corte P 1200 bar y V 500 mm/min

Por otro lado, se puede ver un mismo patrón producido en todas las planchas de fibra de carbono termoplástica analizadas. En esta ocasión la combinación de parámetros P 2500 bar y la velocidad de avance 100 mm/min es la que mejor calidad superficial genera en todas las planchas, es decir, la que ha obtenido los valores más bajos de Ra. En la Tabla 4.14 se pueden ver los resultados obtenidos para esta combinación de parámetros junto a las propiedades mecánicas más relevantes en el estudio del corte por chorro de agua.

Tabla 4.14. Resultados de Ra más bajos junto a propiedades mecánicas de las diferentes planchas (P 2500 bar, V 100 mm/min)

Ensayo	Ra [μm]	Resistencia a cizalla [MPa]	Resistencia a compresión [MPa]	Resistencia a tracción [MPa]	Resistencia a flexión [MPa]
A	3.13	8.1	142	754	620
B	3.10	9.9	157	742	582
C	3.02	8.3	136	751	631
D	2.95	9.1	156	732	590
E	3.22	8.1	148	757	628

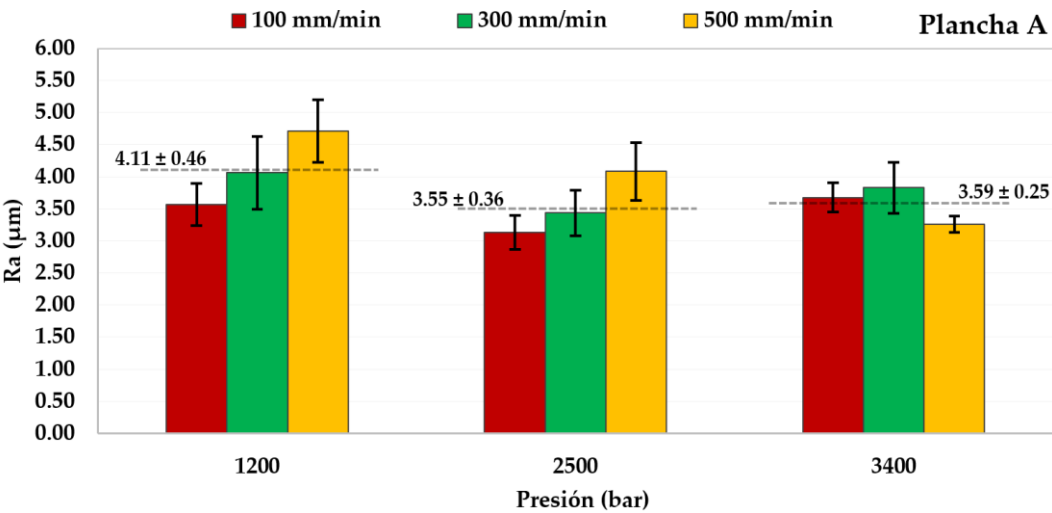


Figura 4.38. Representación gráfica de los valores medios y desviaciones de Ra en función a la presión hidráulica y la velocidad de avance para la plancha A

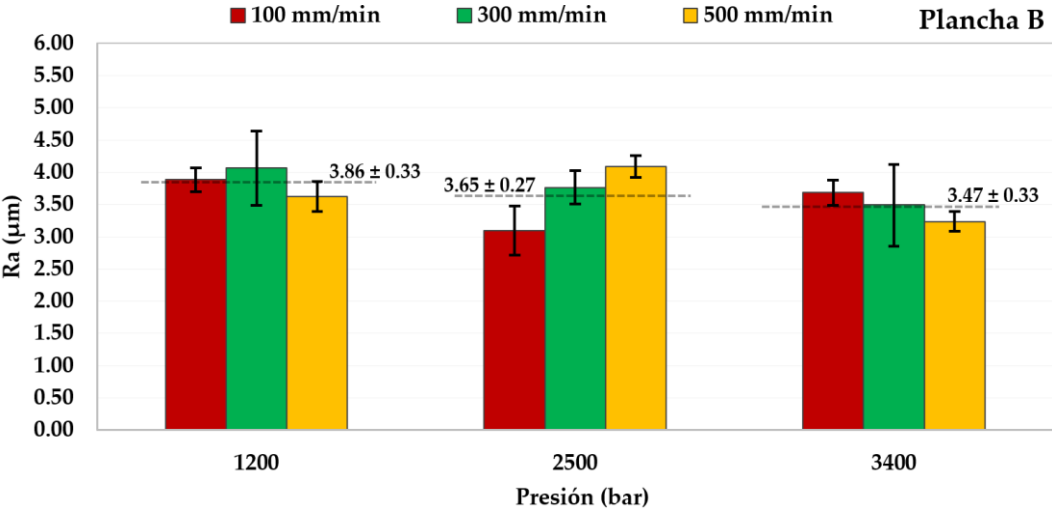


Figura 4.39. Representación gráfica de los valores medios y desviaciones de Ra en función a la presión hidráulica y la velocidad de avance para la plancha B

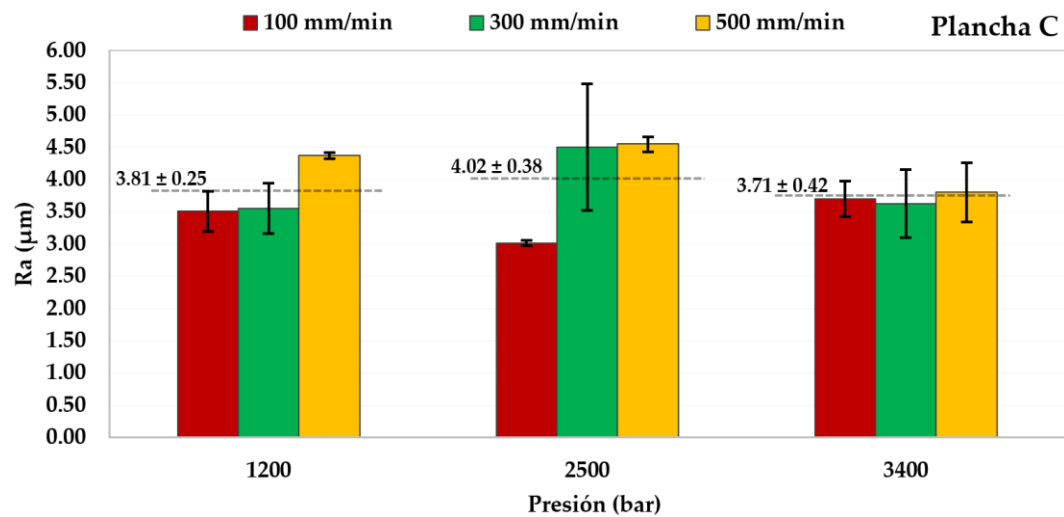


Figura 4.40. Representación gráfica de los valores medios y desviaciones de Ra en función a la presión hidráulica y la velocidad de avance para la plancha C

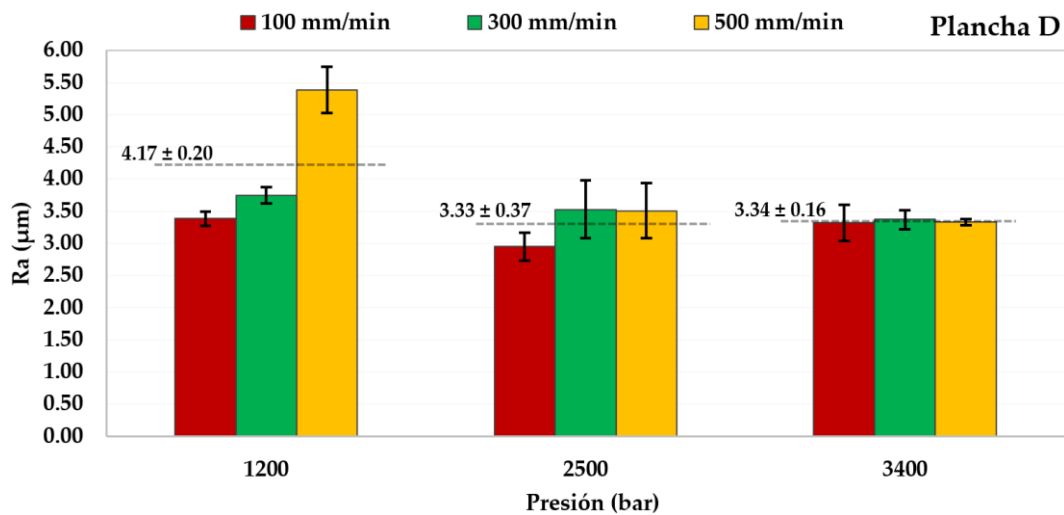


Figura 4.41. Representación gráfica de los valores medios y desviaciones de Ra en función a la presión hidráulica y la velocidad de avance para la plancha D

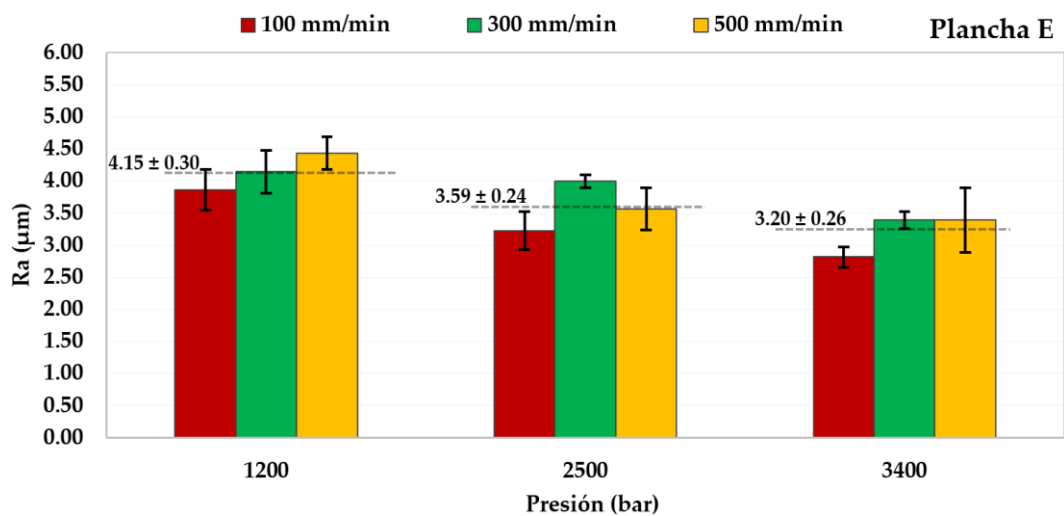


Figura 4.42. Representación gráfica de los valores medios y desviaciones de Ra en función a la presión hidráulica y la velocidad de avance para la plancha E

La plancha A junto a la plancha E muestran las menores resistencias al cizallamiento de las 5 planchas analizadas, siendo de 8.1 MPa. Esta propiedad puede ser definida como la carga necesaria para producir una fractura en la interfase de unión entre dos materiales al aplicar una fuerza perpendicular a ellos. Aunque es cierto que los diferentes valores de resistencia al cizallamiento obtenidos en las planchas son muy similares entre ellos teniendo como valor mínimo 8.1 MPa y como máximo 9.9 MPa, puede que este valor haya afectado a la calidad superficial obtenida, otorgando desviaciones mayores a aquellas planchas que muestra una resistencia al cizallamiento menor.

Además, en la Tabla 4.14 se puede ver como la diferencia máxima entre valores de Ra obtenidos para la combinación seleccionada es de 0.18 μm . De la misma forma ocurre con las propiedades mecánicas obtenidas para las diferentes planchas, siendo la diferencia entre ellas demasiado pequeña como para poder sacar discusiones para cada plancha de CF RTP. Este fenómeno es de gran importancia para el estudio ya que, define que 5 planchas de CF RTP de 2 mm de espesor fabricadas por termoconformado con condiciones de fabricación diferentes y con propiedades mecánicas similares, pueden dar lugar a valores de Ra muy cercanos entre ellos.

Por este motivo se ha decidido analizar los valores medios de Ra totales obtenidos mediante los valores de las 5 planchas de CF RTP analizadas anteriormente. En la Tabla 4.15 se presentan los valores de Ra resultantes y en la Figura 4.43 la representación gráfica de los mismos mediante un sistema de barras similar al utilizado en gráficos anteriores.

Tabla 4.15. Valores de Ra obtenidos mediante la media de las 5 planchas de CF RTP analizadas

Ensayo	P [bar]	V [mm/min]	Ra Medio Total [$\mu\text{m} \pm \mu\text{m}$]
1	1200	100	3.64 ± 0.25
2	1200	300	3.92 ± 0.40
3	1200	500	4.51 ± 0.28
4	2500	100	3.08 ± 0.24
5	2500	300	3.85 ± 0.43
6	2500	500	3.96 ± 0.30
7	3400	100	3.44 ± 0.23
8	3400	300	3.54 ± 0.37
9	3400	500	3.40 ± 0.26

Mediante esta representación gráfica se puede ver como la velocidad de avance hace que los valores de Ra aumentan a medida que dicho parámetro lo hace también. En cambio, se aprecia como la influencia de la velocidad disminuye a medida que la presión hidráulica aumenta, llegando a estabilizarse para 3400 bar.

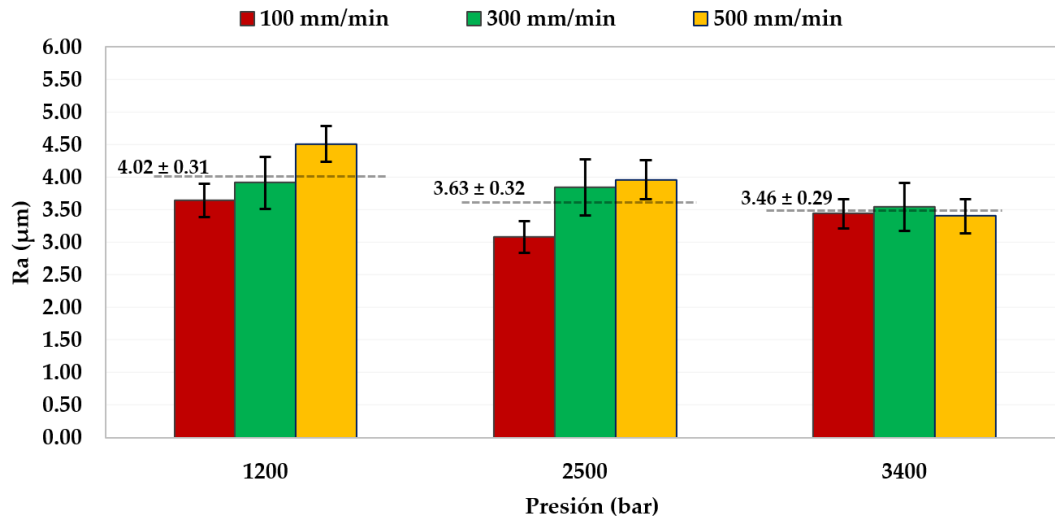


Figura 4.43. Representación gráfica de los valores medios de Ra obtenidos mediante los valores de Ra de las 5 planchas de CF RTP

En esta presión los valores de Ra son los más cercanos entre sí mostrando además la desviación más pequeña obtenida para 100 mm/min. Aunque, tal y como ha sido comentado, estos valores de Ra no son los más pequeños de los analizados si no que la presión de 2500 bar y la velocidad de avance de 100 mm/min genera el resultado de Ra menor, es decir, la calidad superficial mejor del mecanizado.

Se ha realizado un análisis de la varianza con los resultados de Ra obtenidos, con el fin de obtener un modelo cuadrático de segundo orden que de lugar a la Ec. 4.3. la cual presenta un R^2 del 80%. Tal y como era de esperar la mayor influencia de los resultados obtenidos se muestra para la presión hidráulica y la velocidad de avance teniendo ambas un valor P igual a 0. En el caso del caudal de abrasivo el valor p obtenido es de 0.892 lo que confirma su poca influencia y todo lo analizado anteriormente.

$$Ra = 3.78 - 0.2938P + 0.2387V - 0.0068A + 0.0466P * P - 0.1603V * V - 0.0980A * A - 0.0926P * V - 0.0062P * A + 0.0118V * A \quad \text{Ec. 4.3}$$

Dada la similitud entre resultados de Ra obtenidos en las diferentes planchas analizadas se puede llegar a la siguiente deducción. La ecuación 4.3 permite obtener un valor de Ra aproximado tras un mecanizado por chorro de agua en el que actúen la presión hidráulica, la velocidad de avance y el caudal de abrasivo como parámetros de entrada, siempre y cuando la fibra de carbono muestre un rango de propiedades mecánicas similares a las empleadas en este experimento.

4.5.4. Análisis del ángulo de conicidad

Tras haber realizado el análisis de la calidad superficial obtenida en las 5 planchas estudiadas, se ha llegado a la conclusión de que el caudal de abrasivo es la

variable menos influyente en dicha variable. Esto concuerda con la influencia de parámetros analizadas en el ángulo de conicidad de la Fase 1 del experimento.

En esta ocasión se ha decidido partir de esa información con el fin de fijar el parámetro caudal de abrasivo en un valor de 225 g/min. De esta forma en la Tabla 4.16 se pueden ver los resultados de ángulo de conicidad o taper obtenidos para las combinaciones de presión hidráulica y velocidad de avance empleadas en cada una de las planchas de CF RTP.

Tabla 4.16. Valores de taper por plancha de CF RTP generado en la Fase 2 del experimento

Ensayo	P	V	Plancha A	Plancha B	Plancha C	Plancha D	Plancha E
	[bar]	[mm/min]	T [°]	T [°]	T [°]	T [°]	T [°]
1	1200	100	3.73	4.51	3.21	4.41	5.85
2	1200	300	5.77	5.42	4.70	6.01	5.91
3	1200	500	6.77	6.26	5.82	6.49	6.50
4	2500	100	2.55	3.98	4.45	2.92	2.78
5	2500	300	3.81	4.40	4.19	4.22	3.14
6	2500	500	5.64	6.18	5.02	4.62	4.63
7	3400	100	1.60	1.07	3.27	2.76	1.47
8	3400	300	2.15	1.98	4.09	2.97	2.73
9	3400	500	2.32	2.09	3.92	3.62	3.49

En primer lugar, cabe señalar que los valores de taper obtenidos en este experimento son algo menores que los resultantes en la Fase 1 del experimento. En la Fase 1 se obtuvieron valores entre 2.15° y 7.69°, en esta ocasión los valores oscilan entre 1.47° y 6.77°. El rango de valores obtenidos para este experimento es habitual entre los ángulos de conicidad resultantes para muchos artículos científicos [18,19,22], aunque se debe tener en cuenta que no existe literatura sobre el análisis del ángulo de conicidad en CF RTPs por lo que los materiales compuestos empleados en otros artículos están fabricados con una resina termoestable. Este tipo de resina al tener una temperatura de transición vítrea mayor que las termoplásticas, permiten una menor susceptibilidad a las fuerzas generadas por el chorro de agua lo que puede dar lugar a cortes más estables y homogéneos.

No obstante resultados como el ángulo de conicidad obtenido para combinación de presión 3400 y velocidad 100 mm/min con un valor de 1.47° es sinónimo de que la fibra mecanizada en este experimento es mucho más estable que la empleada en el experimento 1. En esta ocasión la energía cinética otorgada por el valor más alto de la presión hidráulica junto a la baja velocidad de avance empleada en dicho corte, han conseguido que el material sea mecanizado dando lugar a unas paredes prácticamente verticales, muy cercanas a 0.

En las Figuras 4.44 – 4.48 se muestran el efecto de la presión hidráulica y la velocidad de avance sobre la variación de la conicidad del corte en cada una de las

planchas empleadas en el experimento. Cada color de barra mostrada en la representación gráfica implica una velocidad de avance diferente (100, 300 y 500 mm/min) y cada una de las barras se encuentran agrupadas en función a las diferentes presiones empleadas en el experimento (1200, 2500 y 3400 bar). Además, se ha representado en forma de línea discontinua horizontal el valor medio del ángulo de conicidad obtenido para cada grupo de presiones representadas en la imagen.

Tal y como ocurría en el experimento 1 los valores de taper disminuyen a medida que aumenta la presión hidráulica empleada. Observando los valores medios obtenidos y las presiones, se puede ver como los datos resultantes se ajustan en gran medida a una regresión lineal. Una mayor presión supone un aumento de la energía cinética generada por el chorro de agua. Este aumento de la energía cinética conlleva un mayor arranque de material. En consecuencia, las paredes de la ranura están sometidas a una mayor fuerza de cizalla que provoca una pared final con menos ángulo de inclinación.

Este fenómeno se extiende al resto de representaciones gráficas marginales mostradas en este apartado. No obstante, se puede ver alguna excepción entre todos los datos representados. Por ejemplo, para la plancha C en la Figura 4.46 el valor medio obtenido para una presión de 1200 bar es muy parecido al de la presión de 2500 bar, por lo que la tendencia descendiente que aplica la presión no es tan llamativa en esta plancha. Esto parece ser debido a la combinación de parámetros $P = 2500$ bar y $V = 100$ mm/min, en la cual el valor de taper obtenido es elevado y muy parecido al valor obtenido por 300 mm/min y por lo tanto genera una igualdad entre valores que hace que no descienda el valor medio obtenido.

En líneas generales a velocidades de 100 mm/min debería dar lugar el ángulo de conicidad más bajo de los generados por las 3 velocidades de avance aplicadas. La cantidad de tiempo que ejerce fuerza el chorro de agua sobre el material a velocidades bajas es mayor que a altas velocidades. Esto implica que la energía cinética provocada por el chorro es capaz de introducirse en el material eliminando todo a su paso de forma más homogénea. En esta ocasión este efecto no se ha producido llegando a obtener incluso un valor de ángulo de conicidad más bajo para 300 mm/min que para 100 mm/min.

La aleatoriedad de resultados a la hora de mecanizar materiales compuestos poliméricos reforzados con fibras es un hecho, ya que, la resina puede hacer que el material no se consolide de la forma adecuada a lo largo de la superficie. Si bien, en esta ocasión para la combinación de parámetros empleada no hay indicios de delaminaciones internas y deshilachado de la fibra, si se puede ver a partir del valor del ángulo de taper obtenido que el chorro de agua puede llegar a deformar el material dando lugar a este tipo de situación.

En líneas generales lo comentado anteriormente se muestra de forma similar en artículos como el desarrollado por Dhanawade et al. [18]. Aunque el material compuesto empleado en dicho artículo esté formado por una resina epoxi termoestable, coincide en que un aumento de la presión genera una disminución del defecto de conicidad generado. Lo cual puede llevar a la conclusión de que, si se analiza el parámetro de presión de forma aislada, parece que el tipo de resina empleada en el material compuesto no influye en gran medida en la conicidad generada en el material.

Respecto a la velocidad de avance, se puede ver una tendencia ascendente de forma clara en los valores de taper a medida que aumenta este parámetro. Al aplicar una velocidad de avance menor la conicidad de la ranura conseguida será menor o, en otras palabras, la anchura superior e inferior de la ranura tienen valores más cercanos entre sí.

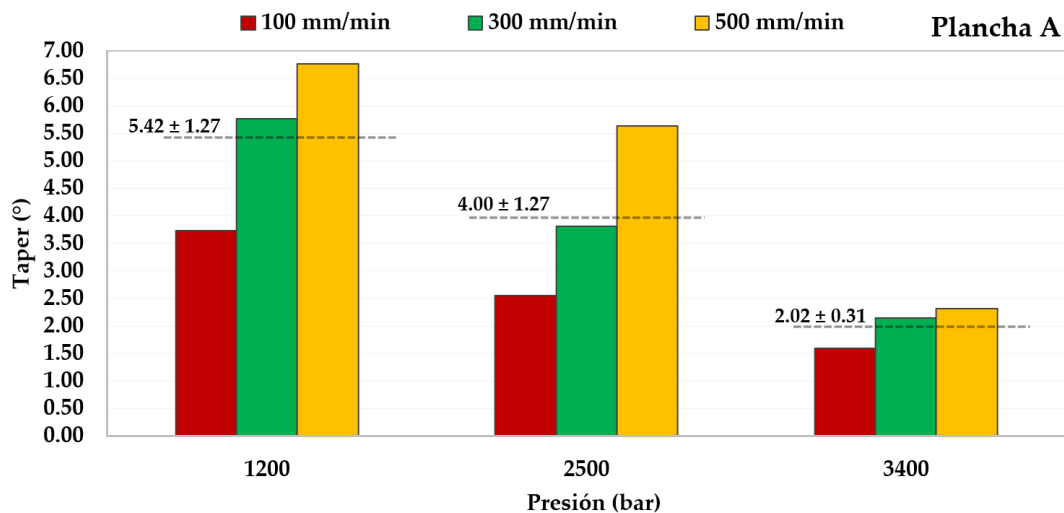


Figura 4.44. Representación gráfica de los valores medios de taper en función a la presión hidráulica y la velocidad de avance para la plancha A

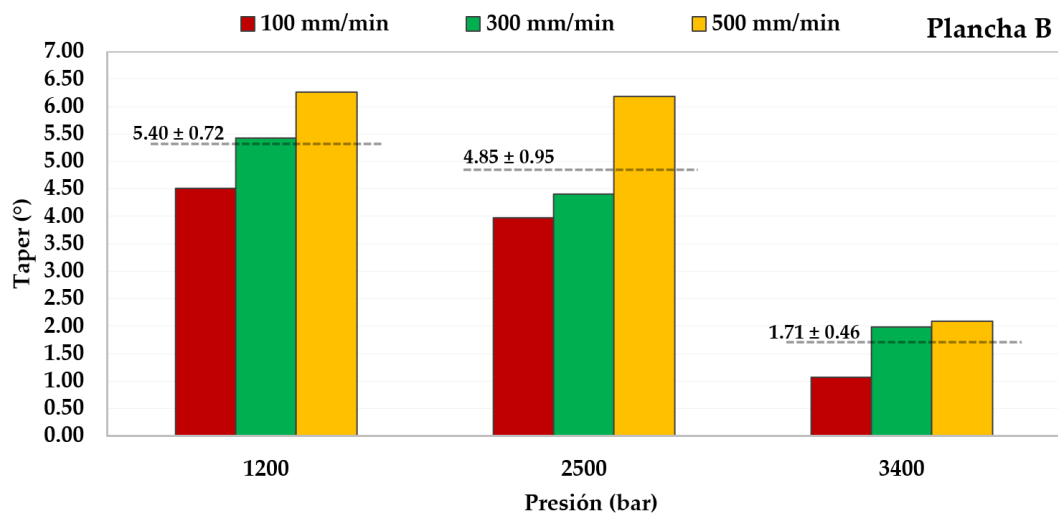


Figura 4.45. Representación gráfica de los valores medios de taper en función a la presión hidráulica y la velocidad de avance para la plancha B

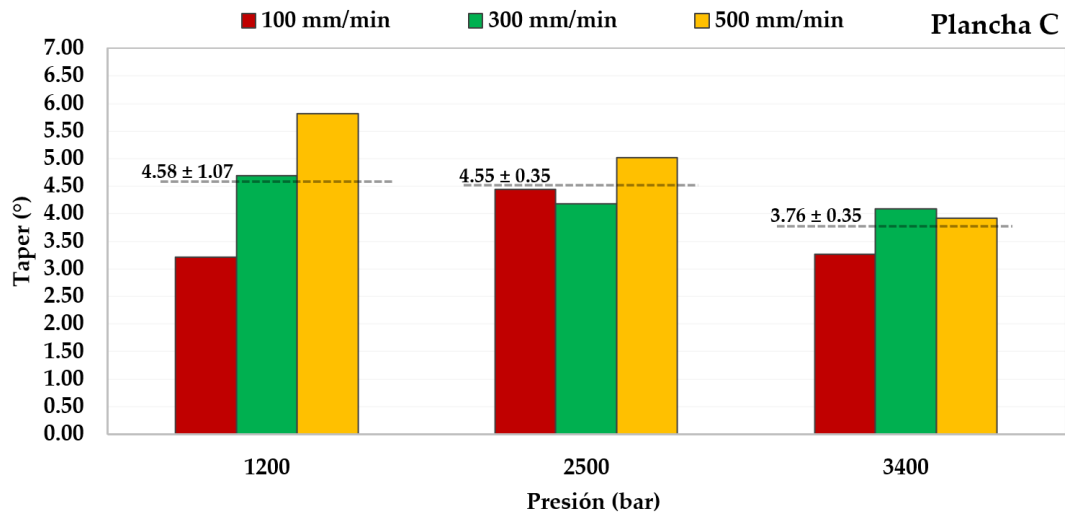


Figura 4.46. Representación gráfica de los valores medios de taper en función a la presión hidráulica y la velocidad de avance para la plancha C

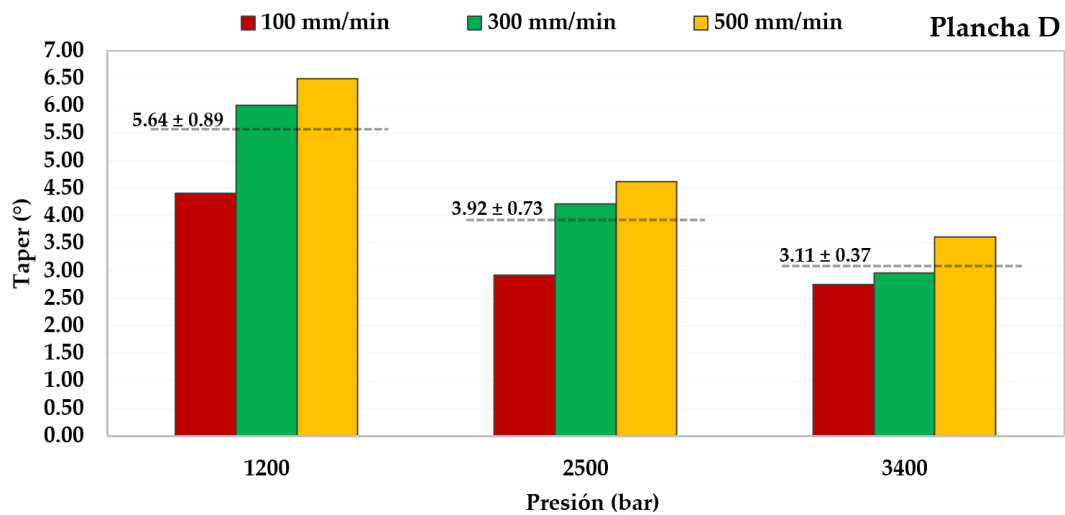


Figura 4.47. Representación gráfica de los valores medios de taper en función a la presión hidráulica y la velocidad de avance para la plancha D

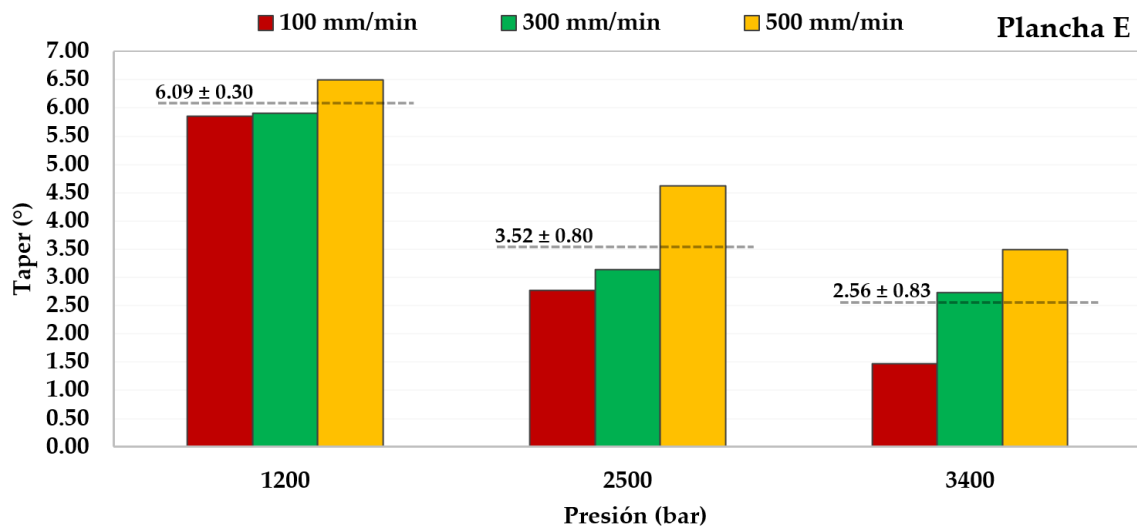


Figura 4.48. Representación gráfica de los valores medios de taper en función a la presión hidráulica y la velocidad de avance para la plancha E

Al aplicar velocidades de avance altas, tal y como se comentó en la fase inicial (Fase 1), se genera una pérdida de energía cinética en el canal de corte. Esto podría producir una disminución de la eliminación de material y una disminución de las partículas abrasivas que afectan a la superficie del material.

Las diferentes capas de fibra de carbono y resina termoplástica aprovechan la energía reducida del chorro de agua para dificultar el paso a través del material compuesto lo cual puede llevar a que las paredes de las ranuras sean menos verticales.

Este fenómeno se ve reflejado en todas las planchas de fibra de carbono analizadas en este experimento, lo cual lleva a concluir la clara influencia de la velocidad de avance en este proceso al mecanizar este tipo de materiales. Esto coincide con otros artículos que estudian el defecto de conicidad en otros tipos de materiales [25,26].

Con el fin de realizar una representación de los valores similar a la empleada con anterioridad para el análisis del valor de Ra, se han obtenido los valores medios de taper totales mediante los valores independientes de las 5 planchas de CFRTP analizadas anteriormente. En la Tabla 4.17 se presentan dichos valores del ángulo de conicidad y en la Figura 4.49 la representación gráfica de los mismos mediante un sistema de barras similar al utilizado en gráficos anteriores.

Tabla 4.17. Valores de taper obtenidos mediante la media de las 5 planchas de CFRTP analizadas

Ensayo	P [bar]	V [mm/min]	T Medio Total [° ± °]
1	1200	100	4.34 ± 0.89
2	1200	300	5.56 ± 0.47
3	1200	500	6.37 ± 0.32
4	2500	100	3.33 ± 0.74
5	2500	300	3.95 ± 0.45
6	2500	500	5.22 ± 0.61
7	3400	100	2.03 ± 0.83
8	3400	300	2.78 ± 0.75
9	3400	500	3.09 ± 0.74

Tal y como se puede ver en la Figura 4.49, se aprecian las dos tendencias claras otorgadas a los parámetros de entrada estudiados: presión hidráulica y velocidad de avance. Un aumento de la presión hace que los resultados de ángulo de taper obtenidos disminuyan de forma clara. Tal y como se ha comentado, la energía cinética provocada por el chorro al trabajar a presiones altas hace que la capacidad de corte durante el mecanizado sea mayor, por lo que el arranque de material es mayor también. Se puede ver como el valor medio de las presiones desciende en torno a 1.3° al aumentar el valor de la presión utilizada.

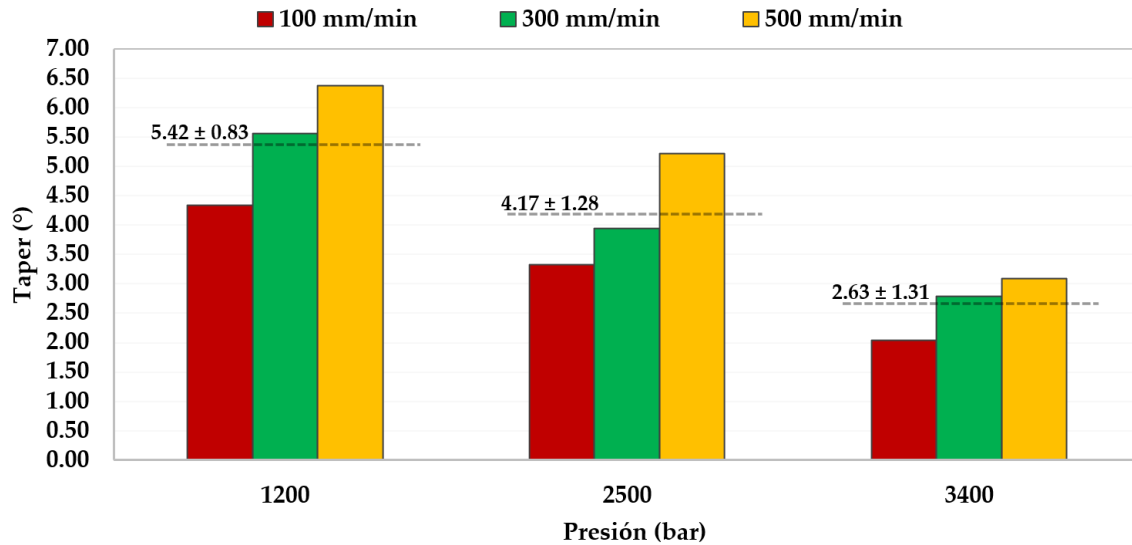


Figura 4.49. Representación gráfica de los valores medios de taper obtenidos mediante los valores de taper de las 5 planchas de CF RTP

El aumento de la velocidad de avance provoca el efecto contrario. Un aumento de dicho parámetro hace que la capacidad de corte a la hora de mecanizar el material compuesto sea menor, lo cual da lugar a ángulos de conicidad más elevados. El valor de taper aumenta en torno a 2° para las presiones de 1200 y 2500 bar. En cambio, cabe señalar que el aumento del taper para la presión de 3400 bar es menor, y se encuentra en 1.06° entre las velocidades de 100 y 500 mm/min. A la hora de trabajar a una presión tan elevada y, según los valores obtenidos, se puede suponer que la influencia de la presión hidráulica es mayor que la de la velocidad de avance, otorgando una menor diferencia entre los valores de taper obtenidos en esta presión.

Por otro lado, se ha realizado un análisis de la varianza con los resultados de taper obtenidos, con el fin de obtener un modelo cuadrático de segundo orden que dé lugar a la Ec. 4.3. la cual presenta un R^2 del 98.96%. Esta ecuación, junto a la mostrada en el apartado anterior para calcular la R_a estimada a partir de los parámetros presión, velocidad de avance y caudal de abrasivo, permite realizar la estimación del ángulo de taper que se va a obtener al trabajar con un material compuesto termoplástico cuyo espesor oscile en torno a 2 mm, siempre y cuando se trabaje con modificaciones de presión y velocidad de avance.

$$T = 4.19 - 1.3948P + 0.8276V - 0.138P * P - 0.035V * V - 0.244P * V \quad \text{Ec. 4.4}$$

De todo lo anteriormente estudiado se puede llegar a la conclusión general de que, aunque el material compuesto mecanizado tenga unas condiciones de fabricación diferentes, la calidad superficial y los defectos de geometría obtenidos en los diferentes cortes, presentan resultados similares entre ellos. Esto da lugar a que se puede llevar a cabo el tratamiento de los datos como si de una única plancha de CF RTP se tratara

siempre y cuando se tenga en cuenta el rango de las propiedades mecánicas en el cual se mueven las diferentes planchas.

4.6. Conclusiones

En este capítulo se han presentado y discutido los resultados obtenidos a partir de la metodología experimental descrita para el postprocesado de CF RTPs. La presentación de resultados ha iniciado con el estudio comparativo de las tecnologías de corte por fresado y chorro de agua con abrasivo, seguida de una conclusión sobre los experimentos realizados. Posteriormente, se ha mostrado la ampliación de resultados para el postprocesado por chorro de agua con abrasivo de 7 planchas de material compuesto termoplástico reforzado con fibras de carbono con diversas configuraciones de material.

En primer lugar, se han analizado las calidades y defectos obtenidos tras el postprocesado mediante fresado. Para llevar a cabo este análisis, se han mostrado las diferencias entre resultados generados por 5 herramientas de corte con diferentes características. En términos de calidad superficial, tal y como se comentó anteriormente, la herramienta convencional de 2 dientes (herramienta A), ha generado los valores Rz más bajos obtenidos en este experimento. La herramienta pulverizadora, B ha producido resultados muy dispares obteniendo valores de rugosidad bajos y altos. Las herramientas híbridas, C, D y E han mostrado valores de Rz ligeramente superiores a los provocados por la herramienta convencional (herramienta A). Sin embargo, estos valores tienen una tendencia bastante más clara que las mostradas por los otros dos tipos de herramientas.

En cuanto al defecto de deshilachado de las fibras, se ha observado como la herramienta convencional (A), obtiene los peores resultados. En todos los ensayos realizados con la herramienta A, este defecto se ha generado de forma homogénea. Se debe tener en cuenta que esta herramienta no está diseñada para realizar el mecanizado de materiales compuestos, lo cual implica que, aunque genere buenas calidades superficiales, no es capaz de eliminar las fibras que se encuentran en la capa superior del material sino, simplemente deformarlas. Algo similar ha ocurrido con la herramienta D, sin embargo, el defecto de esta herramienta se debe a la ausencia de un ángulo de hélice lo cual ha provocado que la viruta en forma de fibra con la resina termoplástica afectada por la temperatura del proceso se consolide bloqueando el canal de evacuación de la herramienta. La herramienta B ha ofrecido en general los mejores resultados en cuanto al deshilachado de las fibras. Tras la utilización de esta herramienta la altura de las fibras deshilachadas encontradas en el material es muy cercana a 0. La herramienta C, con un ángulo de hélice negativo (-10°) proporciona mejores resultados cuando se mecaniza el

CF RTP a una velocidad de corte alta. Por el contrario, la herramienta E, con un ángulo de hélice positivo ($+10^\circ$), se ve afectada por la velocidad de avance.

En general, parece que el fresado periférico del CF RTP lleva intrínseco la creación de una serie de defectos típicos del proceso. Como ya ha sido mencionado, el uso de una matriz termoplástica hace que la temperatura de transición vítrea del material sea inferior a la de una resina termoestable por lo que, el material termoplástico puede verse más afectado por la temperatura del proceso de fresado periférico que el CFRP.

Por otro lado, tras examinar las estrategias de fresado a favor y en oposición con las 5 herramientas utilizadas en este experimento, se ha visto como la estrategia de fresado en oposición, en general, obtiene siempre valores de R_z más altos que los resultantes de la estrategia de fresado a favor. En el fresado periférico en oposición, se genera una fuerza de corte menor cuando la herramienta incide en el material.

Haciendo resumen a nivel cuantitativo de los resultados obtenidos, la herramienta convencional (A) es la que ha obtenido los mejores resultados de R_z , siendo $16.42\ \mu\text{m}$ el valor medio mínimo para el experimento completo. La herramienta B consigue valores medios de R_z bastante bajos, como $19.82\ \mu\text{m}$, pero al mismo tiempo obtiene los valores más altos de todo el experimento, $58.32\ \mu\text{m}$ o $54.78\ \mu\text{m}$. Las herramientas C, D y E tienen un rango de valores similar de aproximadamente 21 a $47\ \mu\text{m}$. Sin embargo, muestran tendencias diferentes entre sí. La herramienta C muestra una disminución de los valores de R_z a medida que aumenta la velocidad de avance. En las herramientas D y E, los valores de R_z aumentan también con el avance. Por otro lado, la herramienta C genera el mínimo deshilachado de las fibras a velocidades de corte de 3000 rpm. La herramienta E, también genera una mínima cantidad de este defecto a bajas velocidades de avance 0.03-0.05 mm/diente.

Asumiendo toda la información discutida y analizada, se puede llegar a la conclusión de que la geometría de herramienta más completa para el mecanizado de compuestos termoplásticos es la herramienta C, con 8 filos de corte y un ángulo de hélice de -10° . Con esta herramienta a velocidades de avance de 0.07 mm/diente y una velocidad de corte de 3000 rpm se han obtenido valores medios de R_z similares a los valores mínimos de todo el experimento completo alcanzados por la herramienta A. Además, con esta combinación de parámetros se consigue un mínimo defecto de deshilachado de fibras.

Siguiendo con el índice que desglosa este capítulo, posteriormente se han presentado los resultados obtenidos para la comparativa de postprocesados mediante chorro de agua con abrasivo. En primer lugar, cabe señalar la obtención de 3 zonas a lo largo del espesor del material: la zona de corte rugoso (RCR) en el 0-10%, la zona de corte suave (SCR) en el 10-75% y la zona de daño inicial (IDR) en el 75-100%. La definición de

las 3 zonas en la sección de corte del CF RTP ha permitido realizar el estudio del ángulo de conicidad y de la calidad superficial de una forma más exacta. En esta ocasión el defecto taper ha sido medido en la zona de corte suave (SCR) y la calidad superficial se ha obtenido a partir de varias medidas tomadas en cada una de las zonas diferenciando, por ende, las calidades en las diferentes zonas del espesor del material.

Mediante el análisis ANOVA realizado se han llegado a deducir una serie de conclusiones. El análisis elaborado para el defecto taper indica que la presión hidráulica y la velocidad de avance son los parámetros más influyentes en el mecanizado por chorro de agua abrasiva. En el caso de la calidad superficial, los parámetros más influyentes han sido la presión hidráulica y el caudal de abrasivo. Asimismo, el modelo matemático obtenido por la metodología de superficie de respuesta analizada para el defecto taper ha presentado un R^2 del 93,85%. El modelo matemático obtenido para la rugosidad media aritmética ha presentado un R^2 del 83%.

Ambas variables estudiadas coinciden en el parámetro de presión hidráulica como más influyente en el proceso. Las paredes de las ranuras mecanizadas se vuelven más verticales a altas presiones, lo cual es debido a una mayor concentración de energía que impacta sobre el material compuesto a mecanizar. Este cúmulo de energía se traduce por tanto en una mayor cantidad de material eliminado tras el proceso.

Por otro lado, para el ángulo de conicidad, la velocidad transversal es el segundo parámetro más influyente en el proceso de mecanizado. En cambio, en el cálculo de la rugosidad media aritmética R_a , el caudal de abrasivo es el parámetro que más influye en el proceso junto a la presión hidráulica. Además, el efecto de la temperatura no parece influir en la calidad de los resultados obtenidos por AWJM.

Tanto para el ángulo de conicidad como para la calidad superficial, se ha hecho uso de un segundo diseño experimental para verificar la ecuación polinómica de segundo orden generada, el cual contrasta las combinaciones de parámetros no utilizadas en el DOE original con los valores predichos por el modelo. En el caso del ángulo de conicidad se ha obtenido un error del 20.49%, y para la calidad superficial en términos de R_a se ha obtenido un error máximo de 12.95%. Estos errores pueden considerarse pequeños si se tiene en cuenta la anisotropía y la naturaleza del material compuesto mecanizado.

Se ha encontrado una combinación de parámetros de corte que minimiza el ángulo de conicidad, resultando en una presión de 3400 bar, una velocidad de avance de 100 mm/min, y un caudal de abrasivo de 340 g/min, produciendo una relación de anchura superior-inferior cercana a 1, es decir, $0,75^\circ$. De la misma manera, se ha encontrado una combinación de parámetros de corte que minimiza el R_a , resultando en

una presión de 3400 bar, un caudal de abrasivo de 170 g/min y una velocidad de avance de 100 mm/min, produciendo un Ra de 4.77 μm .

Se puede ver cómo, trabajar a altas presiones hidráulicas y bajas velocidades de avance es un punto a favor en el postprocesado de materiales compuestos en chorro de agua con abrasivo. Además, tal y como se ha demostrado en el análisis del ángulo de conicidad, el caudal de abrasivo es el parámetro con una tendencia menor respecto a las otras dos variables analizadas. Este dato, junto a la aleatoriedad de resultados provocada por el impacto de las partículas abrasivas y la pérdida de energía cinética de las mismas a lo largo del recorrido de la ranura de corte, hace que este parámetro sea uno de los menos influyentes en el proceso.

Además, mediante este experimento se ha observado que la zona con peor calidad superficial es la zona inicial (IDR) debido al efecto erosivo de las partículas abrasivas, que incluso parecen adherirse a la matriz termoplástica. Incluso la formación de deshilachados a la salida del chorro de agua en la zona de corte rugoso (RCR) puede provocar un deterioro de la calidad superficial del material. Uno de los principales defectos causados por el AWJM en los materiales compuestos termoplásticos es la delaminación interna entre capas del compuesto. Sin embargo, se ha podido ver como este efecto no ha sido provocado en ninguna de las combinaciones de parámetros realizadas en este experimento.

Para concluir, los valores de Ra y de ángulo de conicidad obtenidos son muy cercanos a los de los estudios centrados en compuestos de matriz termoestable. Todo esto incluso teniendo en cuenta que el empleo de una resina termoplástica en un material compuesto puede dificultar su mecanizado debido a propiedades intrínsecas de la matriz.

Tras el desarrollo de los resultados generados para los postprocesados mediante fresado y chorro de agua con abrasivo, se ha presentado una comparación entre ambas tecnologías. Para ello, se han puesto en común los diferentes parámetros de corte, herramientas y variables de salida estudiadas en los experimentos. Con el fin de que la comparativa sea posible a nivel cuantitativo, se ha tratado las variables de salida de la misma forma, realizando una ponderación de los valores medios y desviaciones generadas para cada variable de salida. Se ha llevado a cabo una codificación de los valores, otorgando una regresión lineal a los valores medios y una regresión exponencial a las desviaciones.

En el desarrollo de los valores medios, se ha comprobado que un mayor número en la pendiente obtenida en la regresión implica valores más cercanos entre sí y, por ende, una mayor precisión en el postprocesado realizado. En esta ocasión, al comparar los valores medios de las diferentes calidades analizados en fresado y chorro de agua, se

ha visto como dichos valores de R_a para chorro de agua han conseguido la pendiente más alta, de 4.1284 frente a 0.2148 y 0.09688 de los valores de R_z en fresado con la estrategia a favor y R_z de fresado con la estrategia en oposición, respectivamente.

En el caso de las desviaciones obtenidas para estas variables de salida referidas a la calidad, el exponente de la regresión exponencial es el parámetro más influyente en decidir la cercanía o lejanía de los datos obtenidos y, por ende, una menor desviación del conjunto de datos. Como era de esperar, las tendencias de estas regresiones se comportan de manera similar a las mostradas en las regresiones de los valores medios. De esta forma, la calidad en términos de R_a obtenida para el chorro de agua ha tenido el exponente mayor frente a la calidad obtenida para las dos estrategias de fresado. Gracias a esta codificación de los resultados, se puede llegar a la conclusión de que, aunque los parámetros R_a y R_z no sean comparables entre ellos, se ha podido hablar de dispersión de datos y de precisión del mecanizado.

Además, también se han codificado los valores obtenidos para el ángulo de conicidad generado en chorro de agua, resultando en valores de la pendiente en la regresión lineal y del exponente en la regresión exponencial, están por encima que los generados para cualquier estrategia de fresado. Esto recalca la precisión con la que la tecnología de chorro de agua con abrasivo realiza el corte del material. El conjunto de fuerzas aplicadas en AWJM, junto a las menores temperaturas que pueden aparecer en el proceso y a una evacuación de viruta instantánea que no intercede entre la herramienta y el material, hace que la tecnología de chorro de agua sea una gran alternativa para el postprocesado de CF RTPs.

Posteriormente, se han mostrados los resultados referidos al estudio de la influencia del material y su configuración. Una inspección visual de las macrografías obtenidas de las ranuras de corte tras el postprocesado ha otorgado resultados significativos para la discusión de los experimentos. De esta forma, las macrografías obtenidas para las planchas F y G han demostrado que ha sido imposible realizar una medición cuantitativa de valores como ángulo de conicidad y calidad superficial en dichas planchas. Parece que el resultado de deshilachado de fibras, pérdida de resina y delaminaciones internas mostradas en ambas planchas puede haber sido provocado por una falta de resina aplicada a la hora de conformar el material compuesto. Es por ello, que el análisis de resultados ha continuado con la evaluación de 5 planchas de CF RTP, descartando las designadas como F y G.

Un análisis ANOVA ha mostrado la influencia en los parámetros de entrada que regulan los 27 ensayos realizados a cada una de las 5 planchas de CF RTP restantes. En todas las planchas se ha conseguido una mayor influencia de los parámetros presión hidráulica y velocidad de corte. Sin embargo, el caudal de abrasivo ha sido el parámetro menos influyente en las 5 planchas analizadas, lo cual concuerda con lo establecido en

la Fase 1. Por ello, como conclusión, cabe señalar la poca influencia del caudal de abrasivo en la calidad superficial obtenida en el postprocesado de planchas de CFRTP de 2 mm de espesor. Además, en base al análisis realizado se ha dejado fijo el caudal de abrasivo en su valor intermedio, 225 g/min, lo cual ha provocado que el número de ensayos a evaluar disminuya de 27 a 9 ensayos en 5 planchas de CFRTP.

Tras haber analizado los valores de Ra y Rz para las combinaciones de ensayos resultantes se ha podido ver como existe una proporción entre ambas variables de salida, correspondiente a $Rz/Ra = 6$. Esta relación ha aparecido en todos los ensayos analizados con una desviación mínima, lo cual ha ocasionado que el análisis de los resultados continúe únicamente con una de las 2 variables. Debido al uso extendido industrialmente que tiene el término Ra a la hora de analizar la calidad superficial de la sección de corte, se ha decidido continuar el análisis con dicha variable.

En cuanto al análisis cuantitativo de Ra en este experimento, cabe señalar que se han obtenido valores medios menores que los registrados en el experimento de la fase inicial. Parece que las 7 planchas empleadas en esta fase del experimento, donde se ha estudiado la influencia del material, se han conformado con conficiones de fabricación diferentes a las empleadas en la fibra del primer experimento. Entre otros, el tiempo de curado parece haber sido mayor, pudiendo introducir incluso un ciclo de curado más para aumentar el consolidado del refuerzo y la matriz. Esto explicaría valores pequeños de Ra que oscilan entre 2.95 y 5.38 μm , donde el valor mínimo de Ra se ha obtenido para una presión hidráulica de 2500 bar y una velocidad de avance de 100 mm/min.

Se ha analizado el comportamiento de la calidad superficial en función a la presión hidráulica llegando a la conclusión de que en todas las planchas se produce una disminución de Ra a medida que aumenta la presión. Si se tratan los valores de Ra respecto a la velocidad de avance del cabezal, se puede ver como en términos generales, al aumentar este parámetro también lo hace el valor de Ra.

Se han analizado los valores Ra obtenidos mediante la media en las 5 planchas de CFRTP, de tal forma que se ha podido ver el comportamiento frente al mecanizado de 5 planchas de CFRTP conformadas con diversas configuraciones de parámetros y con diferentes propiedades mecánicas. Dada la similitud entre los resultados de Ra se ha podido llegar a una ecuación que permita obtener un comportamiento de una plancha de CFRTP en función a un valor de Ra aproximado en el que actúen la presión hidráulica, la velocidad de avance y el caudal de abrasivo como parámetros de entrada, siempre y cuando el material compuesto presente un rango de propiedades mecánicas similares a las empleadas en este experimento.

Por otro lado, al igual que para los valores de Ra, los valores de ángulo de conicidad obtenidos en el postprocesado de las 5 planchas de CFRTP analizadas son

menores que los generados en el estudio inicial comparativo, oscilando entre 1.47° y 6.77° , lo cual reafirma la hipótesis de que esta serie de planchas se hayan conformado de una forma diferente a la plancha de la fase inicial. Al igual que en casos anteriores, al analizar cada parámetro de entrada de forma aislada se ha podido ver cómo, la presión hidráulica influye directamente en el ángulo de conicidad. De esta forma, una mayor presión supone un aumento de la energía cinética generada por el chorro de agua, lo que conlleva un mayor arranque de material y, por ende, una pared final con menos ángulo de inclinación. De la misma forma, en líneas generales velocidades de avance pequeñas otorgan los menores valores de ángulo de conicidad, provocando que se genere una tendencia ascendente de forma clara en los valores de ángulo de conicidad a medida que aumenta este parámetro.

Por último, se han analizado los valores medios del ángulo de conicidad para las 5 planchas de CF RTP. Las tendencias observadas para la presión hidráulica y la velocidad de avance en los resultados obtenidos en las 5 planchas de CF RTP por separado, se intensifican a la hora de analizar las 5 planchas en conjunto. Además, el modelo cuadrático obtenido en base a la media de los datos del ángulo de conicidad genera un R^2 del 98.96%. Lo cual hace que dicha ecuación, junto a la generada para los valores de R_a , permita realizar la estimación del comportamiento de una plancha de CF RTP de 2 mm de espesor, frente al postprocesado mediante chorro de agua, siempre y cuando contenga propiedades mecánicas similares a las obtenidas en las planchas empleadas en este experimento.

En resumen, en este capítulo se han desarrollado los resultados obtenidos mediante el postprocesado de materiales compuestos de resina termoplástica reforzada con fibras de carbono mediante fresado y chorro de agua con abrasivo. Los resultados obtenidos para la tecnología de chorro de agua han afianzado las discusiones realizadas por investigadores en la literatura científica, generando resultados de calidad superficial mejores que los obtenidos para una tecnología convencional como es el fresado. No obstante, diversas herramientas y configuraciones de parámetros de corte producidas en fresado, han obtenido resultados muy favorables con calidades excelentes y defectos de deshilachado mínimos.

4.7. Referencias

- [1] D. Kumar, S. Gururaja, I.S. Jawahir, Machinability and surface integrity of adhesively bonded Ti/CFRP/Ti hybrid composite laminates under dry and cryogenic conditions, J. Manuf. Process. 58 (2020) 1075–1087. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.08.064>.
- [2] K. Sauer, M. Hertel, S. Fickert, M. Witt, M. Putz, Cutting parameter study of CFRP machining by turning and turn-milling, Procedia CIRP. 88 (2020) 457–461. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.05.079>.

- [3] R. Pahuja, M. Ramulu, Quality monitoring in milling of unidirectional CFRP through wavelet packet transform of force signals, *Procedia Manuf.* 48 (2020) 388–399. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.05.061>.
- [4] D. Nguyen, M.S. Bin Abdullah, R. Khawarizmi, D. Kim, P. Kwon, The effect of fiber orientation on tool wear in edge-trimming of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) laminates, *Wear.* 450–451 (2020) 203213. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203213>.
- [5] D. Ozkan, M.S. Gok, M. Oge, A.C. Karaoglanli, Milling behavior analysis of Carbon Fiber-Reinforced Polymer (CFRP) composites, *Mater. Today Proc.* 11 (2019) 526–533. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.01.024>.
- [6] J. Sheikh-Ahmad, N. Urban, H. Cheraghi, Machining damage in edge trimming of CFRP, *Mater. Manuf. Process.* 27 (2012) 802–808. <https://doi.org/10.1080/10426914.2011.648253>.
- [7] R.B.D. Pereira, C.H. Lauro, L.C. Brandão, J.R. Ferreira, J.P. Davim, Tool wear in dry helical milling for hole-making in AISI H13 hardened steel, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 101 (2019) 2425–2439. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-3129-9>.
- [8] B. Wang, K. Chang, M. Wang, F. Zhang, Y. Zhang, Y. Zheng, Experimental studies on helical milling process to improve hole quality for the Superalloy (MSRR7197), *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 99 (2018) 1449–1458. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2588-3>.
- [9] M. El-Hofy, M.O. Helmy, G. Escobar-Palafox, K. Kerrigan, R. Scaife, H. El-Hofy, Abrasive water jet machining of multidirectional CFRP laminates, *Procedia CIRP.* 68 (2018) 535–540. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.12.109>.
- [10] F. Wang, B. Zhang, Z. Jia, X. Zhao, Q. Wang, Structural optimization method of multitooth cutter for surface damages suppression in edge trimming of carbon fiber reinforced plastics, *J. Manuf. Process.* 46 (2019) 204–213. <https://doi.org/doi:10.1016/j.jmapro.2019.09.013>.
- [11] C. Kuo, J. Liu, T. Chang, S. Ko, The effects of cutting conditions and tool geometry on mechanics, tool wear and machined surface integrity when routing CFRP composites, *J. Manuf. Process.* 64 (2021) 113–129. <https://doi.org/doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.01.011>.
- [12] J.F. Chatelain, I. Zaghbani, Effect of tool geometry special features on cutting forces of multilayered CFRP laminates, in: *4th Int. Conf. Manuf. Eng. Qual. Prod. Syst.*, 2011: pp. 85–90.
- [13] W. Hintze, M. Cordes, G. Koerkel, Influence of weave structure on delamination when milling CFRP, *J. Mater. Process. Technol.* 216 (2015) 199–205. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.09.004>.
- [14] F. Bañón, A. Sambruno, B. Simonet, J. Salguero, M. Marcos, Preliminary study of the dry drilling process of CFRP/UNS A92024 stacks held together by adhesives, *Procedia Manuf.* 13 (2017) 211–218. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.049>.

- [15] N. Geier, C. Pereszlai, Analysis of characteristics of surface roughness of machined CFRP composites, *Period. Polytech. Mech. Eng.* 64 (2020) 67–80. <https://doi.org/10.3311/PPme.14436>.
- [16] S.C. Han, Y. Chen, J.H. Xu, J.W. Zhou, Experimental study of tool wear in milling multidirectional CFRP laminates, *Mater. Sci. Forum.* 770 (2013) 276–280. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.770.276>.
- [17] Y. Chen, X. Guo, K. Zhang, D. Guo, C. Zhou, L. Gai, Study on the surface quality of CFRP machined by micro-textured milling tools, *J. Manuf. Process.* 37 (2019) 114–123. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.11.021>.
- [18] A. Dhanawade, S. Kumar, Experimental study of delamination and kerf geometry of carbon epoxy composite machined by abrasive water jet, *J. Compos. Mater.* 51 (2017) 3373–3390. <https://doi.org/10.1177/0021998316688950>.
- [19] R. Pahuja, M. Ramulu, M. Hashish, Surface quality and kerf width prediction in abrasive water jet machining of metal-composite stacks, *Compos. Part B Eng.* 175 (2019) 107134. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107134>.
- [20] R. Fu, Z. Jia, F. Wang, Y. Jin, D. Sun, L. Yang, D. Cheng, Drill-exit temperature characteristics in drilling of UD and MD CFRP composites based on infrared thermography, *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 135 (2018) 24–37. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2018.08.002>.
- [21] L.M. Hlaváč, I.M. Hlaváčová, Š. Plančár, T. Krenický, V. Geryk, Deformation of products cut on AWJ x-y tables and its suppression, in: *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, 2018: p. 012015. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/307/1/012015>.
- [22] M. Li, M. Huang, Y. Chen, P. Gong, X. Yang, Effects of processing parameters on kerf characteristics and surface integrity following abrasive waterjet slotting of Ti6Al4V/CFRP stacks, *J. Manuf. Process.* 42 (2019) 82–95. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.04.024>.
- [23] R. Ruiz-Garcia, P.F. Mayuet Ares, J.M. Vazquez-Martinez, J. Salguero, Influence of abrasive waterjet parameters on the cutting and drilling of CFRP/UNS A97075 and UNS A97075/CFRP stacks, *Materials (Basel)*. 12 (2018) 107. <https://doi.org/10.3390/ma12010107>.
- [24] I. Wong MM, A. Azmi, C. Lee, A. Mansor, Kerf taper and delamination damage minimization of FRP hybrid composites under abrasive water-jet machining, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 94 (2018) 1727–1744. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9669-y>.
- [25] L.M. Hlaváč, I.M. Hlaváčová, V. Geryk, Š. Plančár, Investigation of the taper of kerfs cut in steels by AWJ, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 77 (2015) 1811–1818. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6578-9>.
- [26] L.M. Hlaváč, I.M. Hlaváčová, V. Geryk, Taper of kerfs made in rocks by abrasive water jet (AWJ), *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 88 (2017) 443–449. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8782-2>.

- [27] M.A. Azmir, A.K. Ahsan, A study of abrasive water jet machining process on glass/epoxy composite laminate, *J. Mater. Process. Technol.* 209 (2009) 6168–6173. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.08.011>.
- [28] A. Alberdi, A. Suárez, T. Artaza, G.A. Escobar-Palafox, K. Ridgway, Composite cutting with abrasive water jet, *Procedia Eng.* 63 (2013) 421–429. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.08.217>.
- [29] Y. Kakinuma, T. Ishida, R. Koike, H. Klemme, B. Denkena, T. Aoyama, Ultrafast feed drilling of carbon fiber-reinforced thermoplastics, *Procedia CIRP.* 35 (2015) 91–95. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.08.074>.
- [30] D. Kumar, S. Gururaja, Abrasive waterjet machining of Ti/CFRP/Ti laminate and multi-objective optimization of the process parameters using response surface methodology, *J. Compos. Mater.* 54 (2019). <https://doi.org/10.1177/0021998319884611>.
- [31] K.R. Kumar, V.S. Sreebalaji, T. Pridhar, Characterization and optimization of abrasive water jet machining parameters of aluminium/tungsten carbide composites, *Measurement.* 117 (2018) 57–66. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.11.059>.
- [32] P.F. Mayuet, F. Girot, A. Lamíkiz, S.R. Fernández-Vidal, J. Salguero, M. Marcos, SOM/SEM based characterization of internal delaminations of CFRP samples machined by AWJM, *Procedia Eng.* 132 (2015) 693–700. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.549>.
- [33] R. Pahuja, M. Ramulu, Abrasive water jet machining of Titanium (Ti6Al4V)–CFRP stacks – A semi-analytical modeling approach in the prediction of kerf geometry, *J. Manuf. Process.* 39 (2019) 327–337. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.01.041>.
- [34] P. Masek, P. Zeman, P. Kolar, Development of a cutting tool for composites with thermoplastic matriz, *MM Sci. J.* October (2013) 422–427. https://doi.org/10.17973/MMSJ.2013_10_201312.
- [35] P. Masek, P. Zeman, P. Kolar, F. Holesovsky, Edge trimming of C/PPS plates, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 101 (2019) 157–170. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2857-1>.
- [36] D.K. Shanmugam, T. Nguyen, J. Wang, A study of delamination on graphite/epoxy composites in abrasive waterjet machining, *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* 39 (2008) 923–929. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2008.04.001>.
- [37] B. Jagadeesh, P. Dinesh Babu, M. Nalla Mohamed, P. Marimuthu, Experimental investigation and optimization of abrasive water jet cutting parameters for the improvement of cut quality in carbon fiber reinforced plastic laminates, *J. Ind. Text.* 48 (2018) 178–200. <https://doi.org/10.1177/1528083717725911>.
- [38] F.J. Trujillo, L. Sevilla, J. Salguero, M. Batista, M. Marcos, Parametric potential model for determining the microgeometrical deviations of horizontally dry-turned UNS A97075 (Al–Zn) alloy, *Adv. Sci. Lett.* 19 (2013) 731–735. <https://doi.org/10.1166/asl.2013.4818>.

- [39] B. Palásti-Kovács, S. Sipos, Á. Czifra, Interpretation of “ $R_z=4 \times R_a$ ” and other roughness parameters in the evaluation of machined surfaces, in: 13th Int. Conf. Tools, 2012: pp. 237–244.

Análisis, evaluación y propuesta de mejora del rendimiento del mecanizado de materiales compuestos de naturaleza termoplástica CF RTP

Capítulo 5

Conclusiones

Tesis Doctoral

Alejandro Sambruno Ladrón de Guevara

Capítulo 5. Conclusiones

5.1. Introducción

El presente trabajo se ha llevado a cabo sobre la base de un objetivo encaminado a la búsqueda de criterios y condiciones que permitan postprocesar de la mejor manera materiales compuestos de resina termoplástica reforzados con fibras de carbono. Este estudio se ha basado en un estado del arte elaborado a tal efecto y, ha tenido un extenso conjunto de experimentos.

En capítulos anteriores se han establecido conclusiones parciales, por lo que en este Capítulo se presentan las principales conclusiones extraídas del trabajo de investigación desarrollado, definiéndose a partir de ellas las principales líneas de actuación futuras.

5.2. Conclusiones

De la recogida en capítulos anteriores, fruto del estudio, experimentación, análisis y tratamiento de los datos obtenidos, pueden extraerse una serie de conclusiones generales.

En primer lugar, la aproximación al estado del arte de los materiales compuestos de matriz polimérica ha dado lugar a una serie de conclusiones de gran valor para el desarrollo de este trabajo. Diversas revisiones bibliográficas, han evidenciado la tendencia ascendente de los materiales compuestos de matriz polimérica, los cuales han adquirido una gran posición en diversos sectores industriales tales como el aeroespacial o automoción. Además, hoy día se están desarrollando matrices termoplásticas cuyo uso presenta una serie de ventajas respecto a los compuestos termoestables, entre ellas su facilidad de procesamiento y de reciclaje.

Entre las matrices termoplásticas más extendidas se encuentra el poliuretano termoplástico (TPU) el cual, debido sus altas prestaciones mecánicas, presenta un gran rendimiento en servicio. Además, este polímero mantiene una excelente relación precio/propiedades, así como una gran facilidad de reciclado. Esto ha ocasionado que la

demanda mundial de TPUs se encuentre en torno al 10% y ascendiendo, siendo capaz de ser implantando en multitud de sectores industriales.

Por otro lado, entre los refuerzos estudiados de cara al conformado de un material compuesto destacan los de tipo fibra, en especial las fibras sintéticas tales como carbono, vidrio y aramida. La literatura revisada en el ámbito de la ingeniería, expone un gran aumento de publicaciones referidas a las fibras de carbono y las de vidrio, donde generalmente las fibras de carbono destacan debido a su implementación en compuestos avanzados, es decir, que exigen una mayor funcionalidad en servicio.

De esta forma, se ha visto como el número de publicaciones referidas a los CF RTPs aumenta anualmente lo que significa que los materiales compuestos de matriz termoplástica reforzados con fibras de carbono (CF RTP) se presentan como una alternativa de gran interés a los compuestos más empleados en la industria. Este interés está soportado sobre distintas ventajas operativas como puede ser que para el procesado de CF RTPs aparece la posibilidad de eliminar operaciones previas al conformado tales como el preimpregnado de fibras y el empleo de un utillaje específico. Este hecho, junto a la bajada de costes esperada para las resinas termoplásticas hacen que este compuesto pueda llegar a ser competitivo.

Sin embargo, es importante conocer la influencia de la distribución de las fibras y al porcentaje de refuerzo del material compuesto. Para ello, se ha estudiado una relación directa entre ambas propiedades que permite determinar si el conformado se ha realizado de forma correcta. Esta corresponde a la fracción de volumen de fibra y resina que componen a un material compuesto, donde para poder obtenerlas, existen diferentes metodologías capaces de lograr determinar dicho porcentaje de refuerzo y fibra en un compuesto.

En relación a lo expuesto anteriormente, cabe señalar que casi todos los materiales compuestos requieren de algún tipo de postprocesado tras su fase de conformado, entendiendo como postprocesado aquellas operaciones secundarias capaces de obtener la geometría final, acabados y tolerancias requeridas. Por ello, se ha analizado el efecto de diversos postprocesados en materiales compuestos poliméricos. De esta forma, han destacado por su empleo en artículos científicos el corte por cizallamiento, láser, fresado y chorro de agua con abrasivo.

Tecnologías como el corte por cizallamiento son fácilmente industrializables pudiendo llegar a obtener preformas de material compuesto sin un excesivo estudio técnico previo. Sin embargo, a la hora de postprocesar un compuesto polimérico reforzado con fibras se busca que aparezcan la mínima cantidad de defectos que dificulten el uso final de las piezas, dicho de otra forma optimizar su funcionalidad. En este caso, el corte por cizallamiento provoca la aparición de defectos, principalmente

cosméticos que impiden su uso en muchas aplicaciones. Esto ocurre también con otra tecnología más avanzada como es el corte láser, la cual por el exceso de energía térmica se provoca la aparición de defectos ocasionados por el aumento de la temperatura, donde la matriz polimérica se ve dañada debido a su baja temperatura de transición vítrea dando lugar a fibras sueltas o desprendidas. Este efecto hace difícil la industrialización de este proceso para el corte de compuestos poliméricos.

Por otro lado, el postprocesado de materiales compuestos mediante fresado, ha sido estudiado en multitud de investigaciones. En esta ocasión la fricción generada entre la herramienta y el material puede llegar a generar un exceso de temperatura que produzca defectos en la pieza final obtenida. No obstante, varias investigaciones concuerdan que, estableciendo una combinación de parámetros adecuada, se pueden llegar a obtener resultados favorables sin la excesiva generación de defectos en la pieza final.

Por último, se ha estudiado el corte por chorro de agua con abrasivo, la cual es una tecnología menos extendida y que está empezando a demostrar sus capacidades frente a procesos de corte convencionales. En esta ocasión, la eliminación de material se va favorecida por las bajas temperaturas adquiridas durante el postprocesado. Este efecto hace que el chorro de agua adquiera una gran ventaja frente al resto de postprocesados estudiados, ya que, teóricamente, la matriz polimérica se debe ver menos afectada.

Para llevar a cabo los postprocesados de fresado y chorro de agua con abrasivo, se ha descrito una metodología experimental. Esta descripción ha desglosado los procedimientos seguidos, abordando aspectos básicos como el material empleado, procesos, parámetros y caracterización y cuantificación de defectos generados.

Para realizar una correcta caracterización del material, se han comparado los porcentajes iniciales de fibra y resina empleados en el conformado con los porcentajes obtenidos tras el conformado del compuesto. Para lograr este objetivo se ha hecho uso de un método recogido en norma que emplea ácido sulfúrico como reactivo para disolver la resina del material compuesto, consiguiendo obtener en forma de masa, el porcentaje de fibras de carbono empleado. La metodología seguida para el cálculo de este porcentaje ha sido desarrollada minuciosamente obteniéndose un error de porcentaje fibra empleada para el conformado con porcentaje de fibra obtenida tras el cálculo de 3.84%.

Tras la caracterización del material, el postprocesado del mismo se ha desarrollado en 2 fases. La primera de ellas, Fase 1, ha establecido un estudio comparativo de los postprocesados mediante fresado y chorro de agua con abrasivo, con el fin de conocer la idoneidad de cada proceso en la misma plancha de material. La Fase

2 contempla una ampliación del postprocesado de chorro de agua con abrasivo, profundizando en el material y diversas disposiciones del refuerzo y la resina que ocasionan un porcentaje diferente entre ellos. De esta forma se analizan las configuraciones de más interés industrial.

Con el fin de evaluar los ensayos llevados a cabo, se ha establecido un protocolo de evaluación que permita caracterizar las herramientas y piezas mecanizadas tanto en fresado como en chorro de agua. Para ello, se ha hecho uso de técnicas de microscopía óptica estereoscópica (SOM) y microscopía electrónica de barrido (SEM), además de técnicas para la obtención de la calidad superficial en la superficie generada.

Además, debido a discrepancias encontradas en la literatura revisada de acuerdo al método de evaluar el ángulo de conicidad generado tras el corte por chorro de agua, se ha establecido una metodología para la obtención de dicho defecto que separa las diferentes zonas de daño de una sección de corte: entrada (IDR), intermedia (SCR), final (RCR).

Tras el establecimiento de la metodología experimental se han presentado y discutido los resultados obtenidos para el postprocesado de CF RTPs. En primer lugar, se han analizado las calidades y defectos obtenidos tras el postprocesado mediante fresado. Para llevar a cabo este análisis, se han mostrado las diferencias entre resultados generados por 5 herramientas de corte con diferentes características (convencional, pulverizadora e híbridas a -10° , $+10^\circ$ y 0°).

En términos de calidad superficial, se puede concluir que la herramienta convencional de 2 dientes ha generado los valores Rz más bajos obtenidos en este experimento. La herramienta B (pulverizadora) con 11 dientes ha producido resultados muy dispares obteniendo valores de rugosidad bajos y altos. Las herramientas híbridas (C, D y E) de 8 dientes, han mostrado valores de Rz ligeramente superiores a los provocados por la herramienta convencional (herramienta A). Sin embargo, estos valores tienen una tendencia bastante más clara que las mostradas por los otros dos tipos de herramientas.

En cuanto al defecto de deshilachado de las fibras, se puede concluir que la herramienta convencional (A), ha obtenido los peores resultados. Algo similar ha ocurrido con la herramienta híbrida D (con ángulo de hélice 0°), siendo la herramienta B (pulverizadora) la que ha ofrecido los mejores resultados en cuanto al deshilachado de las fibras. La herramienta C, con un ángulo de hélice negativo (-10°) proporciona mejores resultados cuando se mecaniza el CF RTP a una velocidad de corte alta. Por el contrario, en la herramienta E, con un ángulo de hélice positivo ($+10^\circ$), el efecto de deshilachado se ve afectado por la velocidad de avance.

De forma general, parece que el fresado periférico del CF RTP lleva intrínseco la creación de una serie de defectos típicos del proceso. Como ya ha sido mencionado, el uso de una matriz termoplástica hace que la temperatura de transición vítrea del material sea inferior a la de una resina termoestable por lo que, el material termoplástico puede verse más afectado por la temperatura del proceso de fresado periférico que el CFRP.

Por otro lado, tras examinar las estrategias de fresado a favor y en oposición con las 5 herramientas utilizadas en este experimento, se puede concluir como la estrategia de fresado en oposición, en general, obtiene siempre valores de R_z más altos que los resultantes de la estrategia de fresado a favor. En el fresado periférico en oposición, se genera una fuerza de corte menor cuando la herramienta incide en el material.

En base a los resultados obtenidos, se puede llegar a la conclusión de que la geometría de herramienta más completa para el mecanizado de compuestos termoplásticos es la herramienta C, con 8 filos de corte y un ángulo de hélice de -10° . Con esta herramienta a velocidades de avance de 0.07 mm/diente y una velocidad de corte de 3000 rpm se han obtenido valores medios de R_z similares a los valores mínimos de todo el experimento completo alcanzados por la herramienta A. Además, con esta combinación de parámetros se consigue un mínimo defecto de deshilachado de fibras.

Si se analizan los resultados obtenidos para la comparativa de postprocesados mediante chorro de agua con abrasivo, cabe señalar la obtención de 3 zonas a lo largo del espesor del material: la zona de corte rugoso (RCR) en el 0-10%, la zona de corte suave (SCR) en el 10-75% y la zona de daño inicial (IDR) en el 75-100%. La definición de las 3 zonas en la sección de corte del CF RTP ha permitido realizar el estudio del ángulo de conicidad y de la calidad superficial de una forma más exacta.

Mediante el análisis ANOVA realizado se han llegado a deducir una serie de conclusiones. El análisis realizado para el defecto taper indica que la presión hidráulica y la velocidad de avance son los parámetros más influyentes en el mecanizado por chorro de agua abrasiva. En el caso de la calidad superficial los parámetros más influyentes han sido la presión hidráulica y el caudal de abrasivo. Asimismo, el modelo matemático obtenido por la metodología de superficie de respuesta analizada para el defecto taper ha presentado una alta correlación ($R^2 = 93,85\%$) lo que indica la solidez del modelo. El modelo matemático obtenido para la rugosidad media aritmética por su parte, ha presentado una correlación también bastante adecuada ($R^2 = 83\%$) algo que representa la variabilidad en la rugosidad intrínsecamente ligada a la naturaleza del material. Por otro lado se ha visto como el efecto de la temperatura no parece influir en la calidad de los resultados obtenidos por AWJM.

Se ha encontrado una combinación de parámetros de corte que minimiza el ángulo de conicidad, resultando en una presión de 3400 bar, una velocidad de avance de 100 mm/min, y un flujo de masa de abrasivo de 340 g/min, produciendo una relación de anchura superior-inferior cercana a 1, es decir, $0,75^\circ$. De la misma manera, se ha encontrado una combinación de parámetros de corte que minimiza el Ra, resultando en una presión de 3400 bar, un caudal de abrasivo de masa de 170 g/min y una velocidad de avance de 100 mm/min, produciendo un Ra de $4.77 \mu\text{m}$.

Se han codificado los valores medios y desviaciones obtenidos en los resultados de los postprocesados mediante fresado y chorro de agua para poder realizar una comparativa a nivel cuantitativo. Se demostró como la tecnología de chorro de agua con abrasivo ha generado valores más cercanos entre sí, es decir, una mayor precisión en el corte realizado. Este efecto ha sido notorio tanto para la calidad superficial como para el ángulo de conicidad.

Sin embargo, cuando se analiza cómo influye la configuración del material en el proceso de corte por AWJM, se ha determinado que este parámetro es determinante en sus configuraciones extremas. Tanto es así que una falta de resina o una mala distribución de la misma durante el proceso de fabricación provoca un efecto de deshilachado de fibras, pérdida de resina y delaminaciones internas.

De la misma forma, un análisis ANOVA ha mostrado la influencia en los parámetros en los ensayos realizados, llegando a la conclusión de que la presión hidráulica y la velocidad de avance son los parámetros más influyentes. Sin embargo, el caudal de abrasivo ha sido el parámetro menos influyente en las planchas analizadas, lo cual señala la poca influencia del caudal de abrasivo en la calidad superficial para el postprocesado de planchas de CF RTP de 2 mm de espesor.

En cuanto al análisis cuantitativo de Ra en este experimento, cabe señalar que se han obtenido valores medios menores llegando a alcanzar valores bajos, que oscilan entre 2.95 y $5.38 \mu\text{m}$, donde el valor mínimo de Ra se ha obtenido para una presión hidráulica de 2500 bar y una velocidad de avance de 100 mm/min.

Se han analizado los valores Ra obtenidos mediante la media en las planchas de CF RTP, de tal forma que se ha podido estudiar el comportamiento frente al mecanizado AWJM de CF RTP conformadas con diversas configuraciones de parámetros y con diferentes propiedades mecánicas. Se ha podido ver un mismo patrón producido en todas las planchas analizadas, en las cuales la combinación de parámetros P 2500 bar y la velocidad de avance 100 mm/min es la que mejor calidad superficial genera en todas las planchas, es decir, la que ha obtenido los valores más bajos de Ra. Dada la similitud entre los resultados de Ra se ha podido llegar a una ecuación que permita obtener un comportamiento de una plancha de CF RTP en función a un valor de Ra aproximado en

el que actúen la presión hidráulica, la velocidad de avance y el caudal de abrasivo como parámetros de entrada, siempre y cuando la fibra de carbono presente un rango de propiedades mecánicas similares a las empleadas en este experimento.

Por otro lado, al igual que para los valores de R_a , los valores de ángulo de conicidad obtenidos en el postprocesado de las diferentes planchas de CFRTP analizadas son muy bajos, oscilando entre 1.47° y 6.77° . Además, se han analizado los valores medios del ángulo de conicidad para las planchas de CFRTP estudiadas donde se ha obtenido un modelo cuadrático con una alta correlación ($R^2 = 98.96\%$). Lo cual hace que, dicha ecuación, junto a la generada para los valores de R_a , permita realizar la estimación del comportamiento de una plancha de CFRTP de 2 mm de espesor, frente al postprocesado mediante chorro de agua, siempre y cuando contenga propiedades mecánicas similares a las obtenidas en las planchas empleadas en este experimento.

En resumen, en este trabajo se ha desarrollado una aproximación al estado del arte de los compuestos termoplásticos reforzados con fibras de carbono que ha englobado su conformado y postprocesado. Se ha establecido una metodología experimental que se ha llevado a cabo, otorgando unos resultados y conclusiones de gran valor para la investigación correspondiente. Los resultados obtenidos para la tecnología de chorro de agua han afianzado las discusiones realizadas por investigadores en la literatura científica y generándose resultados de calidad superficial mejores que los obtenidos para una tecnología convencional como es el fresado.

5.3. Líneas Futuras

Esta investigación ha permitido encontrar posibilidades de mejora en los postprocesados estudiados, permitiendo así definir distintos horizontes de trabajo. Estas metas plantean nuevas cuestiones a identificar, cuyos objetivos están en el mismo contexto en el que se ha llevado a cabo este trabajo.

En particular pueden resaltarse las siguientes líneas de trabajo futuras:

- Ampliar el estudio de postprocesados de CFRTPs o incluir otros parámetros en la generación de ensayos que no hayan sido contemplados en esta investigación.
- Establecer modelos de comportamiento para el postprocesado mediante fresado capaz de corroborar los resultados obtenidos.
- Cuantificar el efecto de deshilachado generado en el postprocesado por fresado mediante softwares de tratamiento de imágenes.
- Profundizar en la relación entre las propiedades mecánicas del material compuesto y los resultados obtenidos tras el postprocesado por chorro de agua con abrasivo.

Análisis, evaluación y propuesta de mejora del rendimiento del mecanizado de materiales compuestos de naturaleza termoplástica CF RTP

Capítulo 6

Referencias

Tesis Doctoral

Alejandro Sambruno Ladrón de Guevara

Capítulo 6. Referencias

- Ahmed TM, El Mesalamy AS, Youssef A, El Midany TT. Improving surface roughness of abrasive waterjet cutting process by using statistical modeling. *CIRP J Manuf Sci Technol*. 2018;22:30–6.
- Alberdi A, Suárez A, Artaza T, Escobar-Palafox GA, Ridgway K. Composite cutting with abrasive water jet. *Procedia Eng*. 2013;63:421–9.
- Álvarez YG. Estudio de la tecnología de corte por chorro de agua. Universidad de Extremadura; 2018.
- Arburg. Freeformer - Libertad en la fabricación aditiva [Internet]. 2017 [cited 2022 Jan 18]. p. 24. Available from: <https://www.arburg.com>
- Arquitectura P. Proyecto “Módulo 10x10” reutiliza la fibra de vidrio para levantar prototipo de vivienda sostenible [Internet]. 2014 [cited 2022 Jan 18]. Available from: <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/627149/proyecto-modulo-10x10-reutiliza-la-fibra-de-vidrio-para-levantar-prototipo-de-vivienda-sostenible>
- Ashby MF, Jones DRH. An Introduction to Microstructures, Processing and Design. In: *Engineering Materials 2*. 4th ed. 2006.
- Azmir MA, Ahsan AK. A study of abrasive water jet machining process on glass/epoxy composite laminate. *J Mater Process Technol*. 2009;209:6168–73.
- Baldeon DT. Metodología para caracterizar materiales CF RTP, para su aplicación en elementos estructurales amortiguadores y anti-vibratorios de automoción. Universidad de la Rioja; 2018.
- Bañón F, Sambruno A, Batista M, Simonet B, Salguero J. Study of the surface quality of carbon fiber-reinforced thermoplastic matrix composite (CF RTP) machined by abrasive waterjet (AWJM). *Int J Adv Manuf Technol*. 2020;107:3299–313.
- Bañón F, Sambruno A, Gonzalez L, Vazquez-Martinez JM, Salguero J. A Review on the Abrasive Water-Jet Machining of Metal – Carbon Fiber Hybrid Materials. 2021;11:164.

- Bañón F, Sambruno A, Simonet B, Salguero J, Marcos M. Preliminary study of the dry drilling process of CFRP/UNS A92024 stacks held together by adhesives. *Procedia Manuf.* 2017;13(June):211–8.
- Bañón F. Análisis, evaluación y propuesta de mejora del rendimiento del mecanizado de estructuras híbridas CF RTP/Aleación metálica. Universidad de Cádiz; 2020.
- Bhattacharyya B, Doloi B. Modern machining technology: advanced, hybrid, micro machining and super finishing technology. San Diego: Elsevier Science Publishing Co Inc.; 2020. 780 p.
- Biron M. Thermoplastics and thermoplastic composites. 3a Ed. Oxford: Elsevier Ltd.; 2018. 944 p.
- Bitter JGA. A study of erosion phenomena part I. *Wear.* 1963;6:5–21.
- Bitter JGA. A study of erosion phenomena part II. *Wear.* 1963;6:169–90.
- Campbell FC. Manufacturing processes for advanced composites. Elsevier B.V.; 2003. 532 p.
- CEDEX. Reciclaje químico - Catálogo de residuos utilizables en construcción [Internet]. 2021 [cited 2022 Jan 18]. Available from: <http://www.cedexmateriales.es/catalogo-de-residuos/37/residuos-plasticos/gestion-del-residuo/valorizacion-material/250/reciclaje-quimico.html>
- Chatelain JF, Zaghbani I. Effect of tool geometry special features on cutting forces of multilayered CFRP laminates. In: 4th International Conference Manufacturing Engineering, Quality and Production Systems (MEQAPS). 2011. p. 85–90.
- Chen M, Jiang C, Xu Z, Zhan K, Ji V. Experimental study on macro- and microstress state, microstructural evolution of austenitic and ferritic steel processed by shot peening. *Surf Coatings Technol.* 2019;359:511–9.
- Chen Y, Guo X, Zhang K, Guo D, Zhou C, Gai L. Study on the surface quality of CFRP machined by micro-textured milling tools. *J Manuf Process.* 2019;37:114–23.
- Cheng CF, Tsui YC, Clyne TW. Application of a three-dimensional heat flow model to treat laser drilling of carbon fibre composites. *Acta Mater.* 1998;46(12):4273–85.
- Chung DDL. Carbon Composites - Composites with carbon fibers, nanofibers and nanotubes. 2a Ed. Oxford: Elsevier Inc.; 2017. 706 p.
- Dhanawade A, Kumar S. Experimental study of delamination and kerf geometry of carbon epoxy composite machined by abrasive water jet. *J Compos Mater.* 2017;51:3373–90.

- El-Hofy M, Helmy MO, Escobar-Palafox G, Kerrigan K, Scaife R, El-Hofy H. Abrasive water jet machining of multidirectional CFRP laminates. *Procedia CIRP*. 2018;68:535–40.
- Elmar W, Mathes V, Sauer M, Kühnel M. Composites market report 2018 - Market developments, trends, outlook and challenges. 2018;1–44.
- Ersvik E, Khalid R. Milling in hardened steel - a study of tool wear in conventional and dynamic milling. Universidad de Uppsala; 2015.
- Fernández-Vidal SR, Fernández-Vidal S, Batista M, Salguero J. Tool wear mechanism in cutting of stack CFRP/UNS A97075. *Materials (Basel)*. 2018;11:1276.
- Fernández-Vidal SR. Análisis de taladrado en seco asistido por vibraciones de estructuras híbridas de aleaciones ligeras. Universidad de Cádiz; 2016.
- Finnie I. Some observations on the erosion of ductile metals. *Wear*. 1972;19:81–90.
- Franke V. Drilling of long fiber reinforced thermoplastics - Influence of the cutting edge on the machining results. *CIRP Ann - Manuf Technol*. 2011;60:65–8.
- Frutos JP de. Análisis del taladrado de fibra de carbono: Fuerzas de corte y delaminación. Universidad de Valladolid; 2016.
- Fu R, Jia Z, Wang F, Jin Y, Sun D, Yang L, et al. Drill-exit temperature characteristics in drilling of UD and MD CFRP composites based on infrared thermography. *Int J Mach Tools Manuf*. 2018;135:24–37.
- Gadelmawla ES, Koura MM, Maksoud TMA, Elewa IM, Soliman HH. Roughness parameters. *J Mater Process Technol*. 2002;123:133–45.
- Geier N, Pereszalai C. Analysis of characteristics of surface roughness of machined CFRP composites. *Period Polytech Mech Eng*. 2020;64:67–80.
- Groover MP. *Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes and systems*. 4a Ed. John Wiley & Sons Inc.; 2010. 1024 p.
- Gupta K, Jain NK, Laubscher R. Advances in gear manufacturing. In: *Advanced Gear Manufacturing and Finishing*. Elsevier Inc.; 2017. p. 67–125.
- Gupta K, Paramanik A. *Advanced Machining and Finishing*. 2021.
- Gupta V, Pandey PM, Garg MP, Khanna R, Batra NK. Minimization of kerf taper angle and kerf width using Taguchi's method in abrasive water jet machining of marble. *Procedia Mater Sci*. 2014;6:140–9.
- Han SC, Chen Y, Xu JH, Zhou JW. Experimental study of tool wear in milling multidirectional CFRP laminates. *Mater Sci Forum*. 2013;770:276–80.

- Henerichs M, Voß R, Kuster F, Wegener K. Machining of carbon fiber reinforced plastics: Influence of tool geometry and fiber orientation on the machining forces. *CIRP J Manuf Sci Technol* [Internet]. 2015;9:136–45. Available from: doi.org/10.1016/j.cirpj.2014.11.002
- Hintze W, Cordes M, Koerkel G. Influence of weave structure on delamination when milling CFRP. *J Mater Process Technol*. 2015;216:199–205.
- Hintze Wolfgang W, Hartmann D, Schütte C. Occurrence and propagation of delamination during the machining of carbon fibre reinforced plastics (CFRPs) - An experimental study. *Compos Sci Technol* [Internet]. 2011;71(15):1719–26. Available from: http://dx.doi.org/10.1016/j.compscitech.2011.08.002
- Hlaváč LM, Hlaváčová IM, Geryk V, Plančár Š. Investigation of the taper of kerfs cut in steels by AWJ. *Int J Adv Manuf Technol*. 2015;77:1811–8.
- Hlaváč LM, Hlaváčová IM, Geryk V. Taper of kerfs made in rocks by abrasive water jet (AWJ). *Int J Adv Manuf Technol*. 2017;88:443–9.
- Hlaváč LM, Hlaváčová IM, Plančár Š, Krenický T, Geryk V. Deformation of products cut on AWJ x-y tables and its suppression. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. p. 012015.
- Hocheng H, Tsai HT. *Advanced analysis of nontraditional machining*. New York: Springer; 2013. 504 p.
- Hocheng H. *Machining Technology for Composite Materials*. Woodhead Publishing Limited; 2011. 488 p.
- Ishikawa T, Amaoka K, Masubuchi Y, Yamamoto T, Yamanaka A, Arai M, et al. Overview of automotive structural composites technology developments in Japan. *Compos Sci Technol*. 2018;155:221–46.
- Jagadeesh B, Dinesh Babu P, Nalla Mohamed M, Marimuthu P. Experimental investigation and optimization of abrasive water jet cutting parameters for the improvement of cut quality in carbon fiber reinforced plastic laminates. *J Ind Text*. 2018;48:178–200.
- Jagadish, Bhowmik S, Ray A. Prediction and optimization of process parameters of green composites in AWJM process using response surface methodology. *Int J Adv Manuf Technol*. 2016;87:1359–70.
- Jagadish, Gupta K. *Abrasive water jet machining of engineering materials*. Switzerland: Springer Nature; 2020. p. 73.
- Kakinuma Y, Ishida T, Koike R, Klemme H, Denkena B, Aoyama T. Ultrafast feed drilling of carbon fiber-reinforced thermoplastics. *Procedia CIRP*. 2015;35:91–5.

- Kalla DK, Dhanasekaran PS, Zhang B, Asmatulu R. Abrasive waterjet machining of fiber reinforced composites: A review. *AIP Conf Proc.* 2012;1431:535–42.
- Kalpakjian S, Schmid SR. *Manufactura, ingeniería y tecnología.* 5a ed. México: Pearson Educacion; 2008.
- Karpat T, Bahtiyar O, Deger B. Mechanistic force modeling for milling of unidirectional carbon fiber reinforced polymer laminates. *Int J Mach Tools Manuf.* 2012;56:79–93.
- Kawasumi. Cabkoma - Lightweight, strong and corrosion-free [Internet]. [cited 2022 Jan 18]. Available from: <https://www.komatsumatere.co.jp/cabkoma/en/>
- Kolar P, Masek P, Zeman P. Milling tools for cutting of fiber-reinforced plastic. *J Mach Eng.* 2014;14:93–103.
- Koplev A, Lystrup A, Vorm T. The cutting process, chips, and cutting forces in machining CFRP. *Composites.* 1983;14(4):371–6.
- Kovacevic R, Mohan R, Beardsley HE. Monitoring of thermal energy distribution in abrasive waterjet cutting using infrared thermography. *J Manuf Sci Eng Trans ASME.* 1996;118:555–63.
- Kulekci MK. Processes and apparatus developments in industrial waterjet applications. *Int J Mach Tools Manuf.* 2002;42:1297–306.
- Kumar D, Gururaja S, Jawahir IS. Machinability and surface integrity of adhesively bonded Ti/CFRP/Ti hybrid composite laminates under dry and cryogenic conditions. *J Manuf Process.* 2020;58:1075–87.
- Kumar D, Gururaja S. Abrasive waterjet machining of Ti/CFRP/Ti laminate and multi-objective optimization of the process parameters using response surface methodology. *J Compos Mater.* 2019;54.
- Kumar D, Gururaja S. Machining damage and surface integrity evaluation during milling of UD-CFRP laminates: Dry vs cryogenic. *Compos Struct.* 2020;247:112504.
- Kumar KR, Sreebalaji VS, Pridhar T. Characterization and optimization of abrasive water jet machining parameters of aluminium/tungsten carbide composites. *Measurement.* 2018;117:57–66.
- Kumaran ST, Ko TJ, Uthayakumar M, Islam MM. Prediction of surface roughness in abrasive water jet machining of CFRP composites using regression analysis. *J Alloys Compd.* 2017;724:1037–45.
- Kuo C, Liu J, Chang T, Ko S. The effects of cutting conditions and tool geometry on mechanics, tool wear and machined surface integrity when routing CFRP composites. *J Manuf Process.* 2021;64:113–29.

- Li M, Huang M, Chen Y, Gong P, Yang X. Effects of processing parameters on kerf characteristics and surface integrity following abrasive waterjet slotting of Ti6Al4V/CFRP stacks. *J Manuf Process*. 2019;42:82–95.
- Li M, Huang M, Chen Y, Kai W, Yang X. Experimental study on hole characteristics and surface integrity following abrasive waterjet drilling of Ti6Al4V/CFRP hybrid stacks. *Int J Adv Manuf Technol*. 2019;104:4779–89.
- Llanto JM, Tolouei-Rad M, Vafadar A, Aamir M. Recent progress trend on abrasive waterjet cutting of metallic materials: A review. *Appl Sci*. 2021;11:1–24.
- López de Lacalle LN, Campa FJ, Lamikiz A. Milling. In: *Modern Machining Technology*. Woodhead Publishing Limited; 2011. p. 213–303.
- Mallick PK. *Fibre-reinforced composites materials, manufacturing and design*. 3a Ed. New York: Taylor & Francis Group LLC.; 2008. 616 p.
- Masek P, Kolar P, Zeman P. Optimization of trimming operations for machining carbon fibre reinforced thermoplastic composite. In: *International Conference on Advanced Manufacturing Engineering and Technologies Optimization*. 2013.
- Masek P, Zeman P, Kolar P, Holesovsky F. Edge trimming of C/PPS plates. *Int J Adv Manuf Technol*. 2019;101:157–70.
- Masek P, Zeman P, Kolar P. Development of a cutting tool for composites with thermoplastic matrix. *MM Sci J*. 2013;October:422–7.
- Masek P, Zeman P, Kolar P. Technology optimization of PPS/C composite milling using Taguchi method. In: *9th International Conference on Machine Tools, Automation, Technology and Robotics*. 2012. p. 8.
- Mayuet PF. *Análisis comparativo de tecnologías aplicadas al taladrado de materiales compuestos de uso estratégico en la industria aeronáutica*. Universidad de Cádiz; 2016.
- Mayuet PF, Girot F, Lamíkiz A, Fernández-Vidal SR, Salguero J, Marcos M. SOM/SEM based characterization of internal delaminations of CFRP samples machined by AWJM. *Procedia Eng*. 2015;132:693–700.
- McCool R, Murphy A, Wilson R, Jiang Z, Price M, Butterfield J, et al. Thermoforming carbon fibre-reinforced thermoplastic composites. *Proc Inst Mech Eng Part L J Mater Des Appl*. 2012;226(2):91–102.
- Melentiev R, Fang F. Recent advances and challenges of abrasive jet machining. *CIRP J Manuf Sci Technol*. 2018;22:1–20.
- Miravete A. *Materiales compuestos tomo I*. Editorial Reverte; 2012. 953 p.

- Mitsubishi. Catálogo de herramientas de mecanizado [Internet]. 1970 [cited 2020 Apr 19]. p. 52. Available from: <https://www.mitsubishicarbide.com/>
- Nakamura N, Ogi K, Ota A, Nakata S. Shear cutting behaviors in thermosetting and thermoplastic CFRP laminates. 2015;657:347–52.
- Nee AYC. Handbook of Manufacturing Engineering and Technology. Springer; 2015. 3491 p.
- Nguyen D, Abdullah MS Bin, Khawarizmi R, Kim D, Kwon P. The effect of fiber orientation on tool wear in edge-trimming of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) laminates. Wear. 2020;450–451:203213.
- Norma ISO 8688-1:1989. Tool life testing in milling - Part 2: end milling. 1989.
- Ogi K, Yashiro S. Effect of the fiber cut angle on the shearing strength of unidirectional and cross-ply carbon-fiber-reinforced thermoplastic laminates. Compos Part B [Internet]. 2021;216(April):108869. Available from: doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.108869
- Olabisi O, Adewale K. Handbook of thermoplastics. 2a Ed. New York: Taylor & Francis Group LLC.; 2016. 1003 p.
- Ozkan D, Gok MS, Oge M, Karaoglanli AC. Milling behavior analysis of Carbon Fiber-Reinforced Polymer (CFRP) composites. Mater Today Proc. 2019;11:526–33.
- Ozkan D, Sabri M, Oge M, Cahit A. Milling Behavior Analysis of Carbon Fiber-Reinforced Polymer (CFRP) Composites. Mater Today Proc [Internet]. 2019;11:526–33. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.01.024>
- Pahuja R, Ramulu M, Hashish M. Abrasive waterjet profile cutting of thick titanium/graphite fiber metal laminate. In: ASME Int Mech Eng Congr Expo Proc. 2017. p. 1–11.
- Pahuja R, Ramulu M, Hashish M. Surface quality and kerf width prediction in abrasive water jet machining of metal-composite stacks. Compos Part B Eng. 2019;175:107134.
- Pahuja R, Ramulu M. Abrasive water jet machining of Titanium (Ti6Al4V)–CFRP stacks – A semi-analytical modeling approach in the prediction of kerf geometry. J Manuf Process. 2019;39:327–37.
- Pahuja R, Ramulu M. Quality monitoring in milling of unidirectional CFRP through wavelet packet transform of force signals. Procedia Manuf. 2020;48:388–99.
- Palásti-Kovács B, Sipos S, Czifra Á. Interpretation of “ $R_z=4 \times R_a$ ” and other roughness parameters in the evaluation of machined surfaces. In: 13th International Conference on Tools. 2012. p. 237–44.

- Pereira RBD, Lauro CH, Brandão LC, Ferreira JR, Davim JP. Tool wear in dry helical milling for hole-making in AISI H13 hardened steel. *Int J Adv Manuf Technol*. 2019;101:2425–39.
- Popan IA, Contiu G, Campbell I. Investigation on standoff distance influence on kerf characteristics in abrasive water jet cutting of composite materials. *MATEC Web Conf*. 2017;137:01009.
- Prashanth S, Subbaya K, Nithin K, Sachhidananda S. Fiber reinforced composites - a review. *J Mater Sci Eng*. 2017;06:594–5.
- Ramulu M, Pahuja R, Hashish M, Isvilonanda V. Abrasive waterjet machining effects on kerf quality in thin fiber metal laminate. In: 2015 WJTA-IMCA Conference and Expo. 2015. p. 13.
- Rana S, Figueiro R. *Advanced composite materials and aerospace engineering*. Elsevier Ltd.; 2016. 496 p.
- Ruiz-Garcia R, Mayuet Ares PF, Vazquez-Martinez JM, Salguero J. Influence of abrasive waterjet parameters on the cutting and drilling of CFRP/UNS A97075 and UNS A97075/CFRP stacks. *Materials (Basel)*. 2018;12:107.
- Sambruno A, Bañon F, Salguero J, Simonet B, Batista M. Kerf taper defect minimization based on abrasive waterjet machining of low thickness thermoplastic carbon fiber composites C/TPU. *Materials (Basel)*. 2019;12:4192.
- Santiago MO, Marín CG, Fernández JR. Los composites. Características y aplicaciones en la edificación. *Inf la Construcción*. 2003;54:45–62.
- Sauer K, Hertel M, Fickert S, Witt M, Putz M. Cutting parameter study of CFRP machining by turning and turn-milling. *Procedia CIRP*. 2020;88:457–61.
- SBP - Schlaich Bergermann Partner. Roof Olympic Stadium Montréal [Internet]. [cited 2022 Jan 18]. Available from: <https://www.sbp.de/en/project/roof-olympic-stadium-montreal/>
- Schmidt B, Rose M, Zimmermann M, Kästner M. Analysis of process-induced damage in remote laser cut carbon fibre reinforced polymers. *J Mater Process Technol*. 2021;295(March).
- Shanmugam DK, Nguyen T, Wang J. A study of delamination on graphite/epoxy composites in abrasive waterjet machining. *Compos Part A Appl Sci Manuf*. 2008;39:923–9.
- Sheikh-Ahmad J, Urban N, Cheraghi H. Machining damage in edge trimming of CFRP. *Mater Manuf Process*. 2012;27:802–8.

- Sheikh-Ahmad JY, Dhuttargaon M, Cheraghi H. New tool life criterion for delamination free milling of CFRP. *Int J Adv Manuf Technol*. 2017;92:2131–43.
- Soutis C. Fibre reinforced composites in aircraft construction. *Prog Aerosp Sci*. 2005;41:143–51.
- Tatsuno D, Yoneyama T, Ibuki M. Effect of process parameters of shear cutting for carbon fiber-reinforced thermoplastic laminate. *Int J Adv Manuf Technol*. 2020;110(3–4):1125–38.
- Trujillo FJ, Sevilla L, Salguero J, Batista M, Marcos M. Parametric potential model for determining the microgeometrical deviations of horizontally dry-turned UNS A97075 (Al–Zn) alloy. *Adv Sci Lett*. 2013;19:731–5.
- UNE-EN 2559/1997. Determinación de los contenidos de resina y fibra de la masa de fibra por unidad de superficie. 1997.
- Vigneshwaran S, Uthayakumar M, Arumugaprabu V. Abrasive water jet machining of fiber-reinforced composite materials. *J Reinf Plast Compos*. 2018;37:230–7.
- Voisey KT, Fouquet S, Roy D, Clyne TW. Fibre swelling during laser drilling of carbon fibre composites. *Opt Lasers Eng*. 2006;44(11):1185–97.
- Voss R, Seeholzer L, Kuster F, Wegener K. Influence of fibre orientation, tool geometry and process parameters on surface quality in milling of CFRP. *CIRP J Manuf Sci Technol* [Internet]. 2017;18:75–91. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirpj.2016.10.002>
- Walter J, Hustedt M, Staehr R, Kaierle S, Jaeschke P, Suttmann O, et al. Laser cutting of carbon fiber reinforced plastics-investigation of hazardous process emissions. *Phys Procedia*. 2014;56:1153–64.
- Wang B, Chang K, Wang M, Zhang F, Zhang Y, Zheng Y. Experimental studies on helical milling process to improve hole quality for the Superalloy (MSRR7197). *Int J Adv Manuf Technol*. 2018;99:1449–58.
- Wang F, Zhang B, Jia Z, Zhao X, Wang Q. Structural optimization method of multitooth cutter for surface damages suppression in edge trimming of carbon fiber reinforced plastics. *J Manuf Process*. 2019;46:204–13.
- Wang F-J, Yan J-B, Zhao M, Wang D, Wang X-N, Hao J-X. Surface damage reduction of dry milling carbon fiber reinforced plastic/polymer using left-right edge milling tool. *J Reinf Plast Compos*. 2020;39:409–21.
- Wang J. Abrasive waterjet machining of engineering materials. Switzerland: Trans Tech Publications; 2003. 114 p.

- Wong MM I, Azmi A, Lee C, Mansor A. Kerf taper and delamination damage minimization of FRP hybrid composites under abrasive water-jet machining. *Int J Adv Manuf Technol*. 2018;94:1727–44.
- Xu J, Ji M, Davim P, Chen M, Mansori M El, Krishnaraj V. Comparative study of minimum quantity lubrication and dry drilling of CFRP/titanium stacks using TiAlN and diamond coated drills. *Compos Struct*. 2020;234:111727.
- Yang G, Dong Z, Gao S, Bao Y, Kang R, Guo D. A novel reverse helical milling process for reducing push-out delamination of CFRP. *Compos Struct* [Internet]. 2020;253(October 2019):112778. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112778>
- Zaliani ZA, Hamidon R, Hussin MS, Hamzas MFMA, Hadi H. The influence of solid lubricant in machining parameter of milling operation. *Int J Eng Sci Technol*. 2011;3:5221–6.
- Zitoun R, Bougherara H. Machining and drilling processes in composites manufacture: Damage and material integrity [Internet]. *Advances in Composites Manufacturing and Process Design*. Elsevier Ltd.; 2015. 177–195 p. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-1-78242-307-2.00009-9>