



Acabado e Integridad Superficial en
piezas mecanizadas de materiales
compuestos

Tesis de grado de la carrera de Ingeniería
Mecánica, Facultad de Ingeniería de la
Universidad Nacional de Mar del Plata (FI-
UNMdP)

ESTUDIANTE: Dommarco Mauro
DIRECTOR: Sosa Amadeo Daniel
CO-DIRECTOR: Stocchi Leonardo Ariel
MAR DEL PLATA-ARGENTINA
OCTUBRE 2019



RINFI se desarrolla en forma conjunta entre el INTEMA y la Biblioteca de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata.

Tiene como objetivo recopilar, organizar, gestionar, difundir y preservar documentos digitales en Ingeniería, Ciencia y Tecnología de Materiales y Ciencias Afines.

A través del Acceso Abierto, se pretende aumentar la visibilidad y el impacto de los resultados de la investigación, asumiendo las políticas y cumpliendo con los protocolos y estándares internacionales para la interoperabilidad entre repositorios



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-
NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

Resumen

La industria automotriz, náutica, ferroviaria, agrícola y aeroespacial demanda desde las últimas décadas la manufactura de partes mecánicas de alta performance con el objetivo de disminuir costos de producción, de funcionamiento y acotar el impacto ambiental con materiales reutilizables. Tales necesidades pueden satisfacerse con materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras [PRF].

La obtención de piezas mecánicas de materiales compuestos requiere la remoción del exceso de material mediante mecanizado. En consecuencia, pueden generarse defectos que conducen a reducciones de capacidad de carga y/o falla prematura del componente diseñado. En este contexto, resulta de interés estudiar la relación entre los defectos generados y las variables de corte empleadas en operaciones de mecanizado con el objetivo de describir el acabado e integridad superficial en piezas PRF.

En el proyecto son realizados ensayos de mecanizado (operaciones de torneado y taladrado) empleando HSS (Acero rápido al Cobalto) como material de herramientas y PRF-V (fibra de vidrio) como material compuesto. Se diseña la geometría y sujeciones convenientes de las probetas, el rango de valores de las variables de corte, la metodología y los accesorios a adoptar en cada maquinado. Las superficies generadas describen el comportamiento más allá de las investigaciones consultadas [24-26/40-55] con base en laminados compuestos de "superficie plana" al enfocarse en laminados de "superficie compleja".

La comprensión del comportamiento de las probetas PRFV establece la condición óptima de parámetros de corte para obtener "buen" acabado e integridad superficial en cada operación de maquinado. En el torneado, se requiere velocidad de corte intermedia, de avance baja y profundidad de corte baja, mientras en el taladrado, sólo se optimiza el acabado o la integridad superficial en función del nivel de producción. Sin embargo, se arriba a la condición óptima mediante el diseño e implementación de una "Placa soporte" cuando se combina velocidad de avance alta y de corte baja (alta productividad). La selección de los anteriores parámetros de corte, minimizan los defectos encontrados: el largo de fibras sin cortar, la delaminación, la rugosidad superficial y degradación del material por temperatura.

Agradecimientos

A mi director el Dr. Amadeo Daniel Sosa y co-director el Dr. Leonardo Ariel Stocchi por guiar y acompañar en la ejecución de la tesis de grado.

A Juan Pablo Vitale por colaborar en el inicio del proyecto de investigación.

A Luciano Ditonto por capacitar en la operación de máquinas y seguridad en el taller.

A mis profesores por evacuaron dudas e informar en la utilización de dispositivos.

A mi familia y amigos por acompañarme en el proceso y el camino transitado en la universidad.

TABLA DE CONTENIDOS

	Página
<u>Resumen</u>	3
<u>Agradecimientos</u>	4
<u>1 - Definición y estado de la problemática abordada</u>	7
<u>2 - Material Compuesto: particularidades y generalidades</u>	8
2-1 Definición	8
2-2 Constituyentes	8
2-3 Procesamiento	12
2-4 Interfases en los materiales compuestos	13
2-4-1 La relación con las propiedades mecánicas	13
2-4-2 La relación con las propiedades térmicas	14
<u>3 - Cómo se obtienen las piezas, superficies generadas y la necesidad de realizar mecanizados</u>	15
3-1 La operación de torneado	17
3-2 La operación de taladrado	22
<u>4 - Mecanizado de Materiales Compuestos</u>	25
4-1 Torneado	25
4-1-1 Orientación de las fibras	25
4-1-2 Fuerza de corte y desgaste de la herramienta	25
4-1-3 Temperaturas de corte	27
4-1-4 Calidad de la superficie generada	28
4-1-5 Casos de estudio	29
4-1-6 Posibles defectos	30
4-2 Taladrado	31

4-2-1 Aspecto térmico	31
4-2-2 Fuerza de empuje y desgaste de la herramienta	32
4-2-3 Delaminación	32
4-2-4 Casos de estudio	34
4-2-5 Posibles defectos	36
<u>5 - Objetivos</u>	38
5-1 Objetivos particulares	38
<u>6 - Ensayos experimentales</u>	39
6-1 Ensayos de torneado	39
6-1-1 Características del ensayo y condiciones experimentales	
6-1-2 Relevamiento y análisis del daño	41
6-1-3 Análisis y discusión de resultados	43
6-1-3-1 Análisis de superficies	43
6-1-3-2 Acabado superficial	45
6-1-3-2 Integridad superficial	52
6-1-4 Condición óptima	57
6-2 Ensayos de taladrado	59
6-2-1 Características del ensayo y condiciones experimentales	59
6-2-2 Relevamiento y análisis del daño	61
6-2-3 Análisis y discusión de resultados	64
6-2-3-1 Fuerza de empuje desarrolladas	64
6-2-3-2 Integridad superficial	68
6-2-3-3 Acabado superficial	72
6-2-4 Condición óptima	75
<u>7- Conclusiones</u>	77
<u>8 - Referencias bibliográficas</u>	78

1- Definición de la problemática abordada

En el grupo de investigación Tecnología Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata, se realizan desde hace décadas investigaciones en el área de fabricación, acabado e integridad superficial. Los trabajos realizados incluyen estudio de los mecanismos de corte, variación de las dimensiones durante el tratamiento térmico, influencia de las variables durante el mecanizado, alteraciones a las propiedades de las superficies y sub-superficie, y mejoras a éstas mediante aplicación de recubrimientos duros [1-10]. El desarrollo de todos estos trabajos permitió a los integrantes del grupo adquirir un amplio conocimiento de los procesos de fabricación involucrados y las técnicas de caracterización empleadas para su estudio. Dado que todos los miembros del grupo pertenecen a la División Metalurgia del INTEMA-CONICET, reconocida mundialmente por sus trabajos en fundiciones de hierro, el material empleado en los estudios fue principalmente fundición de hierro con grafito nodular y otras aleaciones metálicas [11]. Sin embargo, gracias a la cooperación con investigadores de la división Compuestos Estructurales Termorrígidos del INTEMA-CONICET en los últimos años se amplió el foco de estudio hacia materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras [PRF], dado que logran combinar propiedades que no son alcanzables en los materiales metálicos. Los materiales compuestos, no sólo poseen excelentes cualidades mecánicas (alta resistencia y rigidez, bajo peso, aislación acústica, térmica y de vibraciones), también disponen de elevada resistencia a ambientes marinos y al ataque químico como es el caso de las fibras sintéticas (carbono, vidrio, etc). Esto los hace muy atractivos para aplicaciones estructurales y su utilización en vehículos.

La mejora continua de las prestaciones de vehículos persigue como objetivo disminuir los costos de producción y funcionamiento a la vez de acotar el impacto ambiental. Esto puede alcanzarse empleando materiales más adecuados que a su vez permitan su reutilización una vez que haya alcanzado su vida útil. En ese sentido, las industrias automotriz, naval y principalmente aeronáutica demandan componentes de bajo peso con elevada rigidez, resistencia y fiabilidad. Los PRF permiten satisfacer gran parte de estos requerimientos. Con el creciente desarrollo en las técnicas de procesamiento se han ampliado las posibilidades de su aplicación.

La manufactura de partes mecánicas de alta performance, empleando materiales compuestos, ha sido implementada en los últimos años por la industria automotriz, náutica, ferroviaria, agrícola y aeroespacial como base del diseño en ingeniería. Su desarrollo representa una ventaja competitiva en el marco tecnológico global. Las diversas técnicas de procesamiento y moldeo permiten obtener casi todas las superficies necesarias para la

manufactura de muchos componentes. Las superficies obtenidas por operaciones de mecanizado como el taladrado, el fresado o el roscado resultan ser críticas para el óptimo funcionamiento en servicio de las partes de un conjunto mecánico. En general, el procesamiento de materiales compuestos permite la obtención de piezas con dimensiones cercanas a la final, siendo necesaria la remoción del exceso de material mediante mecanizado, sólo en algunas superficies. Sin embargo, éstas suelen ser las más comprometidas o a las que se les exige tolerancias más estrechas, mayores prestaciones, fiabilidad, etc. El mecanizado permite la apertura de componentes, el corte a medida de estructuras y la obtención de agujeros de precisión, siendo necesario para el conformado de piezas en bruto y cumplir con tolerancias reducidas de componentes. Sin embargo, durante el procesamiento de los materiales compuestos, pueden generarse defectos que pueden conducir a reducciones en la capacidad de carga y/o falla prematura del componente diseñado. Por ello existen numerosas publicaciones recientes en congresos y revistas especializadas que tienen por objeto estudiar el mecanizado de piezas con base en laminados de materiales compuestos reforzados con fibras [12-55].

Debido a la compleja interacción entre las herramientas y el material compuesto durante el mecanizado se generan esfuerzos localizados y calor que afectan a las herramientas y a las piezas. Éstos pueden introducir una serie de defectos en las superficies y sub superficies que modifiquen o condicionen el comportamiento en servicio. Los mismos constituyen parte de las características particulares del acabado e integridad superficial de los componentes. En este contexto resulta de interés estudiar la relación entre los defectos generados y las variables de corte empleadas en diferentes operaciones de mecanizado, para poder describir el acabado e integridad superficial de las piezas PRF maquinadas y predecir su comportamiento en servicio.

En este proyecto se realizará un relevamiento exhaustivo del estado del arte en esta temática particular para posteriormente definir objetivos particulares que posibilite avanzar en el estudio del comportamiento de materiales compuestos reforzados con fibras frente a operaciones de mecanizado.

2- Materiales Compuestos: generalidades y particularidades

2-1 Definición

Un material compuesto es una combinación de dos o más materiales que pueden ser diferenciados mediante inspección visual y dan como resultado un nuevo material.

Los materiales compuestos permiten el diseño de sus propiedades de forma prácticamente arbitraria. El diseño es realizado en función de las requerimientos de su aplicación en servicio y surgen de la combinación de las propiedades físicas/químicas de sus materiales constituyentes como sucede en la figura 1 (propiedades esquemáticas "M1" y "M2" donde la combinación A es el caso ideal y en las restantes varía la influencia de cada constituyente y su interacción). En general, las propiedades resultantes del compuesto dependen del método de procesamiento, la forma, el tipo y la distribución del refuerzo seleccionado [15-17]. Una simple manera de estimar y modificar las propiedades resultantes del compuesto en diseño es con la "Regla de mezclas". Se trata del promedio aritmético de las propiedades de los constituyentes, ponderado por sus volúmenes fraccionales.

2-2 Constituyentes

Los materiales constituyentes, o simplemente constituyentes, son diferenciados por dos grupos en relación a sus funciones. El primer grupo se encuentra constituido por la matriz, quien se encarga de alojar al refuerzo, proteger de agentes externos, transferir y distribuir uniformemente las cargas en servicio. En los materiales compuestos, la matriz se caracteriza por poseer muy baja densidad, dureza y resistencia a comparación de las fibras o partículas que ofician de refuerzo. El segundo grupo lo conforma el refuerzo y se emplea, principalmente, para mejorar y complementar las propiedades físicas de la matriz. En relación al proyecto de estudio y a las propiedades resultantes del compuesto, se atiende principalmente a las propiedades físicas y sus sub-divisiones como las propiedades mecánicas y térmicas. En la etapa de diseño de cierto compuesto puede que interese analizar las propiedades químicas como: la afinidad electrónica, la estabilidad química, la corrosividad, comportamiento hidrófobo o la reactividad con otras sustancias.

Las propiedades físicas de mayor interés para los posibles materiales a emplear como matriz (polímeros, metales o cerámicos) se encuentran en la Tabla 1. Entre ellas se destaca la "Temperatura de transición vítrea", la cual, toma relevancia cuando la matriz se encuentra solicitada térmicamente. A partir de dicha temperatura, dependiente del material polimérico seleccionado, las propiedades mecánicas disminuyen considerablemente, dando como resultado un comportamiento más blando. Asimismo, en la Tabla 2 se observan las propiedades mecánicas de interés.

	K (W/m°C)	Cp (kJ/Kg°C)	α (10^{-6} °C)	Tg (°C)	Tm (°C)
<i>Polímeros – Termorrígidos</i>					
Poliéster no saturado	0,17-0,22	1,3-2,3	55-100	70-	-
Epoxi	0,17-0,2	1,05	45-65	65-175	-
Fenólico	0,12-0,24	1,4-1,8	25-60	300	-
Bismaleimidas				230-345	-
Viniléster				70-	-
<i>Polímeros – Termoplásticos</i>					
Polipropileno	0,11-0,17	1,8-2,4	80-100	-20-5	165-175
Poliamida	0,24	1,67	80-100	55-180	265
polisulfuro de fenileno	0,29	1,09	49	85	285
Poliéter éter cetona	0,25	1,34	40-47	145	345
<i>Cerámicos</i>					
Alúmina	39	0,775	7,4		
Nitruro de Silicio (sinterizado)	33	1,1	3,1		
Carburo de Silicio (sinterizado)	71	0,59	4,1		
<i>Metales</i>					
Aluminio (7075 T6)	130	0,96	23,4		
Acero (1020)	51,9	0,486	11,7		

K (Conductividad térmica), Cp (Calor específico a presión cte.), α (Coeficiente de expansión térmico), Tg (Temperatura de transición vitrea), Tm (Temperatura de degradación).

Tabla 1. Propiedades térmicas para distintos materiales a utilizar como matriz. [16]

	Densidad (mg/m ³)	Módulo de Young (Gpa)	Tensión de fluencia (Mpa)	Deformación a la rotura (%)
<i>Polímeros – Termorrígidos</i>				
Poliéster no saturado	1,1-1,23	3,1-4,6	50-75	1-6,5
Epoxi	1,1-1,2	2,6-3,8	60-85	1,5-8
Fenólico (Baquelita)	1-1,25	3-4	60-80	1,8
Bismaleimidas	1,2-1,32	3,2-5	48-100	1,5-3,3
Viniléster	1,12-1,13	3,1-3,3	70-81	3-8
<i>Polímeros – Termoplásticos</i>				
Polipropileno	0,9	1,1-1,6	31-42	100-600
Poliamida	1,1-1,2	2	70-84	150-300
polisulfuro de fenileno	1,36	3,3	84	4
Poliéter éter cetona	1,26-1,32	3,2	93	50
<i>Cerámicos</i>				
Alúmina	3,98	380	282-551	-
Nitruro de Silicio (sinterizado)	3,3	304	414-650	-
Carburo de Silicio (sinterizado)	3,2	207-483	96-520	-
<i>Metales</i>				
Aluminio (7075 T6)	2,8	71	572	11
Acero (1020)	7,85	207-483	420	15 (min)

Tabla 2. Propiedades físicas para distintos materiales a utilizar como matriz. [16]

El refuerzo empleado puede adoptar las formas genéricas de partículas, fibras continuas o discontinuas, ver figura 2. Luego, la forma y la disposición del refuerzo dan

como resultado el tipo de compuesto: unidireccional, laminado, partículas en una matriz o una combinación de las anteriores. En relación al material compuesto a evaluar en el proyecto de Plástico Reforzado con Fibra de Vidrio [PRFV], se presta mayor atención al refuerzo tipo fibra (material vidrio). Durante el procesamiento de fibras sintéticas se busca obtener cierto ordenamiento en su estructura interna a través de sus elementos constituyentes. La disposición concéntrica al eje de la fibra y el empaquetamiento ordenado de los elementos constituyentes de la fibras de vidrio, dan como resultado mejores propiedades físicas a la misma vez que aumenta el control y cuidado del procesamiento de las fibras. La cualidad más importante del refuerzo tipo fibra son sus elevadas propiedades mecánicas específicas. Teniendo en cuenta la Tabla 3 y al comparar la rigidez específica del acero con respecto a la fibra de carbono, la primera resulta 4,8 veces menor. En la Tabla 4 se presentan las propiedades físicas de los distintos materiales tipo fibra. Cabe destacar la diferencia de valores de las propiedades físicas en las Tabla 1 y 2 frente a las Tablas 3 y 4 (para matrices y refuerzo tipo fibra, respectivamente).

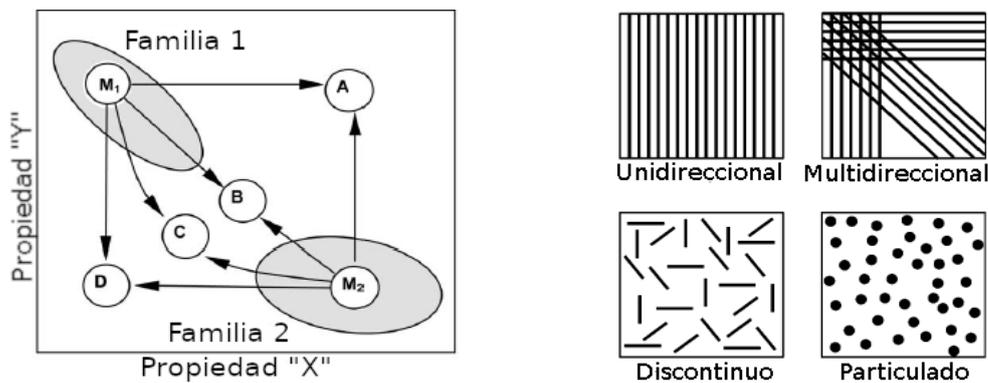


Fig. 1) Posibles propiedades resultantes en el compuesto. Fig. 2) Tipos de refuerzo. [15]

Fibra	Densidad, ρ (kN/m^3)	Tensión de fluencia, S (Gpa)	S/ ρ (km)	Módulo de Young, E (Gpa)	E/ ρ (mm)
Aluminio	26,3	0,62	24	73	2,8
Titanio	46,1	1,9	41	115	2,5
Acero	76,6	4,1	54	207	2,7
Vidrio-E	25	3,4	136	72	2,9
Vidrio-S	24,4	4,8	197	86	3,5
Carbono	13,8	1,7	123	190	14
Berilio	18,2	1,7	93	300	16
Boro	25,2	3,4	137	400	16
Grafito	13,8	1,7	123	250	18

Tabla 3. Propiedades físicas específicas del refuerzo continuo tipo fibra. [17]

	Carbono-Alto	Carbono- Alta	Kevlar 49	Vidrio-E	Vidrio-S
Diámetro (um)	5-8	6-8	8-14	10-20	10-20
Densidad (kg/m ³)	1,81	1,78	1,44	2,62	2,46-2,49
<i>Modulo de Young (Gpa)</i>					
Paralelo al eje fibra	400	230	131	80-81	88-91
Perpendicular al eje fibra	12	20	70	-	-
Tensión de fluencia (Gpa)	2,5-4,5	3,8-4,2	3,6-4,1	3,1-3,8	4,38-4,59
Deformación a la rotura (%)	0,6	2	2,8	4,6	5,4-5,8
<i>Coefficiente de expansión térmico, α (10⁻⁶/K)</i>					
Paralelo al eje fibra	-0,5	-0,6	-4,3	6	2,9
Perpendicular al eje fibra	7	10	41	-	-
Conductividad térmica					
K (W/mK)	70	11	0,04-1,4	10-13	1,1-1,4
Calor específico (kJ/KgK)	0,7-0,9		0,769	0,45	0,41

Tabla 4. Propiedades físicas y geométricas del refuerzo continuo tipo fibra. [16]

2-3 Procesamiento

Dado que el material compuesto a ensayar en el proyecto se trata de muestras provenientes de un tubo tipo PRFV, es importante conocer el método de procesamiento por el cual fue obtenido. El proceso de Filament Winding consiste en una primera instancia de la impregnación de resina líquida en el refuerzo seleccionado. En el caso de tubos PRFV, un grupo de fibras de vidrio son embebidas en la resina líquida alojada en el interior de una batea para lograr la impregnación en ellas, como puede verse en la figura 3-a. A continuación, las fibras son enrolladas en el mandril (su diámetro determina el diámetro interno del tubo) y son tensadas empleando dos ángulos de procesamiento simétricos como se observa en la cara lateral de la Fig. 3-b. La selección del ángulo de procesamiento depende de la aplicación en servicio ya que condiciona las propiedades físicas resultantes del tubo. Es necesaria la composición de dos movimientos para conformar el tubo: la rotación del mandril sobre su propio eje y el movimiento alternativo del carrete paralelo al eje del mandril (línea a trazos en el esquema de la Fig. 3-a. Luego, al realizar de forma repetida la composición de los movimientos anteriores, se consigue la superposición de capas hasta alcanzar el espesor necesario. Por último, mediante el proceso de Curado se obtiene la pieza final constituida únicamente por fases sólidas.

El mencionado proceso de Curado consiste en la solidificación de materiales poliméricos. En los casos de matrices termoestables o termorrígidas, el calor es utilizado como catalizador de la reacción química de polimerización. En general, el aumento de

temperatura implica un menor tiempo de solidificación, teniendo presente evitar la temperatura de degradación del material. El proceso de Curado es activado térmicamente debido a los catalizadores y/o endurecedores que no reaccionan en las temperaturas alcanzadas durante el proceso Filament Winding. Asimismo, el aporte de calor posibilita la redistribución de la resina debido a la disminución de su viscosidad, como así también la separación de los vapores volátiles de los solventes y el agua. En caso de no alcanzarse los puntos anteriores, se favorece la formación de discontinuidades perjudiciales en el rendimiento en servicio de la pieza procesada.



Fig. 3) Procesamiento Filament Winding: a) Esquema; b) Resultado final.

2-4 Interfases en materiales compuestos

Se define como "interfases" a toda superficie de unión donde exista una discontinuidad de algún tipo. Es creada durante el procesamiento de los materiales compuestos, y en el caso de los PRFV, ocurre gracias al curado. Es posible obtener interfases del tipo bidimensional o tridimensional. En el primer caso, ocurre un cambio abrupto de propiedades desde la matriz hacia el refuerzo, mientras que en el segundo caso, existe una región en la cual las propiedades no son las mismas que los demás constituyentes. De las anteriores, es deseable el tipo tridimensional donde se evitan cambios abruptos o discontinuidades en la estructura [18-19]. La presencia de materiales disímiles como en caso de los PRFV, donde el refuerzo (inorgánico) se encuentra disperso y alojado dentro de una matriz polimérica (orgánica) dificulta la compatibilidad química entre ellos y el control sobre la generación de discontinuidades en el procesamiento.

2-4-1 La relación con las propiedades mecánicas

En general, ocurre que las propiedades mecánicas en las interfases se aproximan a las de la matriz y en función de la calidad de las interfases logradas, relacionada con la cantidad

de discontinuidades presentes, es como se determinan propiedades físicas superiores o inferiores del componente final PRF.

Al disponer en servicio cierto material compuesto con presencia de discontinuidades, los mismos actúan como concentradores de tensiones y promueven la generación de fisuras al ser superada la resistencia a la rotura de forma localizada. Una vez nucleada la fisura, su dirección de propagación y crecimiento es determinada por la zona más débil mecánicamente: interlaminar o radial al eje axial del refuerzo. La dirección radial se establece producto de interfases más rígidas a diferencia de la matriz, con lo cual, el crecimiento del daño a través de la sección transversal de la pieza implica una notable reducción de la integridad estructural del compuesto y aumenta la vulnerabilidad de una falla catastrófica. Por otro lado, las interfases con bajo módulo de Young (más débil a diferencia de la matriz) confiere un comportamiento más resistente al compuesto gracias a la elevada superficie interfacial, toda área entre matriz/refuerzo como se observa en las Figs. 5)a-b. La gran superficie interfacial posibilita tanto la generación como el crecimiento del daño en la pieza PRF sin salir de servicio de forma prematura. Lo anterior se puede comprender como una suerte de mecanismo de absorción de energía del daño.

2-4-2 La relación con las propiedades térmicas

Como se mencionó anteriormente, la calidad de las interfases determinan la cantidad de discontinuidades allí presentes, y consecuentemente, la transferencia de calor en el PRF. Dado que en la fabricación de piezas mecánicas es necesaria la generación de nuevas superficies por medio del mecanizado, se debe tener presente que parte de la energía aportada en la acción de corte es liberada como energía térmica o calor.

En el mecanizado de materiales tipo PRF resulta conveniente que el tiempo de contacto de la herramienta de corte sea pequeño con el objetivo de evitar la degradación térmica de la matriz polimérica, la aparición de fisuras promovidas por gradientes de temperaturas o deformaciones debido a la diferencia de los coeficientes de dilatación térmicos de los constituyentes. Todos los anteriores forman parte de los defectos típicos de origen térmico en el mecanizado y determinan la calidad de las superficies generadas. Como regla general, para evitar posibles daños de origen térmico en materiales con matriz polimérica, se debe tener presente las temperaturas límite de transición vítrea de la Tabla 1.

3 - Cómo se obtienen las piezas, superficies generadas y la necesidad de realizar mecanizados

De la extracción de minerales de la naturaleza y su procesamiento, se suelen obtener componentes sólidos básicos con diferentes geometrías, siendo las más usuales prismáticas o cilíndricas. En la siguiente etapa de fabricación de un producto, pieza única o ensamble de piezas, es necesario modificar y crear ciertas superficies que permitan generar movimientos y transferencia de carga, para cumplir con sus especificaciones de diseño y funciones para las que fue creado. La operación por la cual usualmente son generadas las superficies con formas regulares, irregulares o complejas es conocida como *mecanizado*. Consiste en la remoción de material de una de las dos formas básicas posibles de la *pieza en bruto*. Por medio del empleo del filo de una herramienta de corte y el movimiento relativo entre este último y la pieza a maquinar, es como son generadas las nuevas superficies y se pueden alcanzar las especificaciones de la *pieza final*. Por último, al vincular adecuadamente los distintos componentes en un ensamble de piezas finales se obtiene como resultado el conjunto mecánico diseñado.

Dado que el elevado número de factores tecnológicos involucrados en los procesos de fabricación empleados para obtener componentes que puedan cumplir con las funciones y especificaciones buscadas inciden significativamente en el costo y productividad, se establecen tolerancias dimensionales y de forma (rangos de valores aceptables) en los que puede encontrarse la pieza final. Asimismo, surgen dos grupos de características para describir el estado de las superficies generadas por mecanizado: el Acabado y la Integridad Superficial. Técnicamente, el "Acabado superficial" cuantifica la textura superficial por medio de las especificaciones Dimensionales, de Forma y la Rugosidad Superficial, mientras que la "Integridad superficial" analiza las propiedades (físicas, químicas, mecánicas, metalúrgicas, etc.) de las superficies generadas, así como las sub-superficiales. Durante los procesos de manufactura estas propiedades suelen alterarse y pueden generarse defectos que estarán presentes en las piezas post mecanizado. Haciendo uso de un control adecuado de los parámetros anteriores se obtienen piezas mecanizadas que no son idénticas pero se encuentran dentro de los rangos aceptables, por lo cual son adecuadas para cumplir con las especificaciones de diseño. Aún con una cierta cantidad de defectos presentes, los componentes podrían considerarse aptos para servicio, lo que facilita la fabricación manteniendo acotados los costos de producción. Sin embargo, para ello debe conocerse la probabilidad de aparición, y el efecto de los mismos sobre el comportamiento en servicio.

Como se mencionó previamente durante el mecanizado una o varias aristas cortantes entran en contacto con la pieza para quitar material en forma de virutas. Dependiendo de la forma de la herramienta y los movimientos relativos empleados es posible obtener diferentes tipos de superficies como: Planas (refrentado en torno, planeado en limadora o fresadora), de revolución (agujeros taladrados, cilindros y conos torneados, etc), complejas (contorneados en fresadora).

Para lograr que este proceso se realice es necesario que la fuerza de contacto entre la pieza y la herramienta se suficiente para producir deformación plástica cizallante localizada en la zona del corte. Una porción de material altamente deformada deslizará por la cara de ataque de la herramienta ejerciendo presión y fricción sobre la misma. Al mismo tiempo la cara de incidencia podría talonar (contacto indeseado) sobre la superficie generada produciendo fricción.

La ejecución de las operaciones de mecanizado requieren de una elevada energía que es aportada mediante máquinas herramienta (torno, taladradora, fresadora, etc..). Parte de la misma se transforma en calor e incrementa notablemente la temperatura en la zona de corte, factor importante ya que influye en el acabado e integridad superficial de la pieza final:

- La introducción de calor provoca un gradiente de temperaturas en la zona de corte que ocasiona expansión volumétrica localizada en la zona maquinada, que puede conducir a diversos resultados, dificultando el cumplimiento de las tolerancias asignadas.

- El incremento de temperatura puede provocar cambios microestructurales o modificación de las propiedades en la superficie maquinada, así como en las primeras capas subsuperficiales.

- La temperatura excesiva reduce la resistencia mecánica, la dureza y la resistencia al desgaste de la herramienta. Esto conduce a la generación de daño por distintos mecanismos tales como deformación plástica, astillamiento, craterización, etc., los cuales modifican la geometría dando lugar a un comportamiento indeseado que se traduce en reducción de la productividad y la calidad, así como en la obtención de piezas defectuosas.

El desgaste de la herramienta es un factor importante en todas las operaciones de maquinado porque define su vida útil, la calidad de la superficie maquinada y su precisión dimensional, o también, la economía del maquinado. El daño de la herramienta y los cambios en su geometría durante el corte se manifiestan de diferente manera, pero en general, ocurre un decremento de la calidad de corte. Existen diferentes tipos de daño en las herramientas y su aparición depende de los materiales de la herramienta y la pieza, la geometría de la herramienta, los parámetros del proceso, el empleo de fluido de corte y las

características estructurales de la máquina. El modo de fallo o daño de herramientas más deseado es el de desgaste del filo dado que bajo ciertas condiciones puede predecirse. En consecuencia, es posible cambiar el filo de corte o reafilarlo antes de que el nivel de desgaste produzca resultados indeseables en el proceso de corte.

La operación de mecanizado constituye en sí un sistema máquina-herramienta-pieza particular en el que intervienen diferentes parámetros propios de cada uno de ellos. En cada proceso de maquinado en particular habrá una serie de parámetros cuya correcta selección permitirá alcanzar un resultado que conduzca a satisfacer los requerimientos de diseño (geometría, dimensiones, acabado e integridad superficial). La optimización del proceso de maquinado requiere la comprensión de las relaciones entre los parámetros de corte (velocidad de corte, de avance y la profundidad de corte), el tipo de material a maquinar y la consideración tanto del material como la forma de la herramienta. En relación al sistema es como surge el concepto de *maquinabilidad*. No se trata de una propiedad del material como la resistencia y la tensión de fluencia, si no que se trata de una cualidad, el tipo de respuesta y la facilidad con que puede removerse material de la pieza a trabajar [16].

La optimización del maquinado puede abordarse de tres maneras conocidas como *criterios de maquinabilidad*: 1) el desgaste o vida de la herramienta, 2) la fuerza sobre la herramienta y el consumo de potencia, y 3) el acabado e integridad superficial de la pieza maquinada. Un ejemplo de *buen* maquinabilidad se da cuando la tasa de desgaste de la herramienta es baja, con pequeñas fuerzas de corte y buen acabado superficial de la pieza maquinada. Otra manera menos usual de describir la maquinabilidad, es por medio del tipo de viruta formada y las temperaturas de corte desarrolladas.

Dado que existe un gran número de operaciones de mecanizado, se procede a describir dos de las más empleadas (torneado y taladrado), en las que el sistema completo no es excesivamente complejo. La primera de ellas (torneado) se lleva a cabo con una herramienta monocortante, simplificando en gran medida el análisis del proceso. La segunda operación trata de una etapa de fabricación muy necesaria en la fabricación de muchos componentes de materiales compuestos, donde la herramienta empleada posee dos filos cortantes diametralmente opuestos. Cada operaciones presenta parámetros de corte específicos, que pueden ser evaluados para optimizar los procesos en base a el acabado e integridad superficial obtenidos.

3-1 La operación de torneado

El torneado engloba todas las operaciones de mecanizado llevadas a cabo en la máquina Torno con herramienta monocortante. En ella la pieza a mecanizar rota sujeta al husillo de

la máquina mientras que la herramienta se desplaza siguiendo distintas trayectorias con una velocidad de avance dada. Así, las posibles operaciones a realizar en un torno son numerosas, siendo dos de las más comunes el cilindrado y el refrentado. En el primer caso, la dirección de avance de la herramienta es paralela al eje del husillo de la máquina (Fig. 5-a), mientras que en el segundo caso, la dirección de avance es perpendicular a dicho eje, (Fig. 6-b). En las imágenes de la Figura 5 se indica el sentido de rotación de la pieza, dirección de avance de la herramienta y en color violeta la superficie generada para las operaciones mencionadas.



Fig. 5) Esquemas para las operaciones de: a) Cilindrado; b) Refrentado.

Los parámetros de corte en el torneado son la velocidad de corte (m/min), determinada por el diámetro de corte y la velocidad de rotación de la pieza (RPM), la velocidad de avance o de traslación de la herramienta (mm/rev) y la profundidad de corte (mm). Debido a la composición de los movimientos mencionados y de acuerdo a la selección de los parámetros de corte, se produce una viruta que desliza sobre la cara (de ataque o desprendimiento) de la herramienta [21], como se describe en la figura 6.

La herramienta de corte puede ser de una sola pieza, tratándose de una barra sólida prismática conocida como "Bit", a la que se le practica diversos mecanizados abrasivos para obtener los ángulos característicos a emplear (Figura 7-a). Por otro lado, la herramienta de corte puede ser tipo inserto, la cual se aloja en un portaherramientas y a diferencia de los bits no es usual el afilado (Figura 7-b).

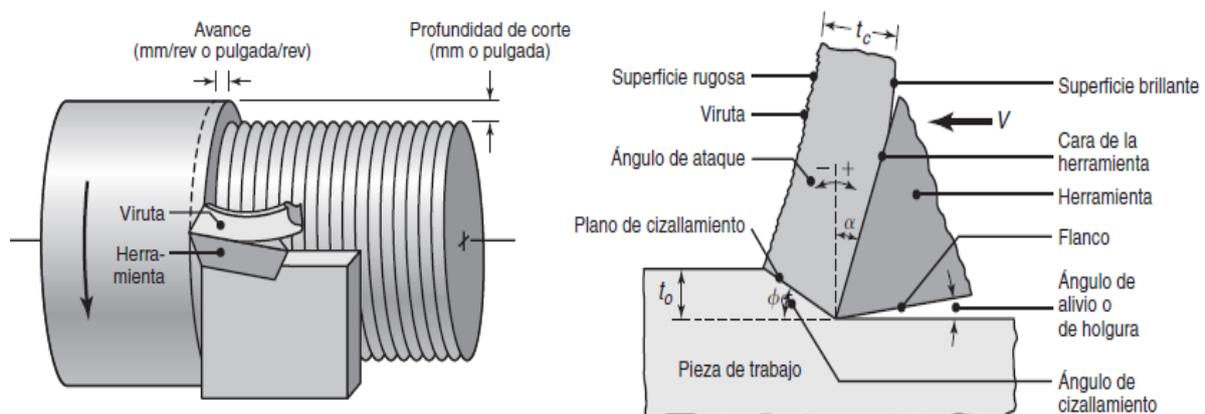


Fig. 6: a) Cilindrado y parámetros básicos; b) Esquema de formación de viruta. [21]

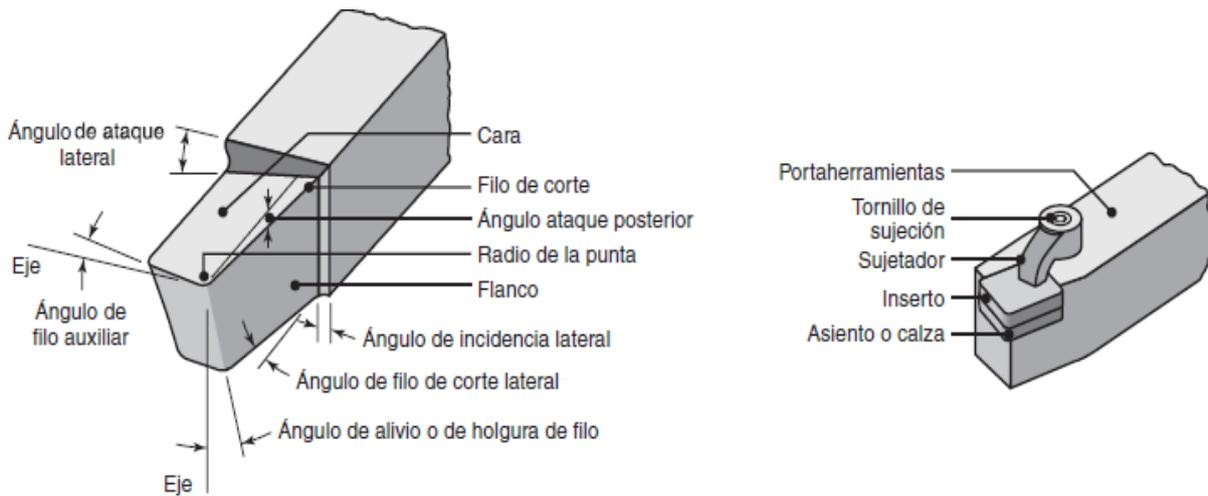


Figura 7. Tipos de herramienta: a) bit; b) inserto. [21]

Para analizar el proceso de corte se suele presentar un esquema bidimensional conocido como *teoría del corte ortogonal* (Fig. 6-b). La teoría se define entorno a la descripción de un plano de cizallamiento y el esquema responde al modelo de Merchant. Resulta interesante observar que la forma de la herramienta, la profundidad de corte y la velocidad de corte, son variables independientes en el proceso de corte. En la mayoría de los materiales con comportamiento elastoplástico la viruta se produce delante de la herramienta por medio de la deformación plástica y el cizallamiento continuo del material a lo largo del plano de corte o de cizallamiento. El proceso involucra una gran energía de deformación localizada y fricción, lo que produce daño en las herramientas y puede generar defectos en la superficie maquinada.

El desgaste de la herramienta puede traducirse en un daño de origen térmico y/o mecánico en la pieza maquinada [22]. Con respecto a la herramienta y la zona de corte, los daños típicos por desgaste pueden ser: a) elevados esfuerzos localizados en la punta de la herramienta, b) altas temperaturas en la cara de ataque, c) el deslizamiento de la viruta a lo largo de la cara de ataque o d) deslizamiento de la herramienta a lo largo de la superficie recién mecanizada. El desgaste de la herramienta y los cambios en su geometría durante el corte se clasifican según: a) desgaste del flanco, b) craterización, c) filo de corte astillado, d) agrietamiento en la cara de ataque, e) filo recrecido [BUE] y f) falla catastrófica (observar las imágenes de la figura 8).

Uno de los mecanismos de daño posible (BUE) se produce por adhesión del material maquinado en el filo, que modifica la geometría del mismo y al desprenderse arrastra material de la herramienta. El fenómeno filo recrecido desarrollado en la punta de la herramienta tiene influencia sobre el acabado superficial y ocurre al emplear velocidades de

corte inferiores a las recomendadas por los fabricantes de herramientas para determinados materiales. El daño producido se observa en la superficie generada como un rayado con un patrón diferenciado al rayado recto típico del torneado. Otro fenómeno, conocido como "talonado", se manifiesta como un desgaste excesivo en la cara de incidencia de la herramienta, producto de la fricción indeseada contra la superficie maquinada. En materiales poco tenaces, la generación de calor combinada con los esfuerzos de corte, inducen daños superficiales como desgarramiento y agrietamiento.

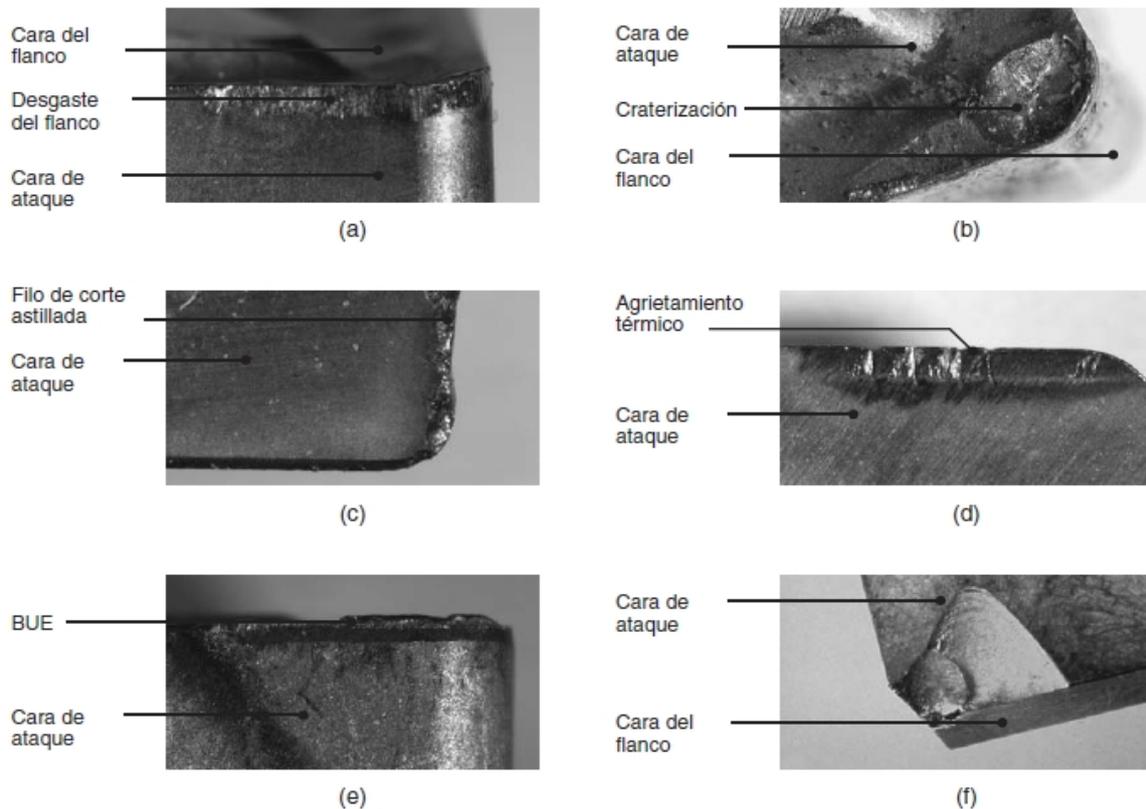


Figura 8. Desgaste de la herramienta y los cambios en su geometría. [21]

El desgaste del flanco se produce en la cara de incidencia (cara del flanco como puede verse en la Fig. 8-b) y se atribuye al rozamiento de la herramienta a lo largo de la superficie maquinada, produciendo un desgaste adhesivo o abrasivo a alta temperatura que afecta de manera adversa las propiedades del material de la herramienta. En uno de sus estudios sobre el maquinado de aceros, F.W. Taylor, estableció la siguiente relación aproximada:

$$V \cdot T^N = C$$

Donde "V" es la velocidad de corte (m/min), "T" el tiempo (min) requerido para desarrollar una cierta profundidad de desgaste en la cara de incidencia y "N" un exponente adimensional que depende del material de la herramienta y de la pieza de trabajo. La

constante “C” equivale a la velocidad necesaria para producir el desgaste límite en un período de corte de 1 minuto. Las curvas de Taylor para varios materiales son graficadas en escala doble logarítmica en la figura 9. Resulta interesante analizarlas porque reflejan la importancia de la velocidad de corte en la *vida de la herramienta*. Se observa que el aumento de la velocidad de corte implica una disminución de su vida útil para todos los materiales. La pendiente de las rectas corresponde al valor del exponente “n” para distintos materiales de herramienta.

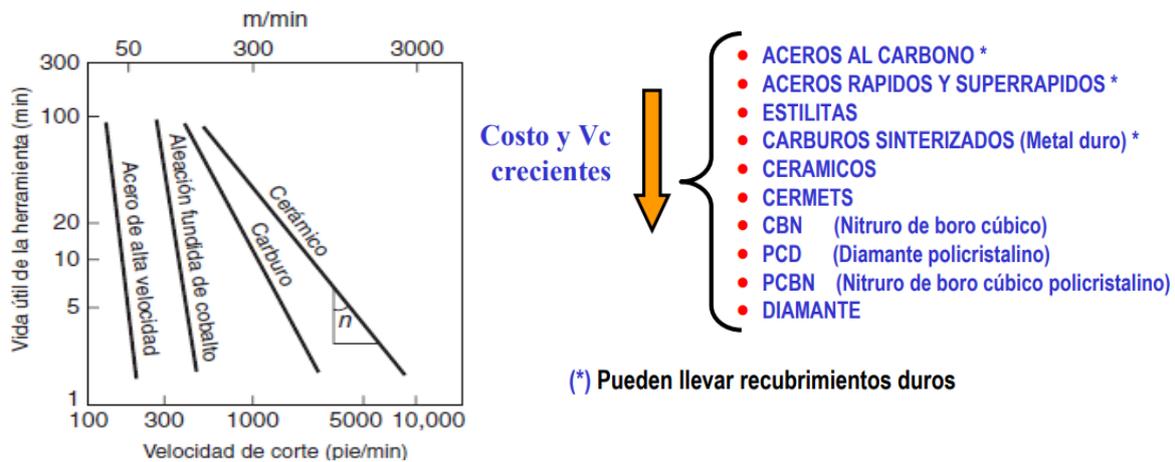


Figura 9. Curvas de Taylor para materiales de herramienta, [21]. Figura 10. Listado de materiales de herramientas, [22].

La selección del material a emplear como herramienta se realiza en función de la dureza, la resistencia al corte y la ductilidad del material a mecanizar. Puede ser también en base a otras características como la disipación de calor, la geometría de la herramienta, la resistencia al choque térmico, la afinidad química o el costo. En la figura 10 se listan los materiales de herramientas de corte en orden creciente de resistencia al desgaste y costo.

Respecto del material a mecanizar, las posibilidades según las calidades ISO [23] se resumen en la figura 11. Existen seis tipos diferenciados de acuerdo a la maquinabilidad y las exigencias sobre la herramienta. Por lo general, en función del material de la pieza a ser mecanizada se seleccionan las variables de corte, ángulos de corte y el material de la herramienta. Los ángulos más importantes y comúnmente informados son:

- El ángulo de ataque: controla la dirección del flujo de las virutas y la resistencia de la punta de la herramienta. Los ángulos de ataque positivos disminuyen las fuerzas de mecanizado y se emplean para materiales blandos y dúctiles, mientras que los ángulos negativos mejoran la resistencia estructural de la herramienta y se emplean para materiales duros y frágiles.

- El ángulo de incidencia: controla el contacto y la posible fricción entre la herramienta y superficie mecanizada. Al emplear ángulos grandes, la punta de la

herramienta puede astillarse por pérdida de rigidez estructural, mientras que un ángulo pequeño incrementa la posibilidad de talonado e implica un excesivo desgaste del flanco y acabado pobre.

ISO P	Acero	ISO M	Acero inoxidable	ISO K	Fundición
					
ISO N	Aluminio	ISO S	Superalcaciones termo-resistentes	ISO H	Material endurecido
					

Fig. 11. Calidades ISO en función del material a mecanizar. [23]

3-2 La operación de taladrado

La operación conocida como Taladrado trata de una etapa de fabricación donde son generadas superficies de revolución como los orificios o agujeros. Para lograr la acción de corte se pueden emplear distintas máquinas, como: taladro manual, taladradora de banco, fresadora, torno, etc. Por lo general, es necesario el maquinado de agujeros con propósitos específicos de diseño como: reducción de peso, ventilación, conductos, acceso al interior de la pieza o el ensamble de distintas piezas entre sí mediante la sujeción con elementos mecánicos como pernos, tornillos o remaches.

El maquinado de un agujero resulta de la acción de uno o más filos con una composición de un movimiento rotacional y uno de avance. Debido al movimiento giratorio, el taladrado produce orificios con un rayado circunferencial en sus paredes, aspecto significativo en relación a la integridad superficial de la pieza dado que podría disminuir su resistencia a la fatiga. El diámetro de un orificio producido por taladrado es ligeramente mayor al diámetro de la broca, hecho evidenciado al retirar la broca con facilidad del orificio maquinado. Dicha diferencia de tamaño depende de la calidad de la broca, de la máquina utilizada y las propiedades térmicas producto del calor generado en el corte. Para mejorar el acabado superficial y la precisión dimensional de los agujeros obtenidos por taladrado, pueden aplicarse otras operaciones posteriores como el escariado, alesado, bruñido, etc.

La herramienta de corte empleada en la operación de taladrado es conocida como broca. En la figura 12 se presentan distintos tipos de brocas, siendo la *helicoidal*

convencional de doble filete la más difundida por su versatilidad, bajo costo y re-afilable. La misma es muy utilizada en el mercado gracias a su aplicabilidad en diversos materiales mecanizables. El material comúnmente empleado para la fabricación de brocas es el Acero rápido al Cobalto (HSS) aunque también se suele usar metal Duro (WC). La geometría de su punta tipo cono es tal que el ángulo normal de ataque y la velocidad del filo de corte varían con la distancia a partir del centro de la broca. Las características geométricas son: a) ángulo de punta de 118° a 135° ; b) ángulo de incidencia de 7° a 15° ; c) ángulo del borde biselado de 125° a 135° , d) ángulo de hélice de 15° a 30° , e) dos filos de corte y dos canales helicoidales de evacuación de virutas que permiten al fluido de corte llegar a la punta.

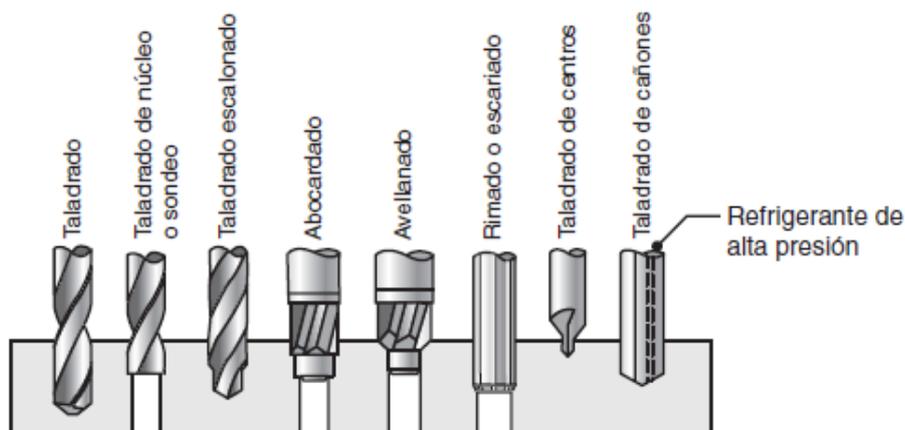


Fig. 12. Distintos tipos de herramientas de corte para taladrado. [21]

Existen brocas especiales cuyo diseño parte de la simple broca helicoidal e introducen modificaciones en los ángulos y geometrías para generar orificios más precisos, minimizar la fuerza de empuje y el torque, además de optimizar la vida de la herramienta. Algunas brocas tienen orificios longitudinales a través de los cuales circula fluido de corte, facilitando la lubricación, refrigeración y la evacuación de las virutas. Para mejorar el comportamiento también se puede seleccionar materiales de herramienta más adecuados y aplicar recubrimientos superficiales tales que aumenten la vida útil de la broca.

La generación de orificios o agujeros se logra por medio de la aplicación de fuerza y par necesarios, tales que produzcan el arranque de viruta. En el taladrado, la “Fuerza de Empuje” es una componente de la fuerza resultante y actúa según el eje axial de la herramienta. Si la fuerza de empuje es excesiva, puede provocar distorsiones en la pieza cuando la misma no posee suficiente rigidez estructural, o generar movimientos indeseados si la sujeción es deficiente. El torque necesario puede emplearse para estimar el requerimiento de potencia y seleccionar una máquina acorde. Sin embargo, es aún más importante realizar mediciones de la fuerza de empuje ya que es la principal variable a

controlar para evitar daños. Las mediciones de fuerza y torque suelen realizarse por medio de dispositivos conocidos como dinamómetros. La pieza de trabajo se sujeta al dispositivo, el cual se encuentra fijado a la máquina, para ejecutar las mediciones de fuerza de empuje y el torque desarrollado. La fuerza de empuje depende de factores como: a) resistencia del material de la pieza, b) la velocidad de avance de la broca, c) la velocidad de corte, d) diámetro de la broca, e) geometría de la broca, f) fluido de corte y g) cambios en la geometría de la broca producto del desgaste.

El desgaste de la herramienta produce aumento de la fuerza de empuje desarrollada y variaciones geométricas de la herramienta de corte. El desgaste puede tener un efecto significativo en el desempeño y en particular en la región de los filos de corte o el borde biselado ya que dicha zona implica alrededor de un 50% de la fuerza de empuje desarrollada. La tasa de desgaste aumenta rápidamente con el número de agujeros practicados y tiende a un valor constante. Para evitar las mencionadas variaciones y defectos, se suele acondicionar las brocas utilizando accesorios especiales para el reafilado. El empleo de dispositivos especiales se debe a la necesidad de obtener resultados precisos en cuanto a su geometría (filos de corte simétricos y ubicados correctamente).

La producción de agujeros por taladrado implica la generación de ciertos defectos intrínsecos de la operación. Al emplear brocas de gran diámetro resulta conveniente practicar un orificio previo tal que el contacto pieza-herramienta sea menor, al igual que la fuerza de empuje. Dado que las brocas no realizan centrados y tienden a deslizarse sobre la pieza de trabajo al inicio de la operación, el orificio puede iniciarse en una posición incorrecta y resultar desviado. En estos casos puede recurrirse a la *broca de centros* (Fig. 12) para evitar el defecto.

La optimización del proceso de taladrado requiere la comprensión de las relaciones entre los parámetros de diseño (forma, precisión dimensional y acabado superficial de la pieza), los parámetros de corte (velocidad de corte y de avance), material de herramienta y pieza de trabajo y la herramienta seleccionada. En la bibliografía consultada se reportan valores de partida para los parámetros de corte en relación a la broca seleccionada, con rangos dentro de los que es posible de minimizar daños en la pieza o el desgaste de la herramienta. Debido al perjudicial efecto de la fuerza de empuje, existen tablas con valores críticos de fuerza a aplicar dependiendo del material a mecanizar, la broca seleccionada y su geometría.

4 - Mecanizado de Materiales Compuestos

4-1 Torneado

Al mecanizar materiales compuestos aparecen otras variables, propias del material, e independientes a las básicas de torneado vistas en la sección 3. A continuación, se describe el comportamiento de materiales compuestos del tipo PRFV al ser mecanizados en máquina tipo Torno con respecto a: 1) orientación de las fibras, 2) desgaste de la herramienta, 3) fuerza de corte, 4) temperaturas de corte, y 5) calidad de la superficie generada.

4-1-1 Orientación de las fibras

La orientación y distribución de las fibras en un material compuesto se relaciona con el método de procesamiento. Lo anterior se puede observar en la figura 13 y como fue visto en la sección 2-c. El ángulo " θ " de la Fig. 13 es conocido como *ángulo de orientación de las fibras*, y en el caso del cilindrado, es formado por el ángulo entre el vector velocidad de corte y el eje axial de las fibras. El ángulo " ω " de la Fig. 13 es el *ángulo de procesamiento* (particular del proceso Filament Winding). En función de los ángulos mencionados se pueden obtener distintos comportamientos en la maquinabilidad como se verá a continuación.

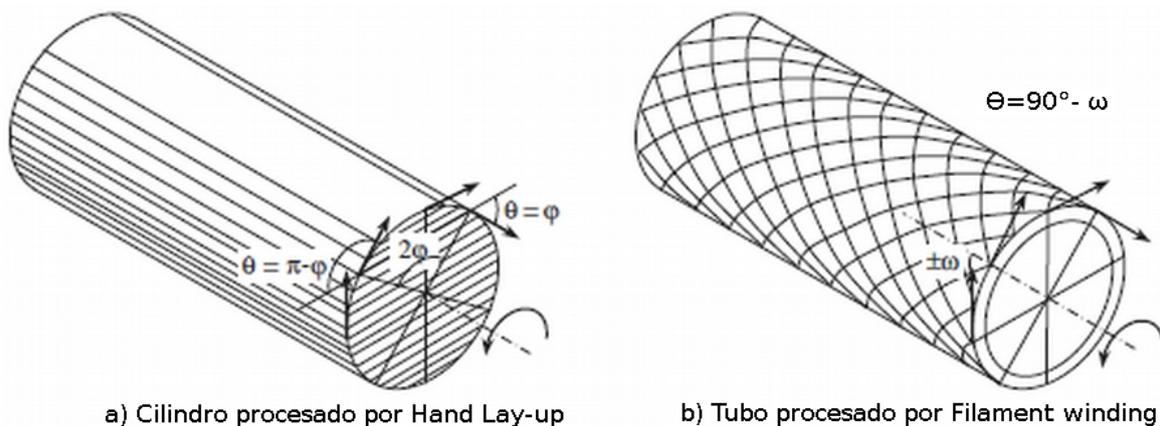


Fig. 13: a) Compuesto unidireccional procesado por Hand lay-up; b) Compuesto bidireccional procesado por Filament Winding. [16]

4-1-2 Fuerza de corte y desgaste de la herramienta

En la figura 14 se presenta una representación en gráfico bilogarítmico de la vida de herramienta en función de la velocidad de corte para distintos ángulos " ω ". Puede observarse el comportamiento exponencial decreciente de la vida de la herramienta en relación a la velocidad de corte, siguiendo el comportamiento descrito por Taylor. De la Figura 14-a se deduce que el aumento del ángulo ω implica una disminución de la vida de la

herramienta. En la Figura 14-b se presenta el comportamiento para los casos de los compuestos EPRU 5 y EPR 8, se tratan de PRFV con volúmenes de fibras de 70 y 65%, respectivamente.

Comparando los ejes coordenados de la figura 14 se puede tener noción de la magnitud de las velocidades de corte al maquinar PRFV con Acero rápido al Cobalto (HSS) (Fig. 14a) y Metal duro K10 (Fig. 14.b) [16]. Es claro que la baja resistencia a la abrasión del Acero rápido al Cobalto (HSS) limita la velocidad a la que puede emplearse debido a la presencia de fibras de vidrio en el compuesto EPRU 5.

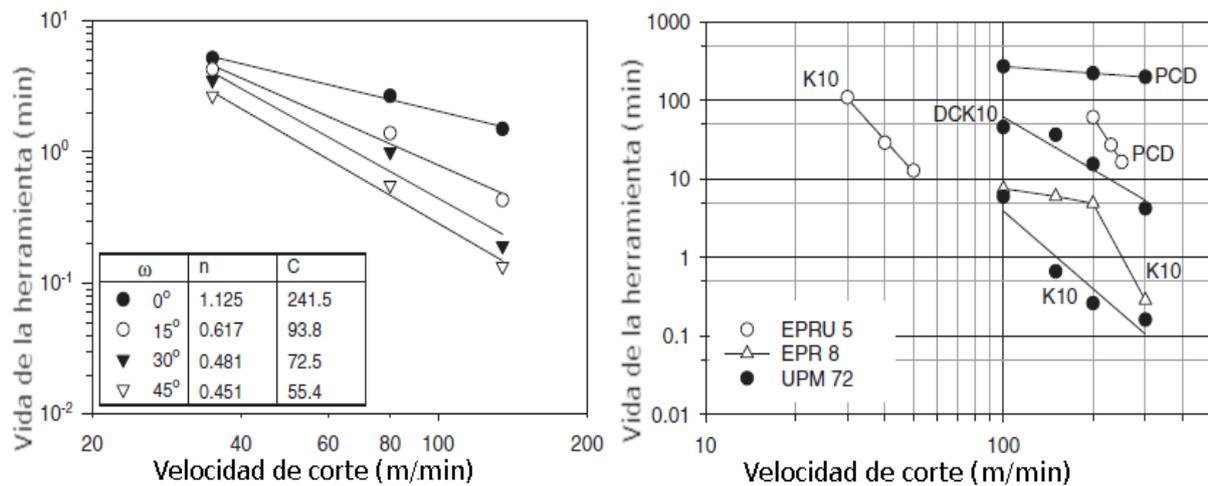


Fig. 14: a) Influencia del ángulo ω en la vida de la herramienta (HSS); b) Vida de la herramienta para distintos materiales de herramienta y compuestos PRF. [16]

La variación de la fuerza de corte depende en gran medida de la velocidad de avance empleada [16], siendo significativamente influenciada por la velocidad de corte al emplear materiales de herramienta resistentes al desgaste tipo abrasivo. Dicha situación fue reportada en diversos trabajos experimentales [24-27, 29-32]. El material compuesto analizado en la figura 15-a es un PRFV (procesado mediante hand lay-up) el cual adquiere un comportamiento proporcional decreciente entre la fuerza de corte y la velocidad de corte, magnificado con el aumento de la velocidad de avance. En la Fig.15-b se analiza la fuerza de corte por unidad de profundidad, la cual, indica la variación de la fuerza de corte con el ángulo de procesamiento " ω " (del proceso Filament Winding). Se evidencia un valor máximo de fuerza de corte para un ángulo ω de 15° y resulta conveniente emplear ángulos cada vez mayores. Asimismo, se puede deducir un comportamiento en común al aumentar la velocidad de corte y de avance ya que la fuerza de corte tiende a valores constantes, Figs 15-a y c. A modo de referencia, la energía específica de corte para PRFC o PRFV resulta muy inferior respecto a la necesaria para los metales (0.5-60 kN/mm²) al comparar con los valores de la Fig. 15-d.

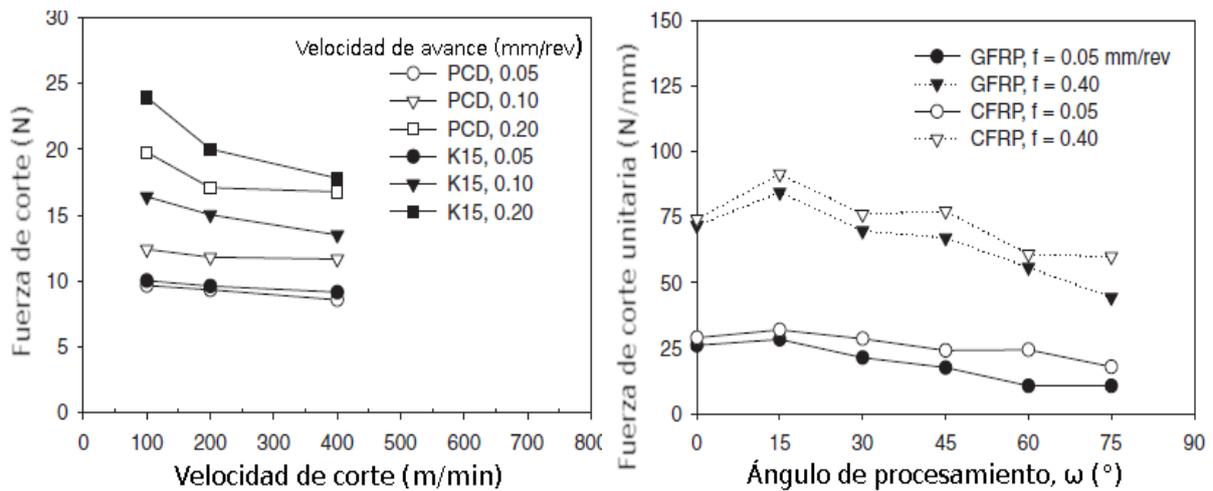


Fig. 15: a) Fuerza de corte en función de la velocidad de corte; b) Fuerza de corte en función del ángulo de procesamiento ω .

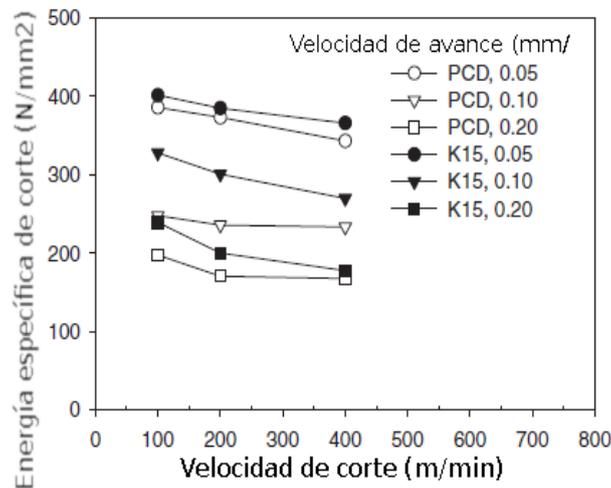


Fig. 15: c) Energía específica de corte en función de la velocidad de corte en PRFV. [16]

4-1-3 Temperatura de corte

Al mecanizar un material determinado, existe una velocidad de corte a partir de la cual la temperatura desarrollada aumenta considerablemente, como puede observarse en la figura 16 para distintos materiales de herramienta. Dicha velocidad es conocida como *velocidad de transición* y resulta proporcional al coeficiente de conductividad térmico del material de la herramienta. En caso de mecanizar con herramienta HSS, el valor del coeficiente de conductividad térmico es de 27 (W/mK) en el rango de temperaturas de 20 a 700 °C [16], por lo que su velocidad de transición resulta similar al material cerámico "TiC" y del orden de 60 m/min (Figura 16).

Durante el maquinado de materiales compuestos debe evitarse que la temperatura se eleve hasta la de transición vítrea o de degradación, para matrices termorrígidas y

termoplásticas, respectivamente. Las temperaturas de referencia pueden observarse en la Tabla 1. El daño de origen térmico puede evitarse o disminuirse al seleccionar velocidades de corte inferiores a la de transición.

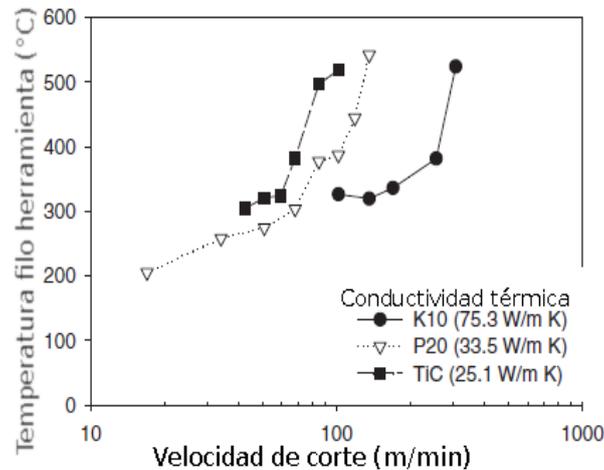


Fig. 16: Velocidades de transición para distintos materiales de herramienta. [16]

4-1-4 Calidad de la superficie generada

La calidad de las superficies generadas puede expresarse en términos del acabado e integridad superficial de las piezas maquinadas. El acabado superficial puede ser caracterizada por medio de los parámetro rugosidad superficial aritmética (RMS) o rugosidad media aritmética (Ra), mientras que la integridad superficial por la medición de los daños producidos en el entorno a la zona maquinada.

La rugosidad superficial depende en gran medida de la orientación de la fibra ya que condiciona el modo de fractura y el corte del material. En la figura 17 se observa como varía la rugosidad para materiales con diferentes características y maquinados en distintas condiciones de corte. La variación de la rugosidad frente a la velocidad de corte f es mínima en comparación al efecto proporcional creciente de la velocidad de avance, la profundidad de corte y el ángulo ω . Para casos en que ω es distinto de cero (compuesto unidireccional), la rugosidad superficial tiene un comportamiento proporcional creciente hasta un valor de 60° , como se observa en la Fig. 17.

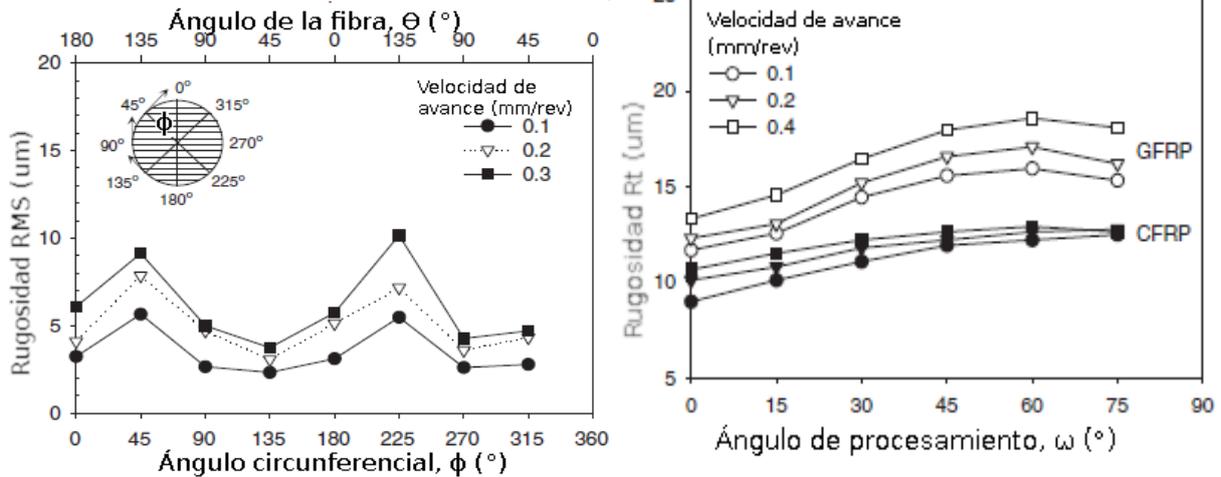


Fig. 17: a) Orientación de la fibra y rugosidad RMS; b) Ángulo ω y rugosidad Rt. [16]

La integridad superficial abarca todas las características físicas, químicas y microestructurales de la superficie y las primeras capas superficiales. Dependiendo del material a mecanizar, la herramienta empleada y las condiciones de corte pueden afectarse diferentes características del material tales como: dureza, microestructura, tensiones residuales, o introducirse defectos como fisuras, delaminación, etc. El daño inducido por delaminación modifica las propiedades adhesivas del PRF y su comportamiento en servicio. Resulta conveniente seleccionar aquellos parámetros de corte en los que el daño inducido pueda evitarse o sea mínimo.

4-1-5 Casos de estudio

El estudio de la rugosidad superficial en el torneado de PRFV con procesamiento por Filament Winding y Hand lay-up [33], concluyó que la velocidad de avance es el parámetro más influyente para cualquier criterio de maquinabilidad. Luego, le sigue la profundidad de corte, y a continuación, la velocidad de corte. En ese trabajo se obtuvo baja rugosidad superficial para velocidad de corte alta y bajo avance.

En otro trabajo acerca del mecanizado de PRFV [34] (procesado por Filament Winding) se estudió la influencia de los parámetros de corte con respecto al acabado superficial, pudiendo determinar el siguiente orden: primera la velocidad de avance, luego la velocidad de corte, seguidos por la profundidad de corte y el ángulo de procesamiento ω . A su vez, las interacciones entre el avance y la profundidad de corte fue la contribución más significativa en la rugosidad superficial. Los autores recomiendan emplear los valores mínimos para los tres parámetros de corte cuando se busca obtener baja rugosidad superficial.

En el estudio llevado a cabo por Ranjan Mahananda y Saurav Datta [35] el criterio de maquinabilidad seleccionado fue obtener mínima rugosidad y temperatura durante el corte. En los ensayos fue maquinado compuesto PRFV con bits de Acero Rápido al Cobalto. Fue evaluada la operación de refrentado con velocidad de corte $95 <V_c < 160$ (m/min), avances (a) de 0,06; 0,07; 0,08 (mm/rev) y profundidades (p) de 0,6; 0,9; 1,2 (mm). La condición óptima resultó para $V_c=124$ m/min; $a=0,08$ mm/rev y $p=1,2$ mm.

Una de las primeras investigaciones sobre el desgaste en bits de HSS con distintos contenidos de Cobalto al realizar operaciones de refrentado en tubos PRFV (procesados por filament winding) fue realizada por G. Santhanakrishnan [29]. Los ensayos fueron practicados con velocidad de corte de 4 o 12,5 (m/min), avance de 0,1 (mm/rev) y profundidad de 1 (mm). De ese trabajo y otros similares [29-35], se desprende que no siempre los parámetros de corte influyen sobre la rugosidad superficial de la misma manera. En la bibliografía mencionada coinciden en que la velocidad de avance es el parámetro primordial a controlar, mientras que la profundidad y la velocidad de corte pueden adoptar distinta relevancia. Dicha disparidad en el orden de importancia de los parámetros de corte que influyen en el acabado superficial en los PRFV, se debe al efecto térmico en el sistema, producto del material seleccionado en la herramienta y el tipo de PRF a mecanizar. También, la longitud maquinada magnifica la generación de calor y desgaste en la herramienta, los cuales afectan la calidad de la superficie generada.

4-1-6 Posibles defectos

En los procesos de mecanizado de PRF son relevantes los materiales seleccionados y el ángulo de orientación del refuerzo. Éste último condiciona el modo de fractura, la generación y evacuación de la viruta y el desgaste en la herramienta. Como consecuencia de ello puede producirse el daño de origen térmico (degradación de la matriz) y la delaminación, con probable propagación de fisuras. Otros defectos típicos detectables en el torneado son la presencia de pequeños pits para polímeros termorrígidos o de smearing - manchas- para polímeros termoplásticos.

Dada la magnitud de las fuerzas de corte desarrolladas, la fuerza de adhesión interfacial puede ser superada, con lo cual, las fibras pueden ser arrancadas o despegadas. También, la fuerza de adhesión puede ser superada por efecto de las expansiones térmicas de la matriz durante y post mecanizado. Superada la resistencia interfacial por efecto térmico y/o mecánico del mecanizado, es creada allí una nueva discontinuidad que oficia como región preferencial de nucleación y crecimiento de fisuras. La integridad estructural del compuesto es perjudicada en dicha condición.

4-2 Taladrado

En las operaciones de taladrado se genera calor y deformación localizada por acción de las fuerzas de corte generadas en la zona de contacto entre la pieza y la broca. Para evitar dañar significativamente las superficies y generar ciertos defectos en el sistema es necesario controlar las siguientes variables: 1) el aspecto térmico, 2) la fuerza de empuje y el desgaste de la herramienta, y 3) la delaminación.

4-2-1 Aspecto térmico

Los PRF son maquinados dentro de rangos de velocidad de corte acotados para no producir daños de origen térmico, evitando alcanzar la temperatura límite de la matriz polimérica seleccionada, Tabla 1. Los rangos también dependen del material empleado como refuerzo y herramienta. En ambos casos, el empleo de materiales con mayor valor de coeficiente de conductividad térmica favorece la disipación del calor. Los gradientes de temperatura son menores en los PRFC que en los PRFV ya que el calor es disipado más rápidamente de la zona de corte al emplear fibra de carbono, Tabla 4.

El tiempo de permanencia de la fuente de calor, punto de contacto pieza-herramienta, es determinante al diseñar y seleccionar los parámetros de corte a emplear. Cuando se trate de agujeros ciegos es conveniente optar por velocidades de corte bajas y de avance alta porque se reduce el tiempo de corte. Al realizar agujeros pasantes o más profundos, la alta velocidad de corte con aumentos del avance produce aumento de la temperatura. En los taladrados con avances constantes y elevada de la velocidad de corte, el calor generado se incrementa producto de la fricción y el menor tiempo para la disipación del calor a través de la herramienta.

Otro punto a tener en cuenta es la diferencia entre los coeficientes de expansión térmica de los constituyentes del material compuesto (Tablas 1 y 4) y la herramienta. Por lo general las herramientas de corte se expanden más que los componentes del PRF, generando fricción en las paredes del cilindro. En el diseño de un material compuesto y la obtención de agujeros de precisión es conveniente que los constituyentes no presenten variaciones importantes entre los coeficientes porque influye en la tolerancia dimensional de la etapa de fabricación. También podría requerirse de operaciones de acabado más precisas en las que se aumente la calidad de la superficie generada.

4-2-2 Fuerza de empuje y el desgaste de la herramienta

El desgaste de la herramienta se produce de forma localizada en los filos de corte y aumenta con el tiempo de uso. El desgaste es manifestado de diversos modos: en la calidad de las superficies generadas, y como una disminución de la capacidad de corte de la broca ya que varía la geometría de la misma. Así se requiere más potencia para realizar la operación y la fuerza de empuje adquiere un comportamiento proporcional al desgaste de la herramienta. Dado que la fuerza de empuje generalmente es una componente normal al laminado compuesto, resulta una variable a controlar para disminuir el daño inducido de delaminación en el taladrado.

Existen relaciones empíricas para determinar el valor de la fuerza de empuje crítica para el comienzo de la delaminación. La relación más difundida y de carácter universal pertenece a los investigadores Hocheng y Dharan, se observa en la imagen de la figura 18. La expresión para determinar el valor crítico de fuerza para el comienzo del daño, se expresa en términos de las propiedades físicas del laminado, la "Fuerza de Empuje Aplicada" y el espesor "h" de la última capa del laminado. El objetivo es mantener el valor de la fuerza desarrollada por debajo del valor crítico. Es evidente la importancia de la medición de la fuerza de empuje o el conocimiento de valores críticos para evitar magnitudes excesivas en el sistema.

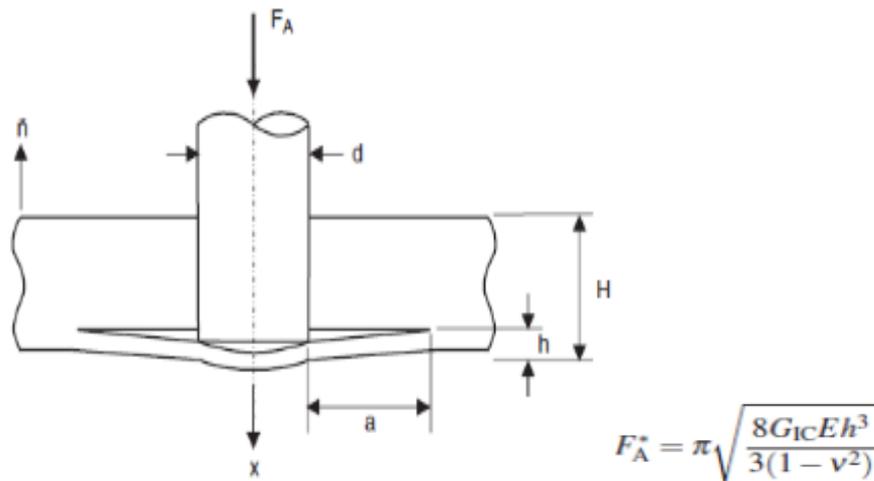


Fig. 18. Fuerza de empuje Crítica: a) Esquema para su deducción, b) Expresión, siendo E: módulo de Young, ν : módulo de Poisson y G_{1c} módulo de resistencia a la rotura.

4-2-3 Delaminación

El principal daño inducido en la operación de taladrado es conocido como Delaminación. Consiste en la fisuración paralela a la capa del compuesto y la consecuente separación de interfases, creándose una discontinuidad. El fenómeno puede describirse según la Fig. 20, de la cual, se desprende la dependencia que existe entre la fuerza de empuje y la

delaminación. Cuanto mayor sea la delaminación y su discontinuidad involucrada, más se restringe la transferencia de carga en la zona de trabajo, función principal del compuesto según lo desarrollado en la sección 2-f.

A partir de la necesidad de cuantificar el alcance del daño producido por delaminación durante el taladrado [16, 26 y 27] es que se define el *Factor de delaminación*. Surge de la inspección visual en el entorno a la zona maquinada. Se determina un círculo concéntrico con el orificio maquinado que contenga todos los defectos presentes. Así el *Factor de delaminación* define como el cociente entre el diámetro de la circunferencia que contiene el daño y el diámetro nominal del agujero practicado, como se observa en la figura 19.

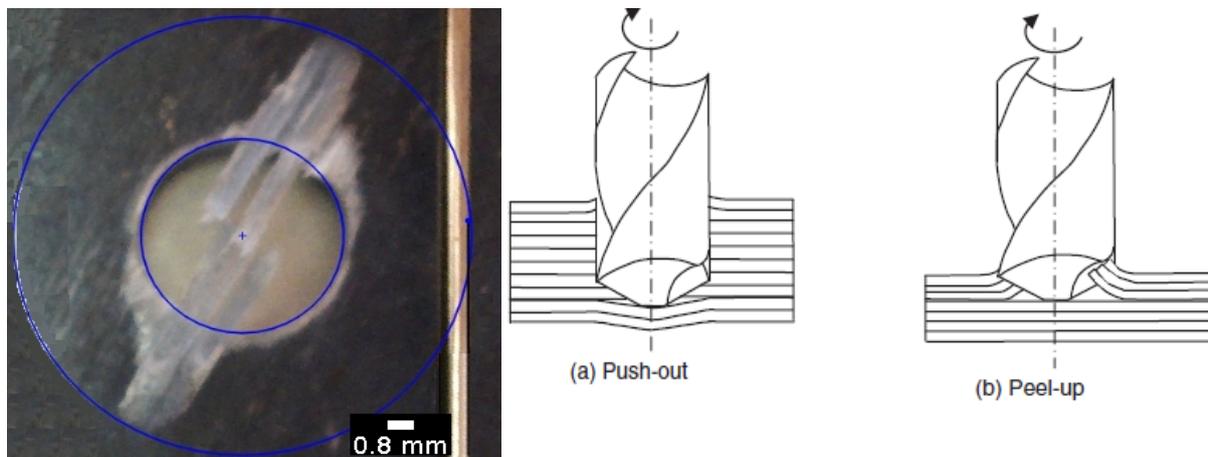


Fig. 19. Taladrado en PRFV con broca de 5 mm. Fig. 20. Esquemas de delaminación del tipo: a) Push-out; b) Peel-up.

La delaminación puede producirse en la zona de contacto entre la herramienta de corte y el compuesto maquinado de los siguientes modos:

-Delaminación Push-out: presente en la cara de salida, el daño se produce por el efecto compresivo que ejerce la punta de la broca sobre las capas sin cortar, solicitándolas a la flexión. Para un dado espesor crítico "h" las tensiones debido a la flexión son mayores a la resistencia de la unión interlaminar y nuclea una fisura alrededor del agujero (Fig. 20-a). Dado que la broca continúa avanzando y rotando, se promueve la propagación de la fisura nucleada según los Modos de fractura I y III. Paralelamente, la penetración de la broca disminuye la rigidez a la flexión por efecto de la disminución de la sección resistente.

-Delaminación Peel-up: presente en la cara de entrada, el compuesto envuelve la superficie externa de la broca, la cual debido a la fuerza de corte empuja el material cortado hacia los flancos de la herramienta y hacia atrás, mientras que las capas sin cortar son comprimidas por la fuerza de empuje (Fig. 20-b).

De los anteriores, el daño más difícil de controlar y evitar es la Delaminación Push-out. Existen técnicas o recomendaciones para reducirla como: utilizar mayores espesores de capa en los laminados, mayores espesores de capa sólo en la zona de salida, reducir la velocidad de avance al final de la operación o emplear placa soporte en la cara de salida tal que limite la deformación y desplazamiento de las últimas capas al ser taladradas.

4-2-4 Casos de estudio

En relación a la fuerza de empuje y la geometría de la herramienta se ha estudiado que el espesor biselado ("bisel" o distancia entre los filos de corte en la figura 21) genera un 40 a 60% del valor de la fuerza de empuje desarrollada. Lo anterior, fue visto por Sheikh-Ahmad J [16] como se indica en los gráficos de la figura 21. Se observa que la fuerza de empuje desarrollada en el corte es proporcional al tamaño del espesor biselado y al ángulo de la punta de la broca mientras que el torque necesario es inversamente proporcional a dicho ángulo.

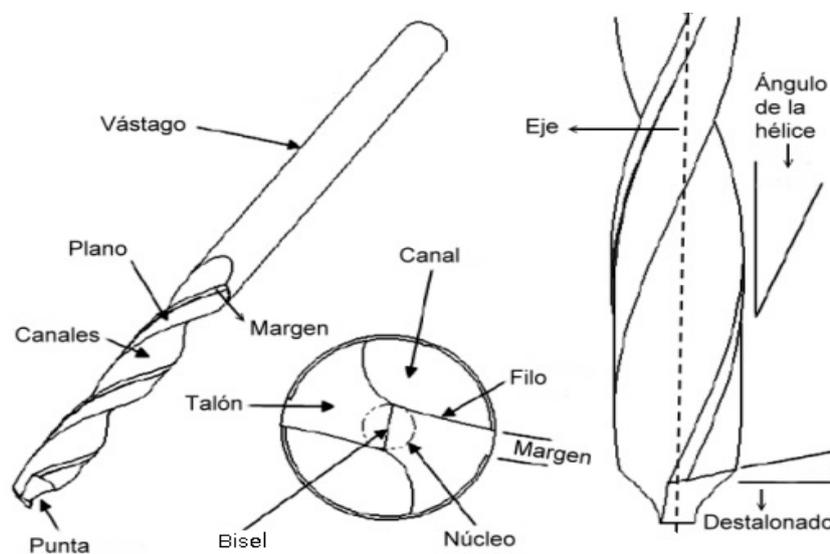


Fig. 21: a) Broca convencional y características geométricas; b) Vista frontal de la broca.

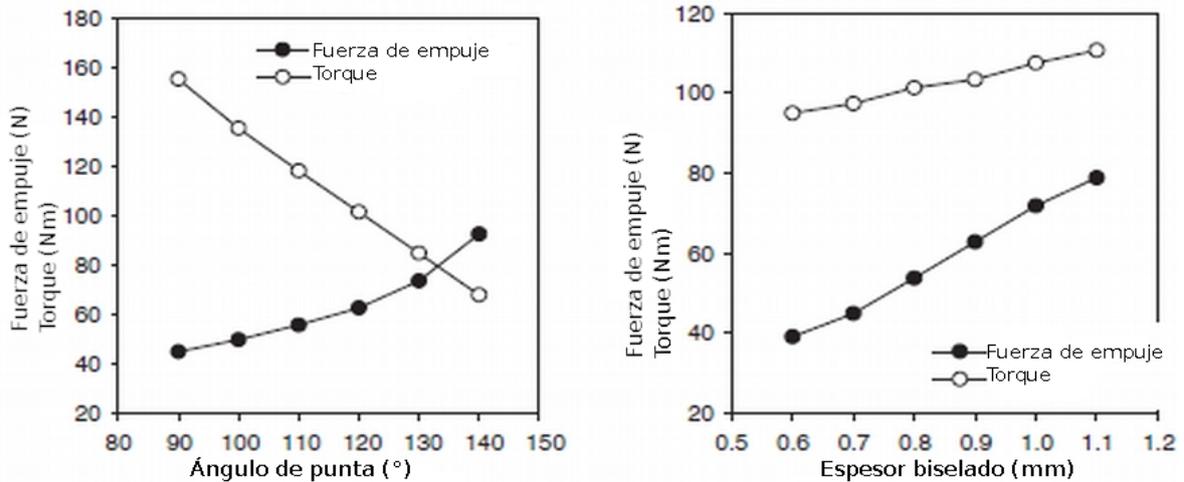


Fig. 21-c. Fuerza de empuje en función de la geometría de la broca tipo convencional. [16]

Analizando de forma genérica en el estudio llevado a cabo por Palanikumar et. al [24], puede detectarse el efecto de los principales parámetros de corte sobre el daño provocado en el entorno a los orificios. Al disminuir el avance y aumentar la velocidad de corte disminuye la delaminación, como indican las curvas de la figura 22. Todos los comportamientos fueron magnificados al emplear distintos tamaños de broca, como se observa en la Fig. 22.

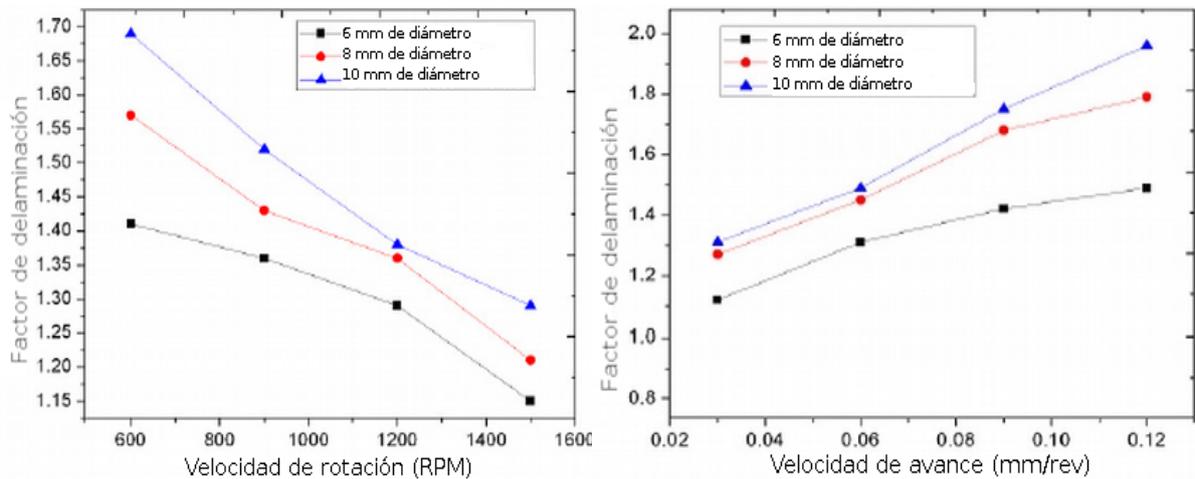


Fig. 22) Delaminación en función de: a) Rotación por minuto de la herramienta; b) Velocidad de avance de la herramienta [24].

Dado que la broca de Acero Rápido al Cobalto posee baja resistencia al desgaste del tipo abrasivo, la presencia de fibra de vidrio en el sistema da como resultado una elevada tasa de desgaste [16]. A partir de la investigación llevada a cabo por A. D'Orazio et al. [25] en referencia al desgaste en la herramienta (con criterio de salida de servicio para una banda de desgaste de 0,3 mm de profundidad en la cara de incidencia) entre broca convencional de doble filete con y sin recubrimiento de TiAlN, dió como resultado una

producción de 180 y 5 agujeros, respectivamente. El desgaste en la herramienta tiene un comportamiento proporcional con la velocidad de corte empleada y es creciente con el número de agujeros, el cual, tiende a un valor constante (Figs. 23).

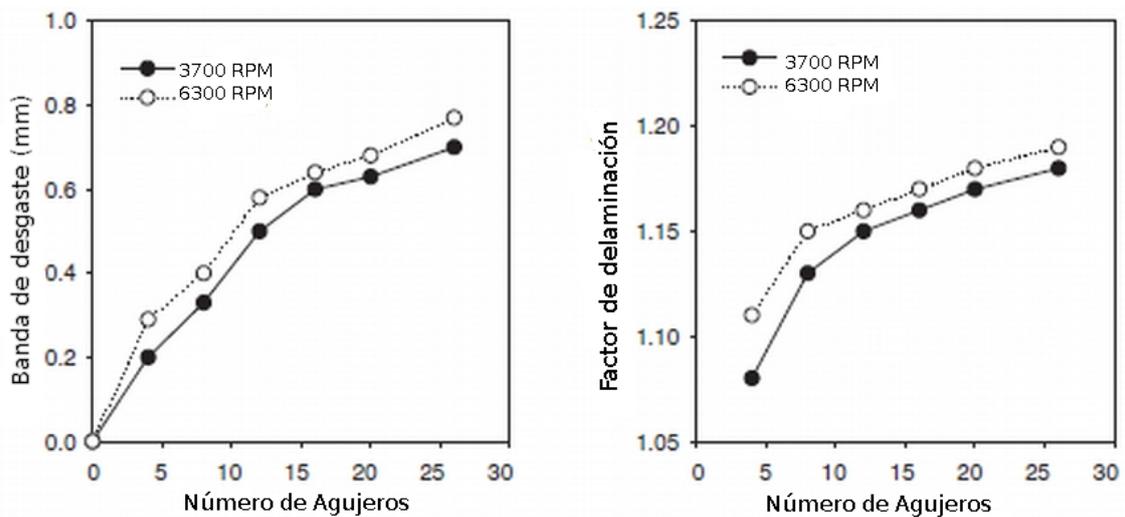


Fig. 23: a) Desgaste en broca convencional de Acero rápido al Cobalto; b) Delaminación en función del número de agujeros. [25]

Los parámetros de corte empleados en los estudios e investigaciones consultadas [24, 25] conducen a velocidades de corte menores a la de transición (visto en la sección 4), velocidades de avance de 0,05 a 0,4 (mm/rev) y se recomienda emplear relaciones entre velocidad de corte y de avance mayores a 250 como se observa en la Fig. 24.

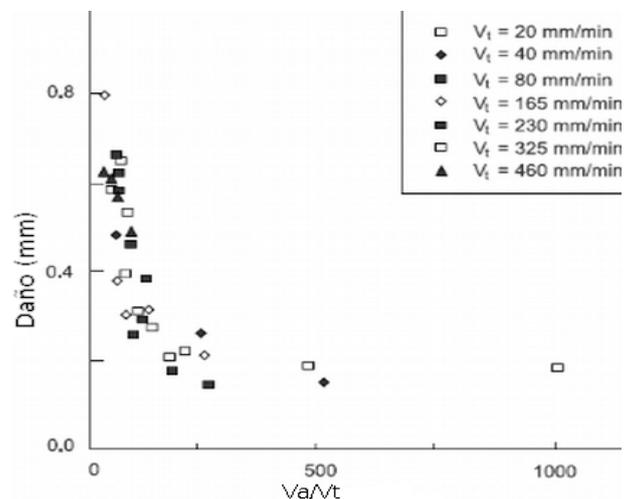


Fig. 24) Daño en función de la relación entre la velocidad de corte y avance. [17]

4-2-5 Posibles defectos

En general, la calidad de las superficies generadas por taladrado se ve afectada por delaminación, fisuración y arranque de fibras, circularidad y perpendicularidad a la cara de

incidencia del PRF, el daño de origen térmico y las consecuentes variaciones dimensionales que puedan producirse [12-14, 16]. Todas las mencionadas son variables que influyen y determinan la rugosidad superficial. El arranque de fibras junto con la delaminación en la zona de entrada y salida son los defectos más significativos que conducen a una severa reducción de la capacidad de carga del componente.

5- Objetivos

El objetivo principal del proyecto es realizar los primeros pasos para abordar el estudio del comportamiento del material compuesto tipo tubo PRFV frente a operaciones de mecanizado frecuentemente empleadas tales como torneado y taladrado.

5-1 Objetivos particulares

- a) Realizar una extensa búsqueda de información acerca de las características de los materiales compuestos, aplicaciones y comportamiento frente a operaciones de mecanizado.
- b) Definir las condiciones experimentales necesarias para poder ejecutar ensayos de corte que permitan identificar el efecto de las variables involucradas en el comportamiento del material frente al mecanizado.
- c) Obtener resultados preliminares acerca del efecto de las variables analizadas en la maquinabilidad de PRFV para los sistemas seleccionados.

6 - Ensayos experimentales

6-1 Ensayos de torneado

En este capítulo se detallan los procedimientos y materiales empleados para el estudio propuesto. En el mismo se analizó el comportamiento de piezas mecanizadas en la operación de torneado conocida como refrentado. El sistema de estudio se compone de un tubo de material compuesto tipo PRFV y una herramienta de corte tipo bit de Acero rápido al Cobalto (HSS).

6-1-1 Características del ensayo y condiciones experimentales

El material de partida fue un tubo de PRFV (Plástico reforzado con fibra de vidrio) con 12,5 mm de espesor de pared, 1500 mm de largo y 197 mm de diámetro interno, que posee las siguientes características:

- contenido de fibras de 78,6%
- ángulo de procesamiento de 57,6%
- porosidad de 3,8% (en dirección radial y longitudinal)
- dureza de 97,4 y 88,2 Barcol (exterior e interior, respectivamente)
- temperatura de transición vítrea de 148,2 y 147,5°C (exterior e interior, respectivamente).

Para evitar posibles desbalances y/o vibraciones al rotar la pieza en la máquina de ensayo, el tubo fue seccionado con una cortadora circular Makita para disminuir su longitud y obtener dos probetas con 180 mm de largo cada una, Figs. 25.

La máquina empleada en los ensayos de torneado fue un torno paralelo fabricado por la empresa Sideral, posee 2m entre puntas, dispone una potencia 7,5 HP. El mismo se alimentó con un variador de frecuencia que en combinación con la caja de velocidades permitió trabajar dentro de un rango continuo de velocidades desde 100 a 1600 RPM.

El tipo y material de herramienta a ensayar fue un bit de Acero rápido al Cobalto (HSS). Los ángulos principales de la herramienta fueron: 25° para el ángulo de ataque, 7° para el ángulo de incidencia y 45° para el ángulo de posición del filo principal. Para lograr la repetitividad de las condiciones geométricas y eliminar el desgaste en el bit al exceder una banda de desgaste en la cara de incidencia de 0,3 mm de profundidad, fue necesario fabricar un accesorio que facilitara la práctica de rectificado de la herramienta.

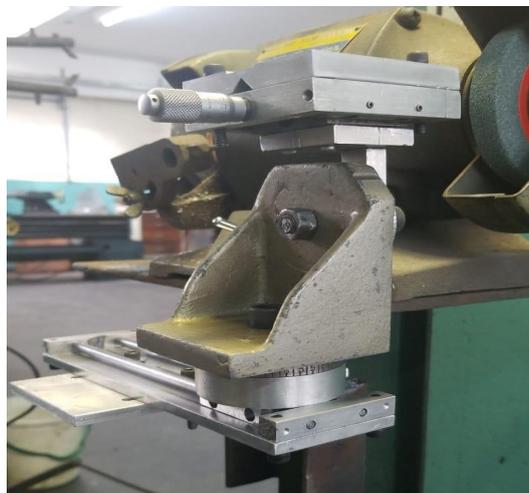
El accesorio fabricado se observa en la figura 25-c, el cual se anexó a una amoladora de banco marca Makita. Fueron necesarias ciertas restricciones que aseguren el posicionamiento de la herramienta con respecto a la muela de afilar:

1. Implementación de escalas graduadas con ángulos sexagesimales permitió regular los ángulos de afilado requeridos.
2. Transmisión de movimiento traslacional del bit en dirección radial y axial a la muela para generar las nuevas superficies de corte del bit.
3. Posicionamiento del filo principal en cada afilado de forma: tangente a la muela y a la misma altura del eje de la misma.

Se diseñaron y construyeron todos los elementos faltantes para el armado del dispositivo.



Fig. 25: a) Material de partida; b) Probeta seccionada del material de partida.



c) Accesorio para practicar rectificadas de la herramienta de corte.

A fin de seleccionar las condiciones experimentales se realizó una evaluación de las capacidades de la maquinaria disponible en la Facultad de Ingeniería de la U.N.M.d.P y las condiciones de ensayo comunes en la bibliografía, sección 4-i-b. Fueron realizados seis ensayos preliminares para evaluar el desgaste en el bit y obtener un rango de velocidades a emplear mediante la operación conocida como Refrentado. Las operaciones de refrentado

tuvieron como punto de inicio el contacto entre la probeta en el diámetro externo de 222 mm y el filo principal del bit. El ensayo continúa con movimiento de corte radial hasta alcanzar el diámetro interno de 197 mm de la probeta. Las operaciones fueron realizadas sin fluido de corte, empleando aspiradora en cercanía a la herramienta para evitar el desprendimiento de polvo de fibra de vidrio al ambiente de trabajo. Se estableció como límite de vida de herramienta la generación de una banda de desgaste hasta 0,3 mm de profundidad en la cara de incidencia.

Las velocidades de corte preliminares fueron 28, 43 y 120 m/min a 1,5 mm de profundidad y 0,21 mm/rev de avance, con resultados inaceptables para velocidades mayores de 43 m/min. Ello se corresponde con la velocidad de transición para el acero rápido, sección 4)ii)b). Luego, fueron realizados otros tres ensayos con profundidades de corte de 0,25; 0,5 y 1 mm a velocidad de corte y de avance constante. El resultado fue inaceptable para profundidad menor a 0,5 mm ya que el contacto pieza-herramienta era intermitente. Con la información obtenida, fueron llevados a cabo 36 ensayos, empleando el siguiente set de condiciones experimentales:

- Velocidades de corte: 23, 28 y 43 m/min
- Avances: 0,07 y 0,21 mm/rev
- Profundidades: 0,5; 1 y 1,5 mm

6-1-2 Relevamiento y análisis del daño

En la bibliografía consultada [16-17, 27-40] fue común la investigación del acabado superficial en las piezas mecanizadas, la medición de la fuerza desarrollada, el desgaste en la herramienta y demás criterios de optimización en los sistemas de estudio, pero no fue así en cuanto a la medición del daño inducido producto del maquinado.

Dada la necesidad de informar, medir y estudiar el acabado e integridad superficial en las piezas maquinadas en la operación de refrentado se definió un parámetro para la medición de la integridad superficial. Dicho parámetro fue nombrado Daño Inducido y se le asignó unidad de longitud (expresada en milímetros). El daño inducido resulta de la inspección visual en la superficie interna del tubo, a lo largo del diámetro interno, y se cuantifica como la máxima distancia axial que alcanza el daño, medida desde la superficie maquinada. El daño se evidencia por la zona de tono más claro donde se reduce delaminación, como puede observarse en la figura 26-a. La captura de las imágenes fue realizada con un microscopio digital USB fabricado por Innovative product world. Fue empleada una medida patrón (alfiler con 0,8 mm. de diámetro) para luego procesar la imagen con el software Inventor y obtener la longitud dañada como se aprecia en la figura

26-b. Debido a la presencia de fibras sin cortar en la superficie interna de las probetas, para determinar el comienzo de la medición del daño fue cortada una porción de fibras con cutter para evidenciar sólo la superficie mecanizada de interés (Fig. 26-a).

El parámetro definido permitió cuantificar la influencia de las variables de corte y la generación de defectos. Fue considerado como un aporte significativo al área de estudio ya que no existe información similar al respecto.

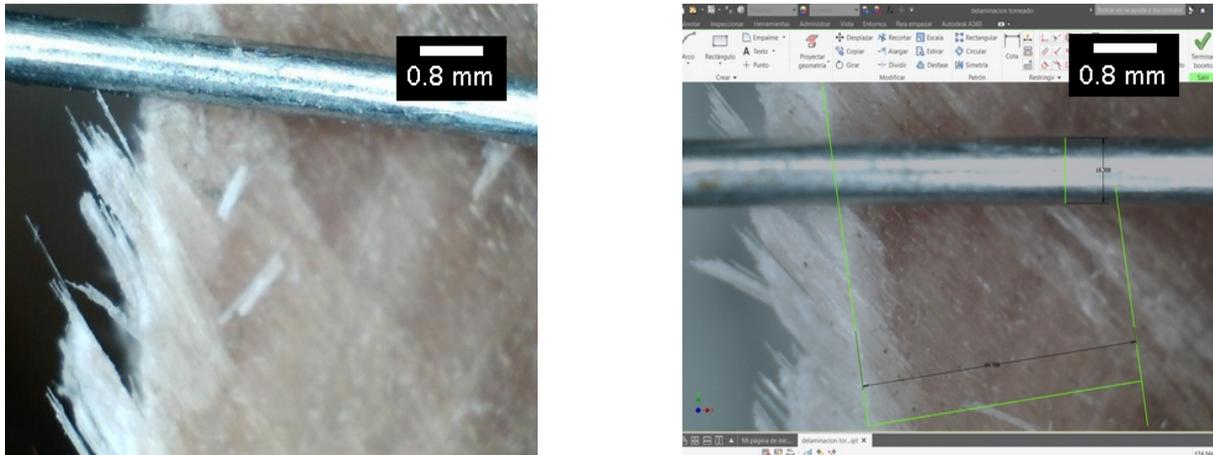


Fig. 26: a) Entorno del daño inducido máximo; b) Medición del daño inducido.

Así, ensayos de torneado se realizaron siguiendo la siguiente secuencia:

1. Rectificado del bit con el accesorio fabricado al superar la banda de desgaste establecida.
2. Mecanizado por refrentado de una superficie de la muestra con determinados parámetros de corte.
3. Captura de cuatro imágenes con el microscopio USB en la zona de entrada y de salida (zonas señaladas por elipses rojas en las Figs. 27 a-b), en el espesor maquinado (Fig. 27-c) y en la superficie interna (Fig. 28-c).
4. Determinación de integridad superficial e realizada con el parámetro Daño inducido, mediante el procesamiento descrito previamente. Asimismo, se evaluó la cantidad, largo, presencia o ausencia de fibras sin cortar por medio del análisis de superficies con las imágenes adquiridas para complementar la investigación acerca de la generación de defectos.
5. Medición del acabado a través del parámetro Rugosidad superficial (RMS) obtenido con rugosímetro modelo Surtronic 3+ gestionado por el software Talyprofile. Las mediciones de rugosidad fueron efectuadas a 3 (mm.) con respecto al radio interno debido a la presencia de fibras sin cortar en la zona de salida. El valor de rugosidad se calculó como el promedio de las mediciones y la consideración de los valores más altos ya que

determinan la calidad superficial generada. De ésta manera fue como se determinó el comportamiento del compuesto PRFV con la obtención de los parámetros de salida del sistema: la rugosidad superficial (RMS) y el daño inducido.

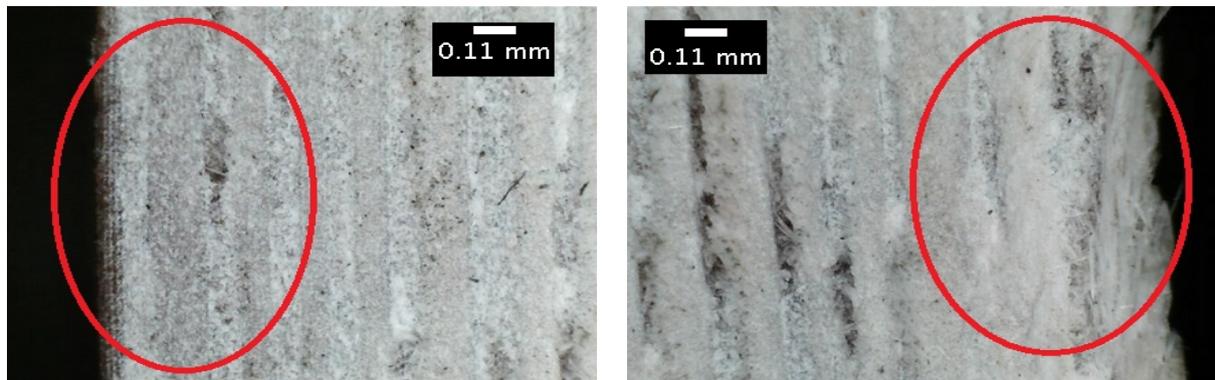


Fig. 27. Generación de superficie en: a) Zona de entrada ; b) Zona de salida.



Fig. 27: c) Espesor maquinado; d) Medición de rugosidad RMS.

6-1-3 Análisis y discusión de resultados

6-1-3-1 Análisis de superficies

En las imágenes de la figura 28 (a-b) se presentan a modo de ejemplo dos superficies refrentadas, en la zona de entrada de la herramienta. Fueron obtenidas empleando dos velocidades de avance significativamente diferentes. A la izquierda de ambas imágenes se puede observar la intersección con la superficie externa del tubo o el diámetro externo, zona de entrada de la herramienta en donde comienza el mecanizado, detectando la presencia de fibras expuestas. La cantidad de fibras expuestas en la superficie de incidencia tiene una relación proporcional con la velocidad de avance seleccionada. Al emplear bajo avance, la herramienta permanece más tiempo en el entorno a la superficie de incidencia secundaria, logrando efectuar el corte de las fibras y la matriz. Al triplicar el avance empleado, la herramienta recorre una distancia radial mayor en cada vuelta y la acción de corte es parcial.

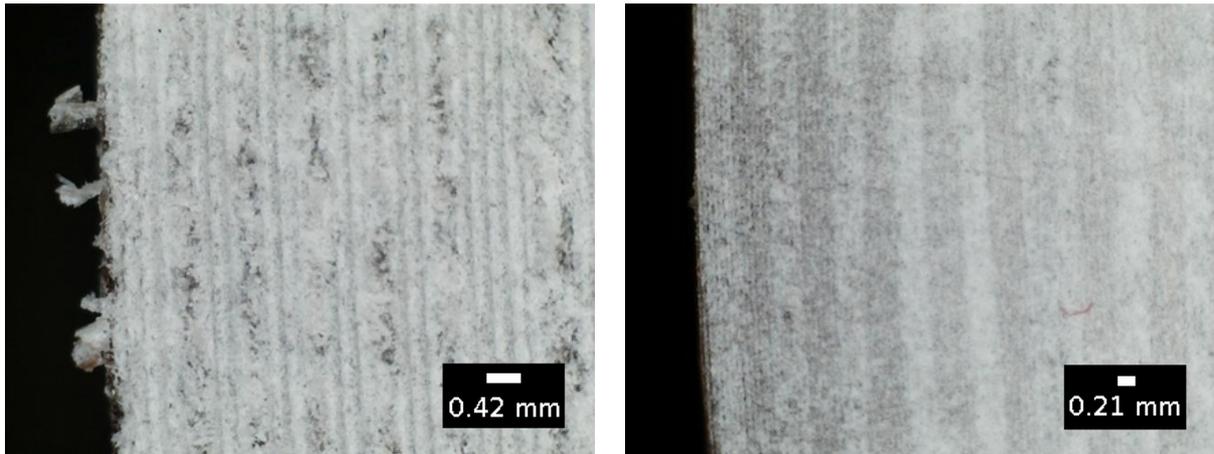


Fig. 28. Zona de entrada de superficies obtenidas por refrentado, con avance: a) 0,21 mm/rev ; b) 0,07 mm/rev .

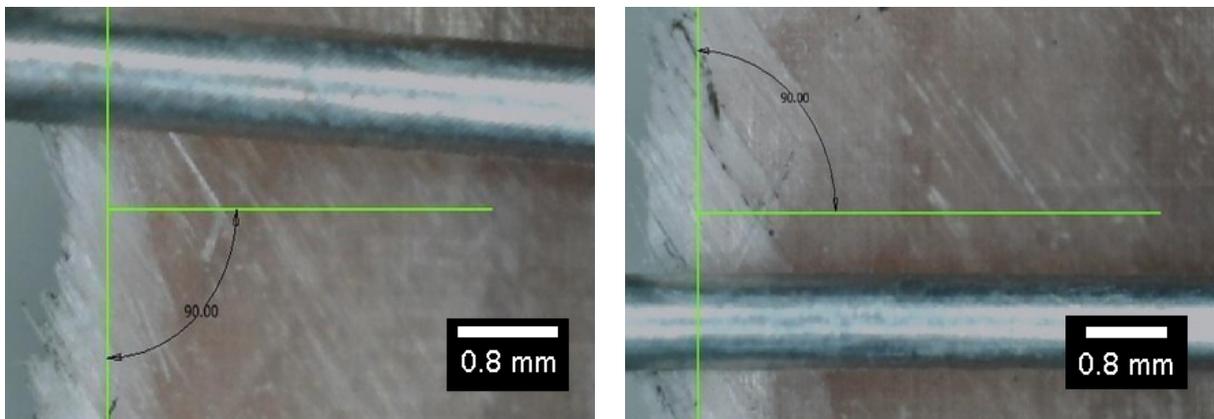


Fig. 29. Refrentados con profundidades de corte: a) 0,5 mm; b) 1 mm.

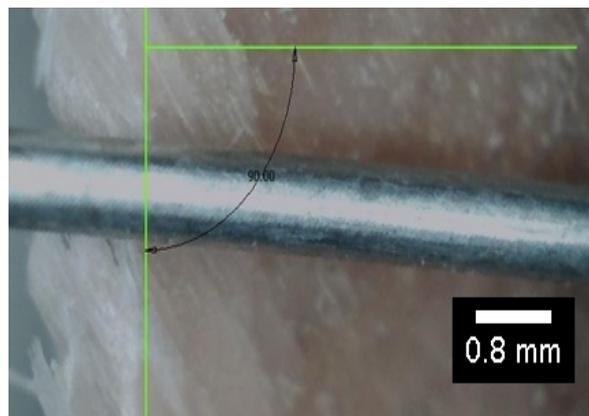


Fig. 29-c. Refrentado con profundidad de corte de 1,5 mm.

En la Fig. 29 (c-d-e) se presentan imágenes de la superficie interior de las probetas, en la intersección con la superficie refrentada. La línea verde vertical indica la posición de la superficie refrentada, y la superficie interna coincidente con el diámetro interno. Se puede observar hacia la izquierda de las imágenes el largo de fibras sin cortar expuestas a la

superficie. desde la línea divisoria vertical verde, y también, hacia la derecha se observa el área abarcada por el daño inducido en el refrentado, en dirección y perpendicular a la línea divisoria, indicado por los segmentos verdes el área abarcada por el daño inducido en el refrentado. El largo de las fibras sin cortar en función de la profundidad de corte resulta proporcional a la profundidad de corte. El aumento de la profundidad de corte consigue una mayor incidencia de la herramienta en dirección axial al tubo. Asimismo, el daño inducido es cada vez mayor ya que son fisuradas, dobladas y despegadas porciones cada vez mayores. Este mecanismo se describe para un sistema similar en la bibliografía consultada, trabajo llevado a cabo por Alessandra Caggiano [37], donde se propone que las fibras presentes entorno al borde de salida del contacto herramienta-probeta son flexionadas y dobladas fuera de plano, pasando por debajo de la herramienta sin ser cortadas y sólo el material próximo a la zona intermedia es efectivamente removido.

6-1-3-2 Acabado superficial

En las figuras 31 se presentan gráficamente los valores promedio de rugosidad RMS obtenidos para todas las condiciones ensayadas. Puede observarse que la rugosidad RMS presenta un tendencia proporcional creciente respecto de la profundidad de corte. Su variación depende de la velocidad de corte y avance empleados, siendo mayor en condiciones de bajo avance y elevada velocidad de corte. Esto se explica por el efecto térmico desarrollado en el filo de corte de la herramienta. Al mismo tiempo la temperatura desarrollada en el filo de corte de la herramienta resulta proporcional a la profundidad de corte ensayada, tal como reportan Sakuma K. y Seto M. [38]. Por lo general en estas condiciones se genera mayor cantidad de calor mientras que la herramienta permanece en contacto con la pieza por más tiempo, lo cual conduce a un aumento de la temperatura. Una mayor temperatura desarrollada en el corte produce ablandamiento de la matriz al superar la temperatura de transición vítrea, ver Tabla 1, y el debilitamiento del refuerzo de fibra de vidrio. Lo anterior influye en los perfiles de rugosidad obtenidos ya que aumentan las magnitudes de picos y valles, dando como resultado el efecto proporcional entre la rugosidad y la profundidad ensayada.

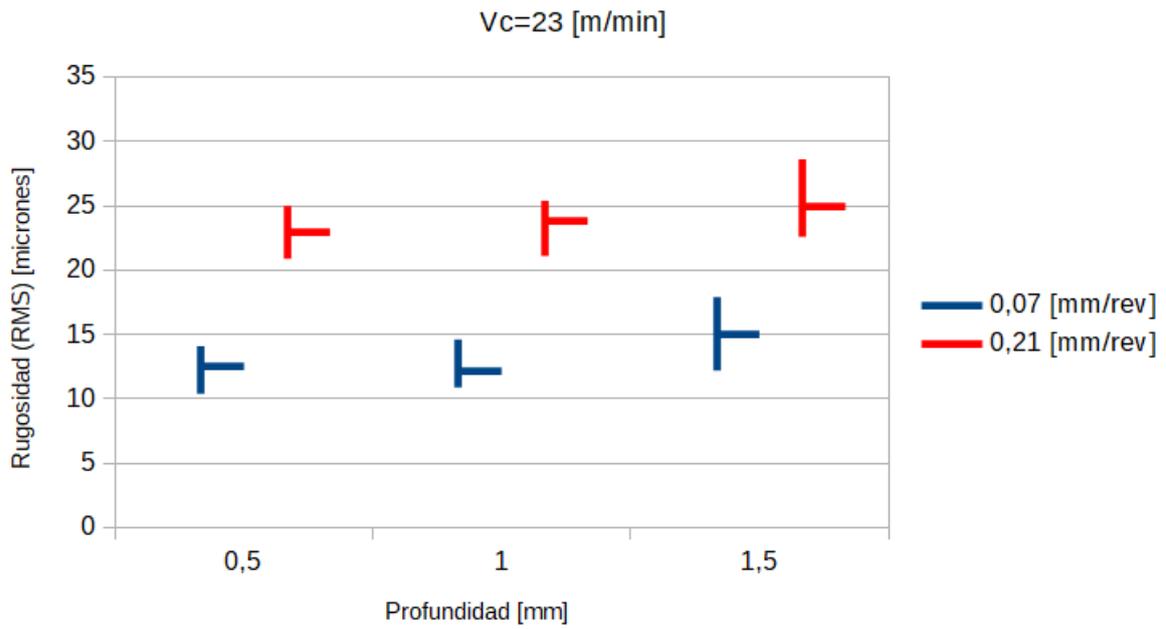


Fig. 31-a. Rugosidad RMS frente a la profundidad de corte con velocidad de avance como parámetros y $V_c=23$ m/min.

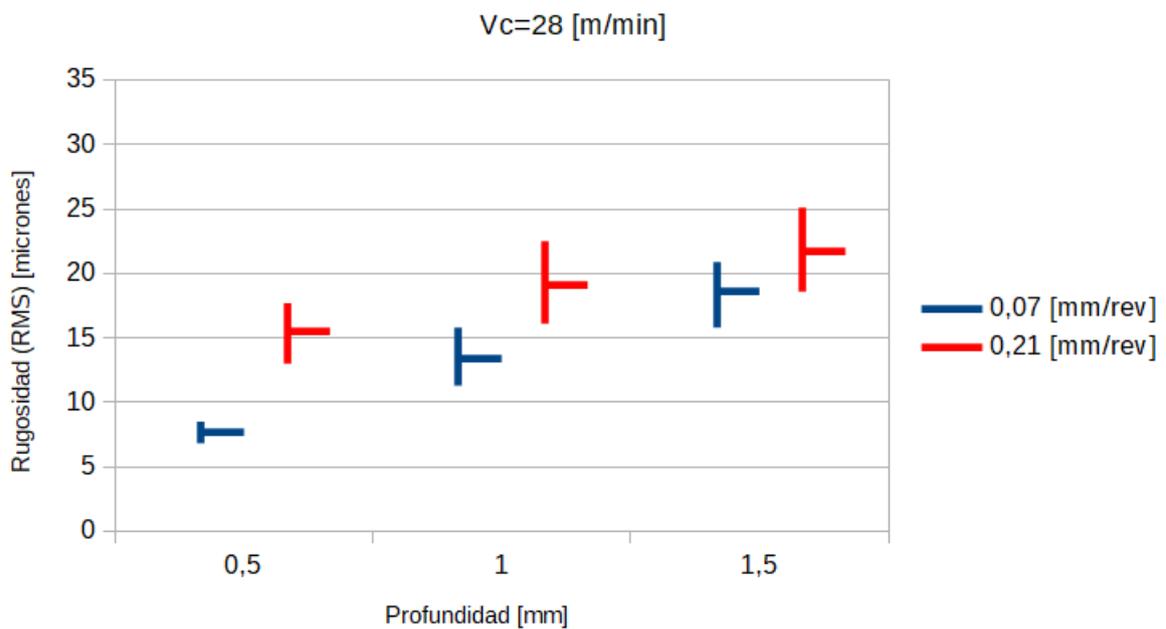


Fig. 31-b. Rugosidad RMS frente a la profundidad de corte con velocidad de avance como parámetros y $V_c=28$ m/min.

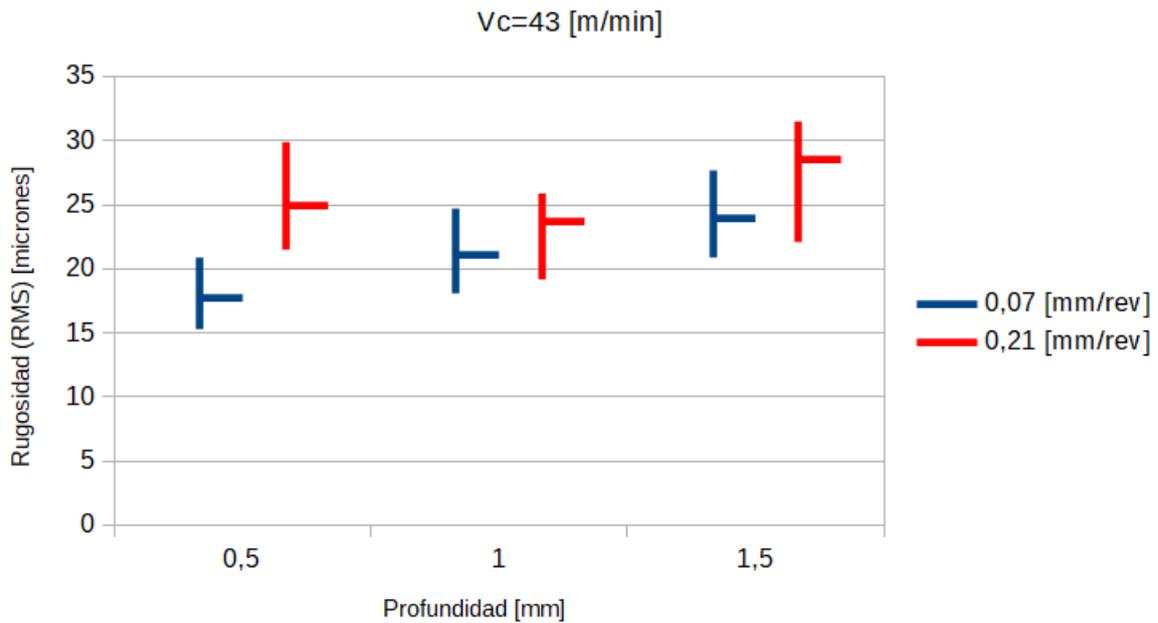


Fig. 31-b. Rugosidad RMS frente a la profundidad de corte con velocidad de avance como parámetros y $V_c=43$ m/min.

En las figuras 32 se encuentran graficados los valores de rugosidad RMS obtenidos en los ensayos, en función de la velocidad de avance. La rugosidad RMS tuvo un comportamiento proporcional con el avance empleado. Al aumentar la velocidad de corte en el sistema puede apreciarse que existe una mayor superposición, sin embargo, se mantiene la proporcionalidad entre la rugosidad y el avance con profundidades de corte constantes. Al aumentar el avance sucede que es necesario aplicar una mayor energía para remover la misma cantidad de material y en menor tiempo al mantener constantes la profundidad y velocidad de corte. La bibliografía indica que al aumentar el avance es alcanzado un mayor estado tensional equivalente que promueve fisuras interlaminares, despegues entre la matriz y refuerzo, quemado de la matriz o fibras sin cortar. Tales defectos generados se traducen en mayores valores de rugosidad. Otra posible causa son las vibraciones en la máquina con el aumento del avance, trasladadas al contacto herramienta-probeta implican una mayor rugosidad RMS. El fenómeno proporcional entre el avance y la temperatura durante el corte ha sido relevado por Palanikumar et al. [39].

Del análisis de la rugosidad RMS frente al avance empleado fue detectado un cambio en el comportamiento al emplear velocidad de corte de 43 (m/min) y de avance de 0,21 (mm/rev), ver Fig. 32-c.

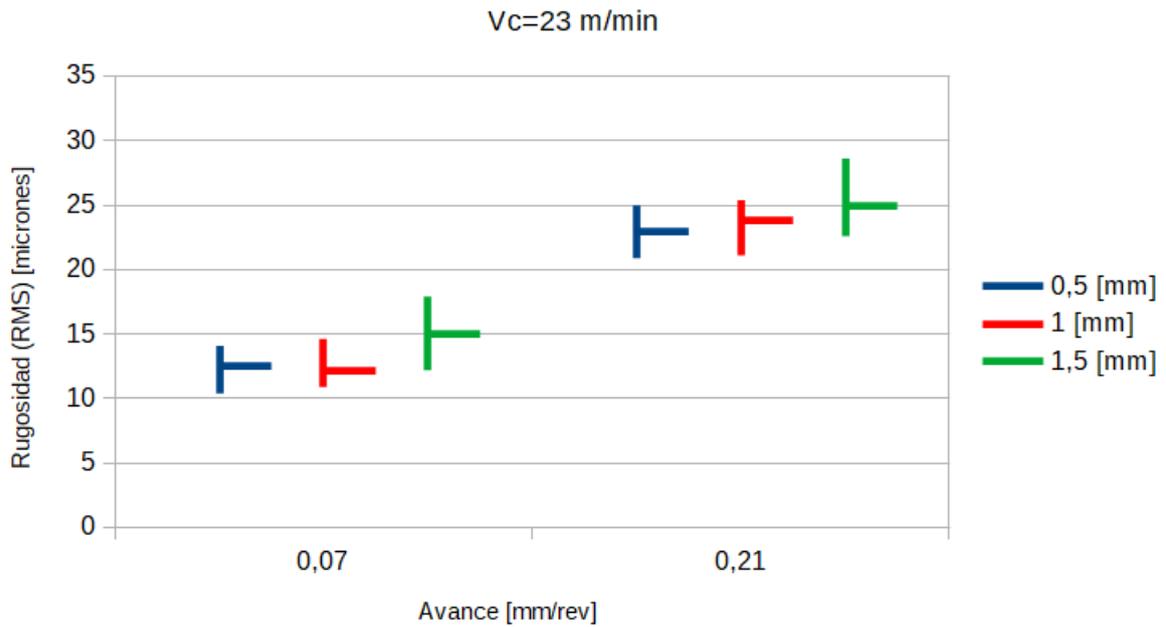


Fig. 32-a. Rugosidad (RMS) frente al avance con profundidades de corte como parámetros y $V_c=23$ m/min.

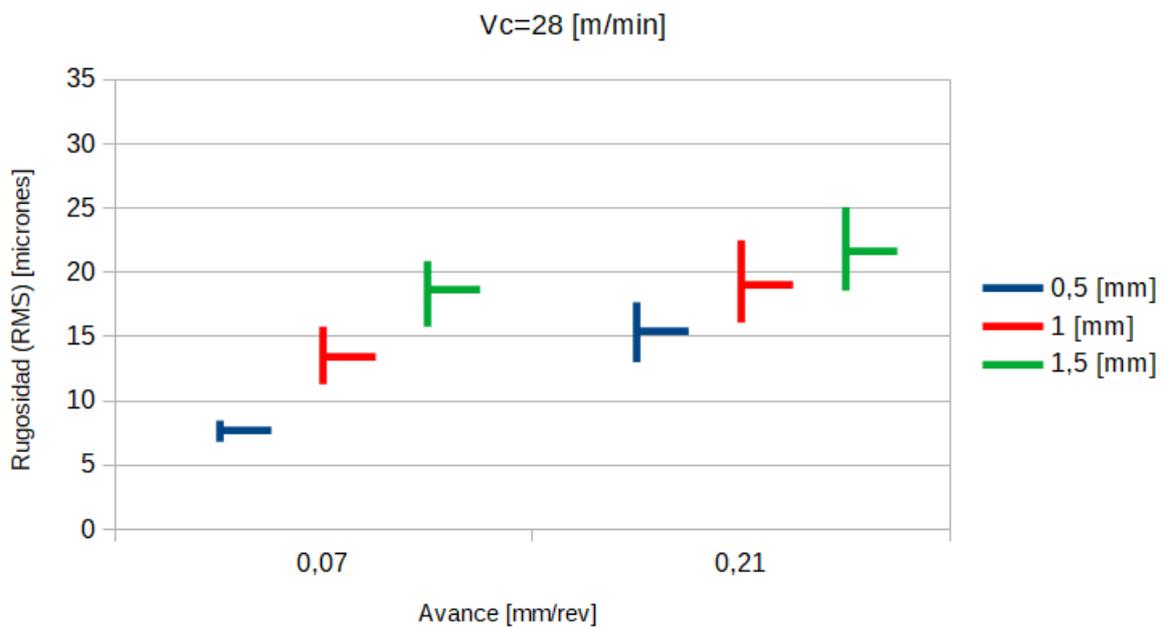


Fig. 32-b, Rugosidad (RMS) frente al avance con profundidades de corte como parámetros y $V_c=28$ m/min.

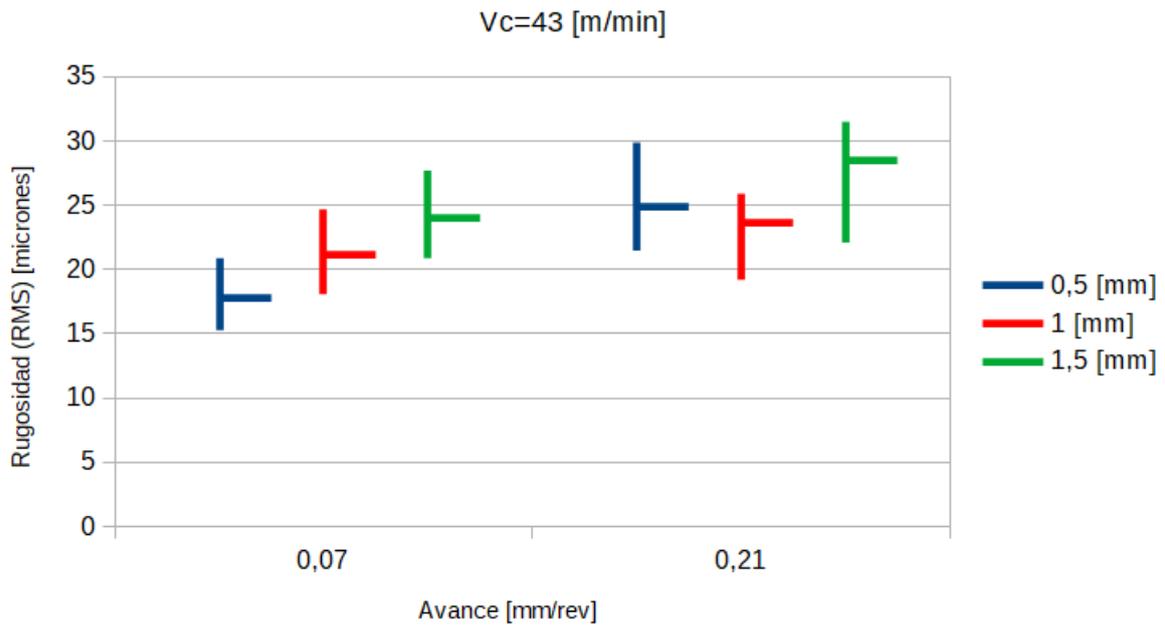


Fig. 32-c. Rugosidad (RMS) frente al avance con profundidades de corte como parámetros y $V_c=43$ m/min.

En la figura 33 se presentan los valores de rugosidad RMS en la zona de inicio y fin del maquinado, los que indican las variaciones existentes a lo largo del espesor maquinado. Como fue mencionado en la metodología empleada, las mediciones de la rugosidad superficial se obtuvieron a un cuarto del espesor con respecto al borde por limitaciones físicas ya que la presencia de fibras expuestas trae errores de medición. A partir de la diferenciación de la zona de medición se obtiene la figura 33, donde los valores graficados de rugosidad RMS no indican más que las variaciones existentes a lo largo del espesor maquinado. Dado que en la Fig. 33 sólo varía la profundidad de corte, evidentemente, el desgaste de la herramienta y el efecto térmico son quienes modifican la rugosidad obtenida. En segundo lugar, puede deducirse que el sistema alcanza una situación óptima al emplear profundidad de corte intermedia ya que no existen variaciones de rugosidad a lo largo del espesor maquinado. Prestando atención sólo a los valores de rugosidad RMS en la zona de entrada, el comportamiento resulta proporcionalmente decreciente y con valores promedio similares a los obtenidos en la bibliografía consultada. Dicha tendencia se encuentra en concordancia con el trabajo presentado por Palanikumar et al. [39] para el mismo set de herramienta y material compuesto. Cabe destacar que en las investigaciones consultadas, los laminados poseen espesores de 4 (mm.) en promedio, siendo 3 veces menor al empleado en este proyecto. Dado que la calidad de la superficie generada es definida por los valores más altos de rugosidad, el tiempo que la herramienta permanece cortando

es el motivo por el cual se obtiene un pobre acabado superficial en la zona de salida o fin de la operación en torno.

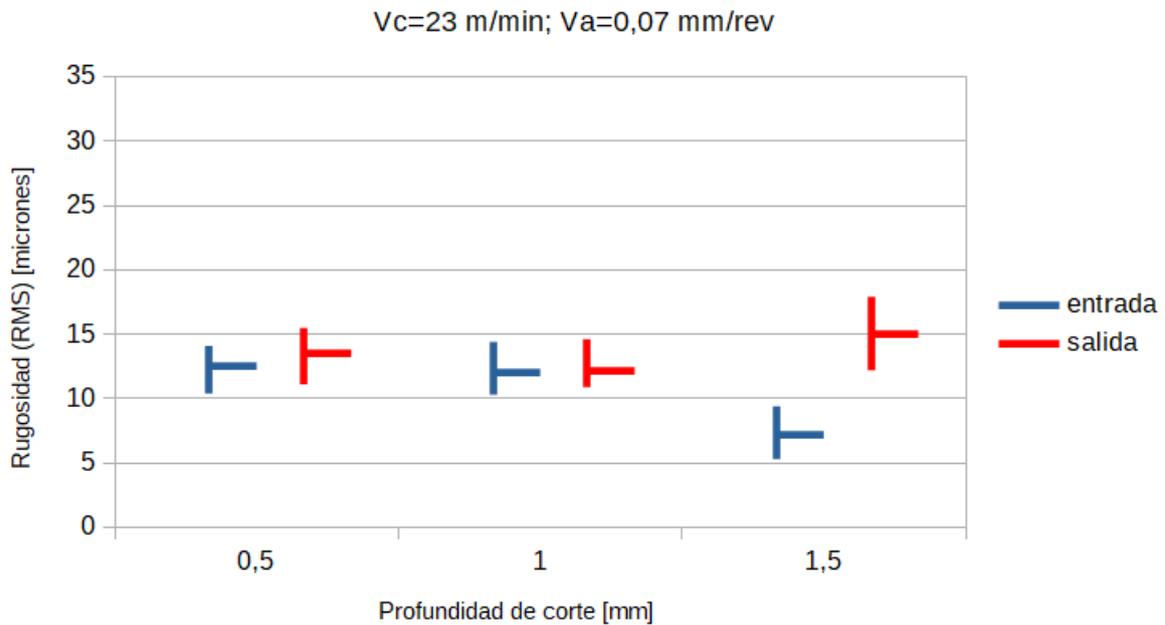


Fig. 33. Mediciones de Rugosidad RMS en la zona de entrada y de salida.

En las figuras 34 son presentados de forma gráfica los valores de rugosidad RMS obtenidos en los ensayos en función de la velocidad de corte empleada. La rugosidad RMS en términos de la velocidad de corte adquiere un comportamiento con condición mínima para velocidad de corte intermedia. Ocurre que al emplear velocidad de corte baja es promovida la formación de virutas con gran contenido de fibras cortadas, dando como resultado un pobre acabado superficial. El empleo de alta velocidad de corte produce que la fricción entre la cara de incidencia y la superficie maquinada eleve la temperatura desarrollada, produciéndose despegues de matriz-refuerzo, cambio de estado en la matriz al desarrollarse temperaturas entorno a la temperatura vítrea, quemado de la matriz y mayor tendencia a la rotura de fibras. Los defectos anteriores conducen a un pobre acabado superficial. El efecto térmico al emplear velocidad de corte intermedia puede que produzca un cambio de estado en la matriz que traiga como resultado un perfil más suave. Pudo observarse resultados similares en las investigaciones llevadas a cabo por Vijaya, M. and Chincholkar, A.M. [36] y Palanikumar et al. [39]. La excepción al comportamiento entre la rugosidad RMS y la velocidad de corte se da para profundidades de corte alta y velocidad de avance bajo. Para tal condición, se encuentra maximizado el efecto térmico debido a una alta profundidad de corte [38], mayor temperatura y generación de calor por mayor tiempo

en contacto entre herramienta-pieza debido al bajo avance, y último, un mayor desgaste como fue visto en la figura 33.

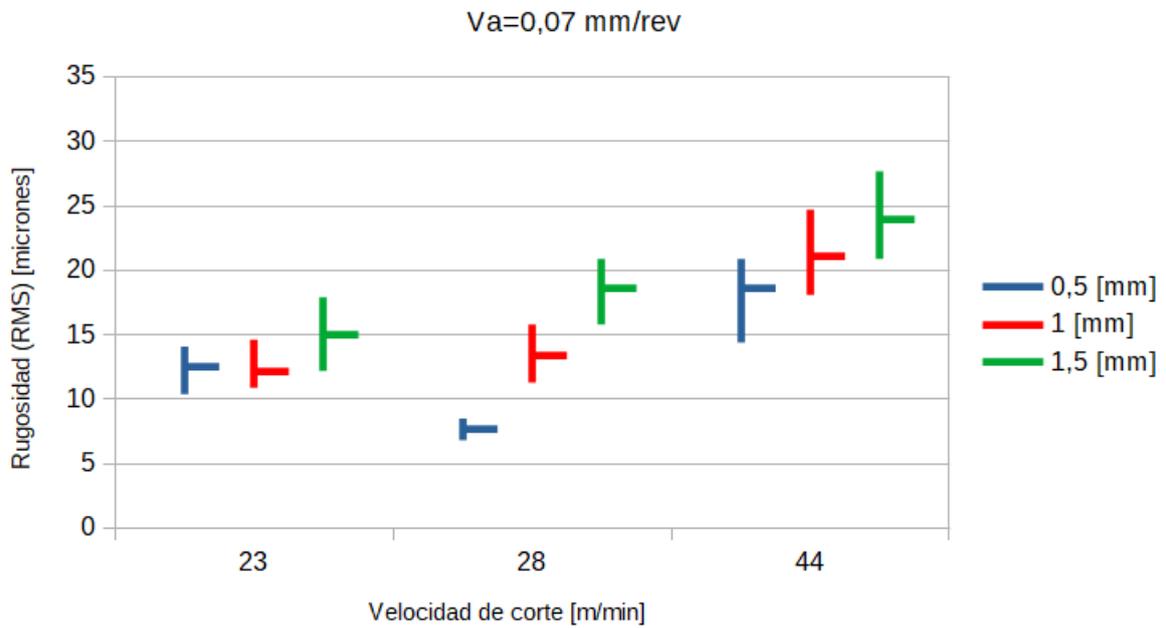


Fig. 34-a. Rugosidad RMS frente a la velocidad de corte con profundidades de corte como parámetros y $V_a=0,07$ mm/rev.

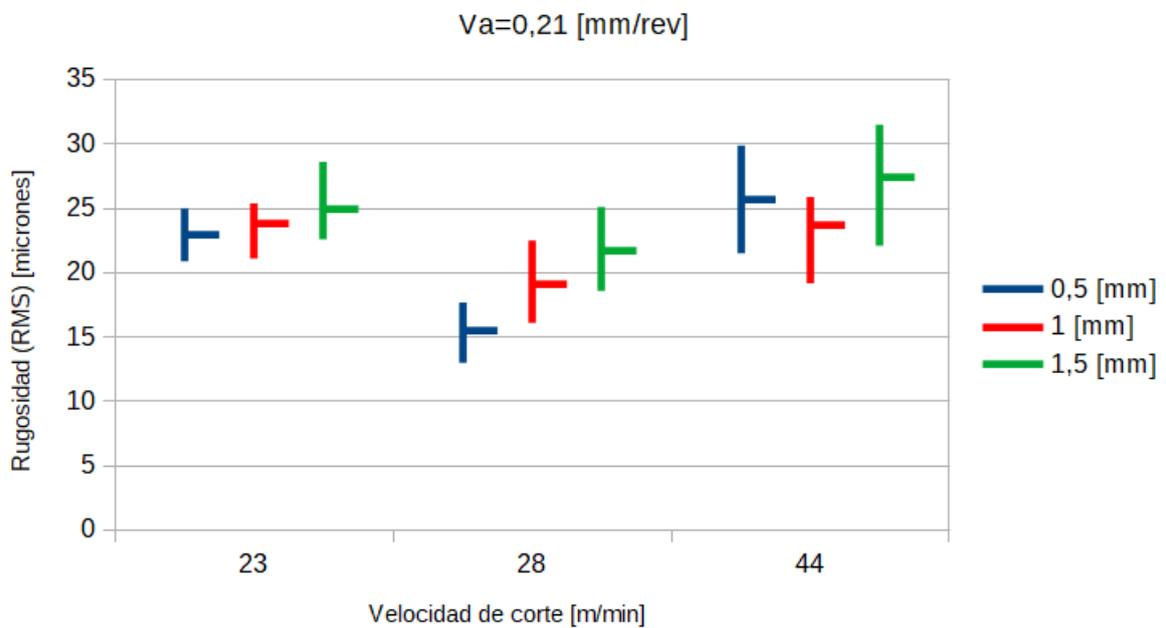


Fig. 34-b, Rugosidad RMS frente a la velocidad de corte con profundidades de corte como parámetros y $V_a=0,21$ mm/rev.

6-1-3-3 Daño Inducido

En los gráficos de la figura 35 se puede observar el daño inducido provocado en las piezas mecanizadas en la totalidad de los ensayos realizados en relación a la velocidad de avance, la cual, presenta una relación proporcional decreciente. Lo anterior se debe a que el empleo de velocidades de avance bajas implican un aumento del tiempo de contacto entre la herramienta-probeta, y consecuentemente, aumento de la temperatura desarrollada en el corte (promovida por la baja conductividad térmica del compuesto). Por tal motivo, ocurre un ablandamiento de la matriz y su resistencia interlaminar decrece. Al aplicar la fuerza de corte necesaria para lograr el maquinado en las condiciones de ensayo, el crecimiento de la delaminación es promovida en las últimas capas y se consigue un aumento del daño inducido.

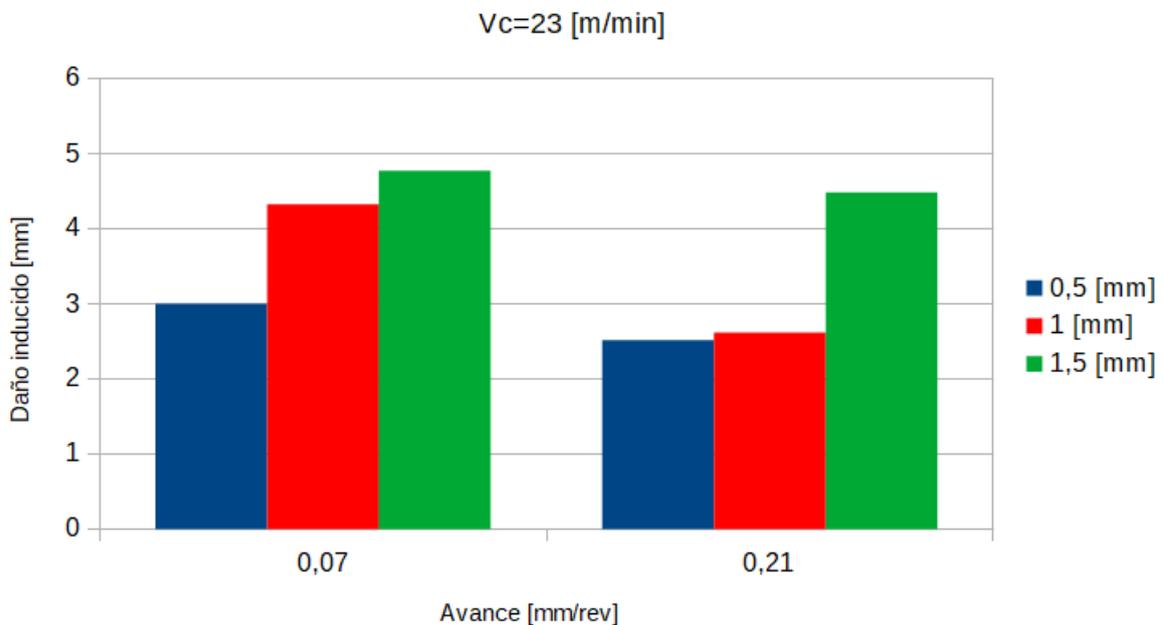


Fig. 35-a. Daño inducido frente a velocidad de avance con profundidades de corte como parámetros y $V_c=23$ m/min.

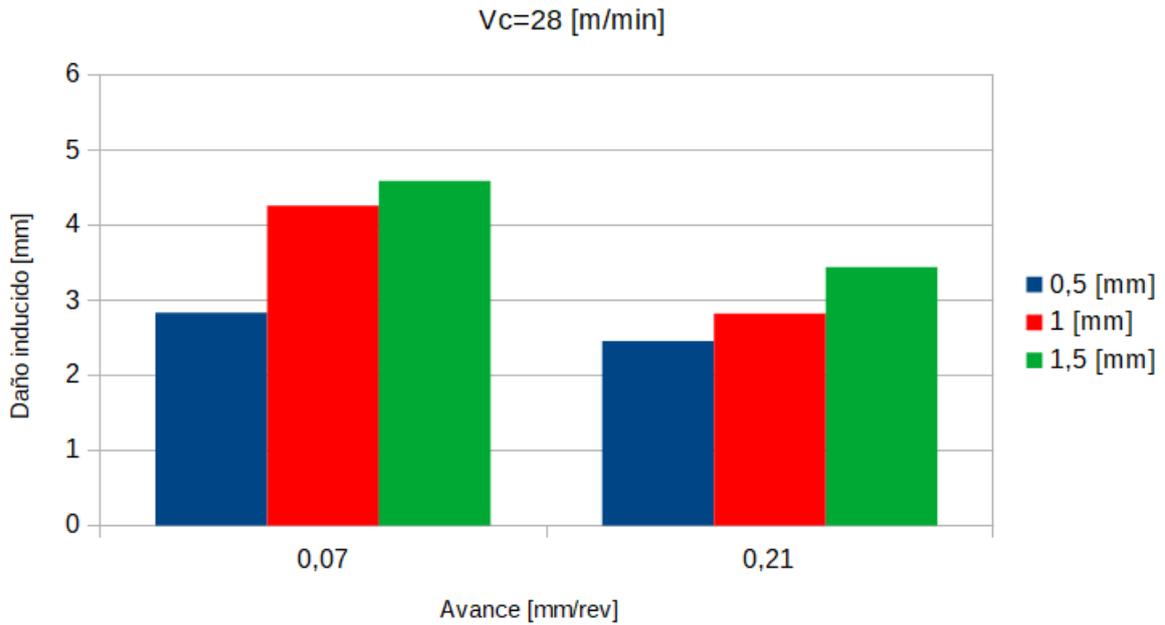


Fig. 35-b. Daño inducido frente a velocidad de avance con profundidades de corte como parámetros y $V_c=28$ m/min.

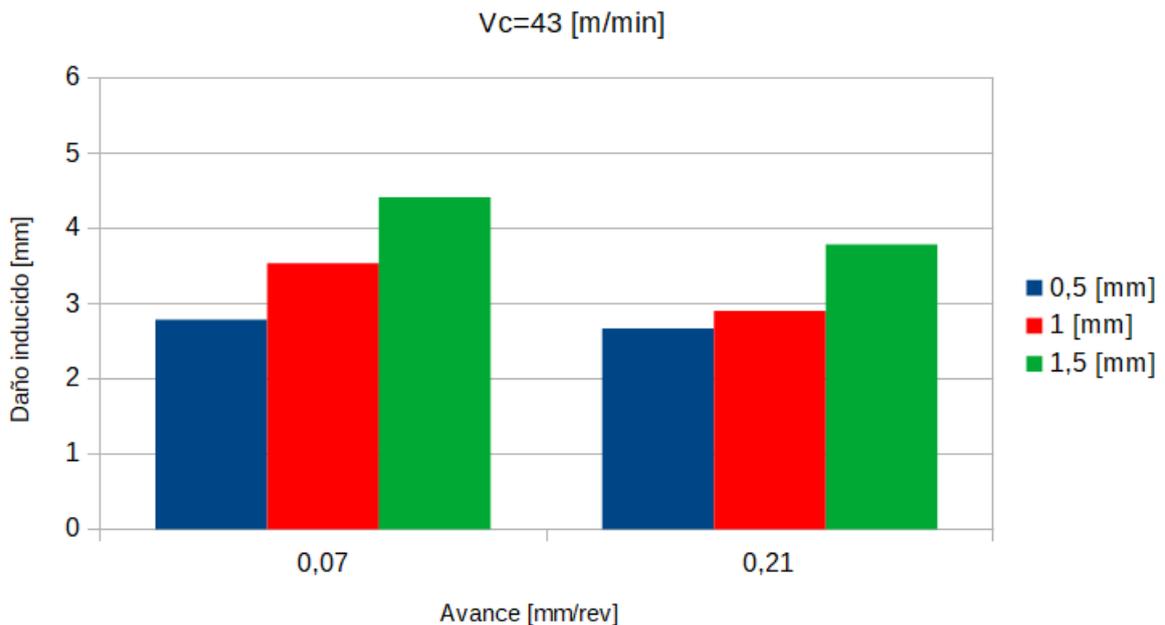


Fig. 35-b. Daño inducido frente a velocidad de avance con profundidades de corte como parámetros y $V_c=43$ m/min.

En las figuras 36 se encuentran graficados los valores de daño inducido de los ensayos llevados a cabo en relación a la profundidad de corte. Del análisis de las anteriores figuras, se observa un comportamiento proporcional creciente entre las variables. Dado que la profundidad de corte ensayada es análoga a la distancia de incidencia del bit, el aumento

de la profundidad de corte consigue abarcar una mayor porción de fibras y refuerzo que son flexionadas fuera de plano. Por tal razón, el aumento de la delaminación de las últimas capas maquinadas produce el incremento del daño inducido. En la bibliografía consultada fue encontrado un comportamiento similar en la investigación llevada a cabo por Alessandra Caggiano [37]. El desarrollo del daño inducido en término de la profundidad de corte ocurre del mismo modo al fenómeno que se anticipó en Análisis de superficies para la zona de salida. Además, y en correspondencia con el resultado de la figura 33, el filo de la herramienta se preserva en mejor estado (posee mayor capacidad de corte) cuanto menor es la profundidad de corte seleccionada. Por tal motivo, es necesario aplicar una menor fuerza para ejecutar el mecanizado, obteniendo una menor delaminación en las últimas capas del compuesto.

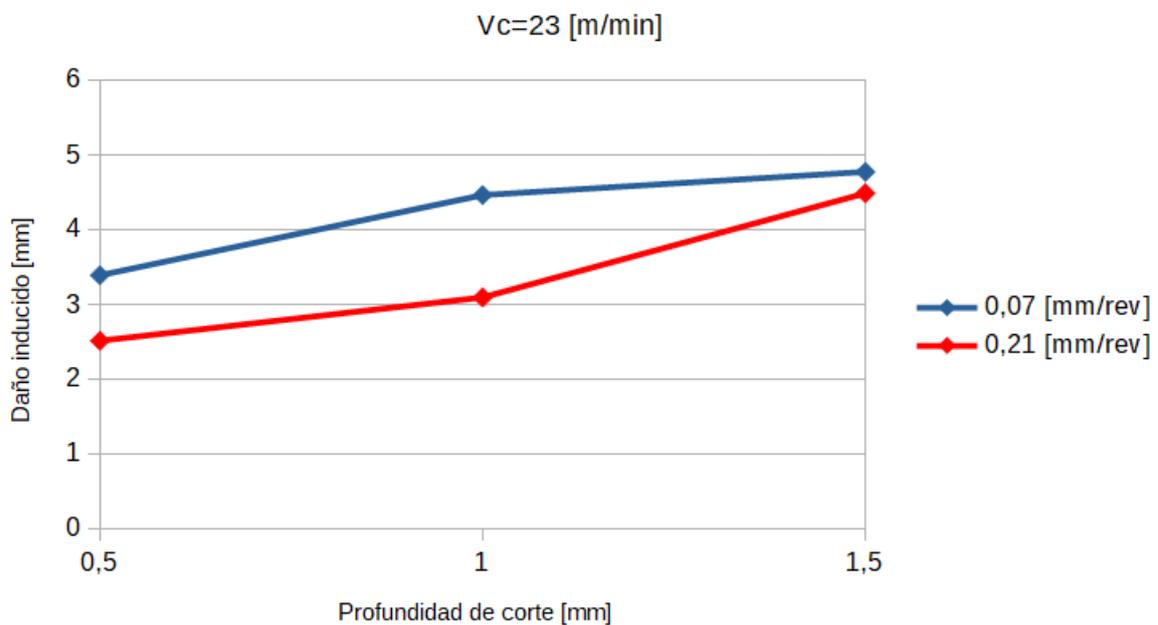


Fig. 36-a. Daño inducido frente a profundidad de corte con velocidades de avance como parámetros y $V_c=23$ m/min.

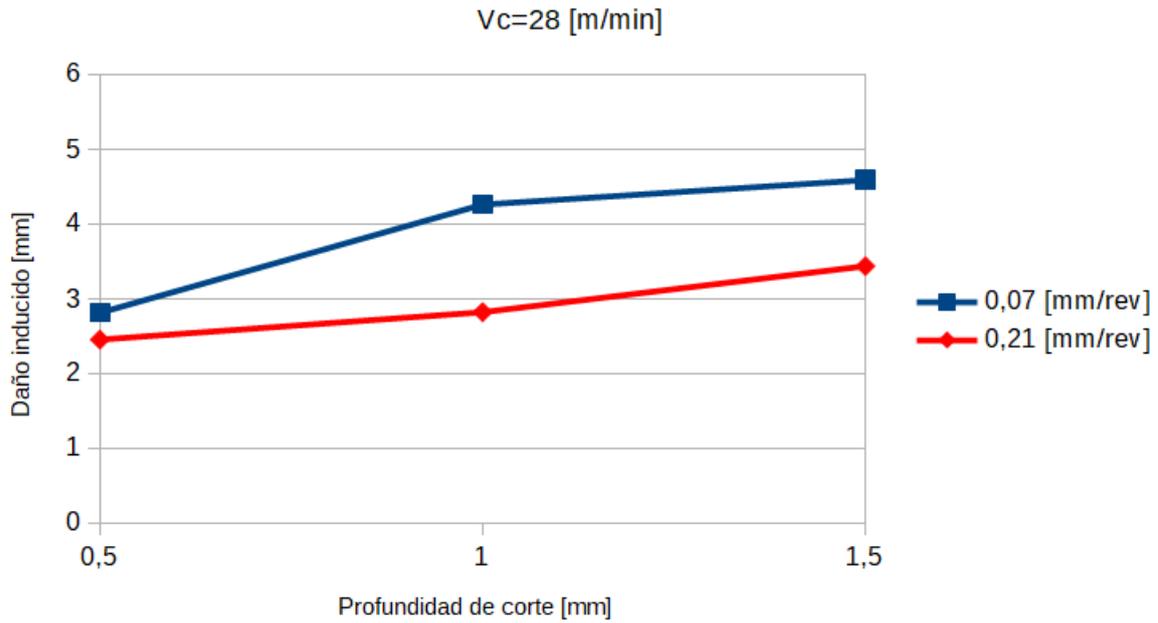


Fig. 36-b. Daño inducido frente a profundidad de corte con velocidades de avance como parámetros y $V_c=28$ m/min.

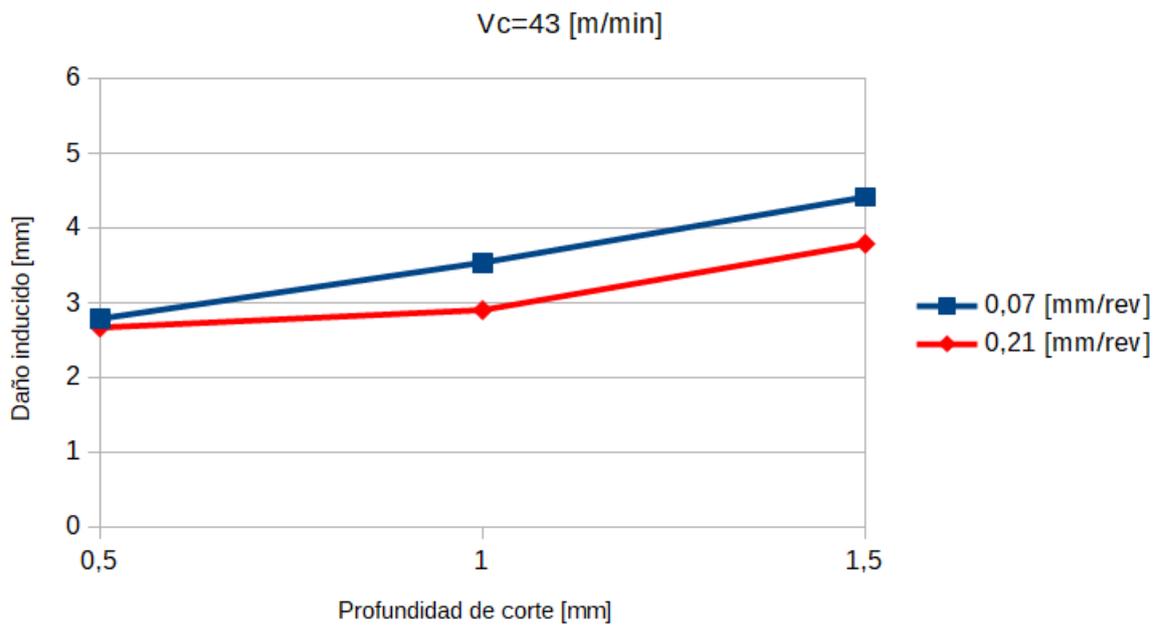


Fig. 36-c. Daño inducido frente a profundidad de corte con velocidades de avance como parámetros y $V_c=43$ m/min.

En las figuras 37 se encuentran los valores del daño inducido de los ensayos realizados en relación a la velocidad de corte empleada. De la observación de los resultados, no es posible hallar una clara correlación entre las variables de estudio. El empleo de velocidades de avance cada vez menores magnifica los valores de daño

inducido obtenidos. En caso de velocidad de avance baja, existe un comportamiento proporcional decreciente con el daño inducido. Lo anterior puede observarse en la figura 37-a. El desarrollo de elevadas temperaturas de corte, producto de un prolongado contacto entre bit/probeta con el bajo avance y mayor fricción por las rotaciones del husillo de la máquina, implica una disminución de la fuerza de corte necesaria y actuante en la herramienta, consiguiendo una menor delaminación. En caso de avance alto y profundidad de corte menor a la máxima (Fig. 37-c) se obtiene una proporcionalidad creciente entre el daño inducido y la velocidad de corte. El aumento de la velocidad de corte implica una mayor generación de calor producto de la fricción entre la cara de incidencia del bit y la superficie generada. La temperatura desarrollada en el corte incentiva el ablandamiento de la matriz y disminución de la resistencia interlaminar de la pieza maquinada, por lo que incrementa el daño inducido en el corte. En caso de avance alto y profundidad alta, el comportamiento entre el daño inducido y la velocidad de corte empleada se modifica a un estado con condición mínima. Para velocidad de corte baja, se producen mayores esfuerzos mecánicos mientras que a velocidades altas, la fricción y su consecuente aumento de temperatura promueve una mayor delaminación.

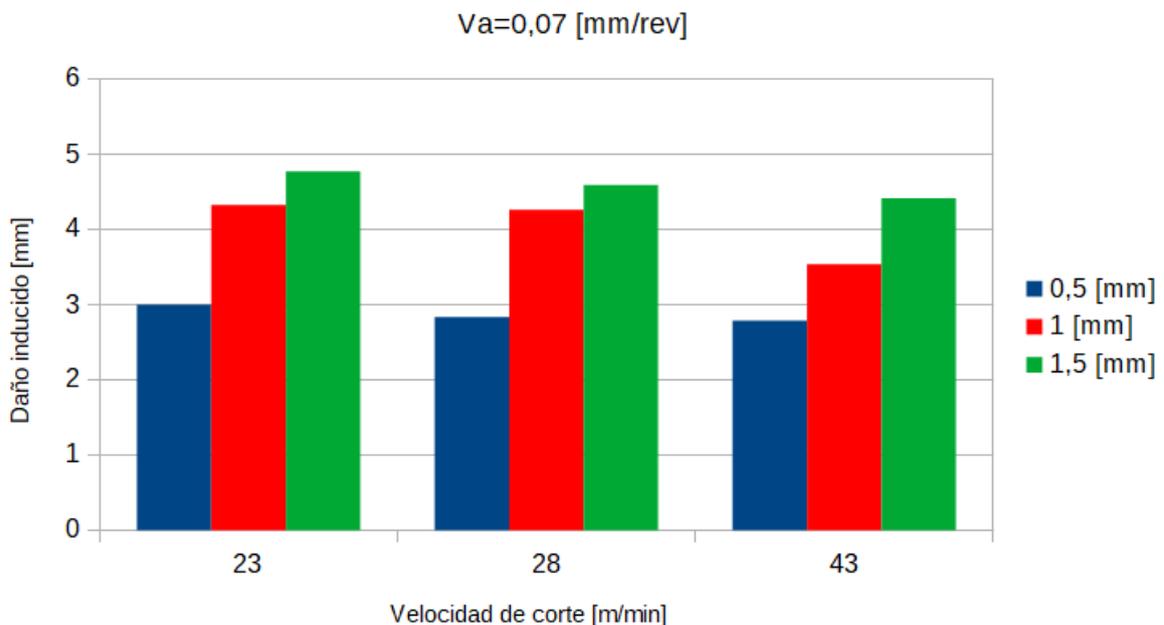


Fig. 37-a. Daño inducido frente a la velocidad de corte con profundidades de corte como parámetros y $V_a=0,07$ mm/rev.

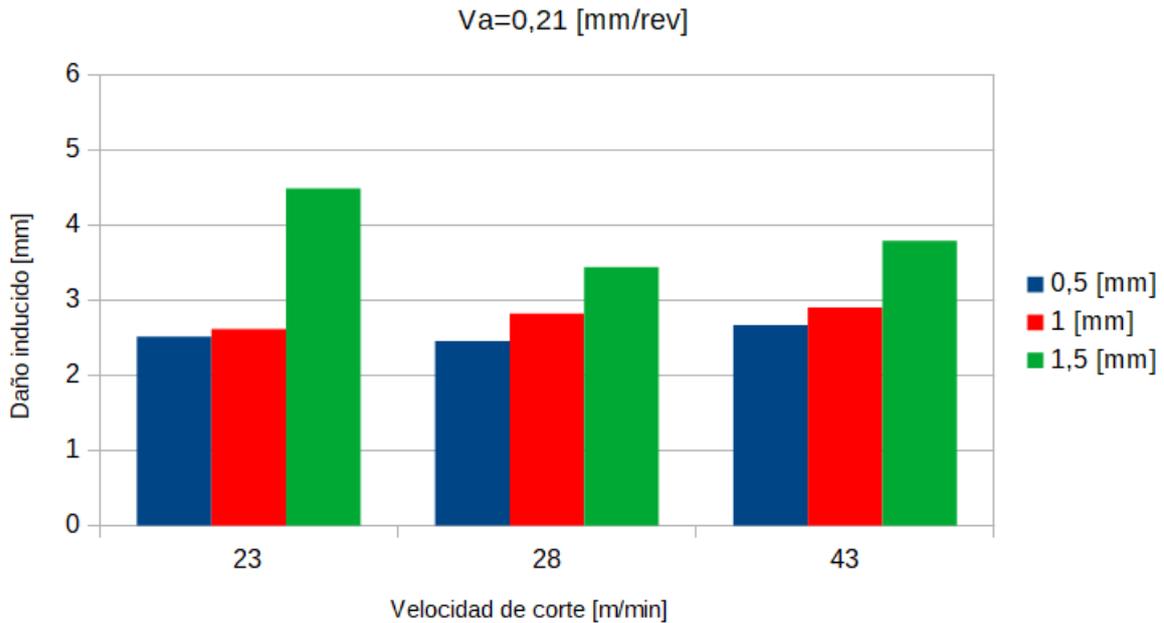


Fig.37-b. Daño inducido frente a la velocidad de corte con profundidades de corte como parámetros y Va=0,21 mm/rev.

6-1-4 Condición óptima

La condición de mínima rugosidad RMS se logra al emplear velocidad de avance baja, velocidad de corte intermedia y profundidad de corte baja, mientras que la condición de mínimo daño inducido se alcanza al emplear velocidad de avance alto, velocidad de corte intermedia y profundidad de corte baja. Como puede concluirse, el set de parámetros de corte que minimizan el acabado e integridad superficial de la pieza mecanizada son no coincidentes y representan dos posibles soluciones a emplear según requiera el proceso de mecanizado o la aplicación futura de las piezas PRFV. A continuación, se procede a analizar una solución de compromiso entre las opciones anteriores:

- a) Emplear avance alto en la situación de mínima rugosidad: trae un aumento de la rugosidad de 100,25% (7,72 a 15,46 micrones) y una disminución del daño de 12,78% (2,816 a 2,456 mm).
- b) Emplear avance bajo en la situación de mínimo daño inducido: trae un aumento del daño de 14,65% (2,456 a 2,816 mm) y una disminución de la rugosidad de 50,06% (15,46 a 7,72 micrones).

Para obtener piezas mecanizadas con mínima rugosidad (RMS) y daño inducido es conveniente emplear velocidad de avance baja, profundidad de corte baja y velocidad de corte intermedia. Cuando en las mediciones se obtienen mayores desviaciones en referencia al valor medio, se infiere la calidad, cantidad de defectos y uniformidad del

mecanizado en la zona de estudio, siendo conveniente optimizar la variabilidad de resultados y emplear condiciones de corte con poca desviación. La condición que optimiza el acabado e integridad superficial de las piezas mecanizadas posee la menor desviación estándar (0,62 micrones) de la totalidad de los ensayos respecto a la rugosidad RMS, Fig. 34-a. Una clara uniformidad a lo largo del espesor del tubo mecanizado pudo detectarse a simple vista luego de realizar la operación de refrentado, a la misma vez que la presencia de mínima cantidad, largo y fibras sin cortar en la superficie mecanizada como se observa a continuación, figuras 38.

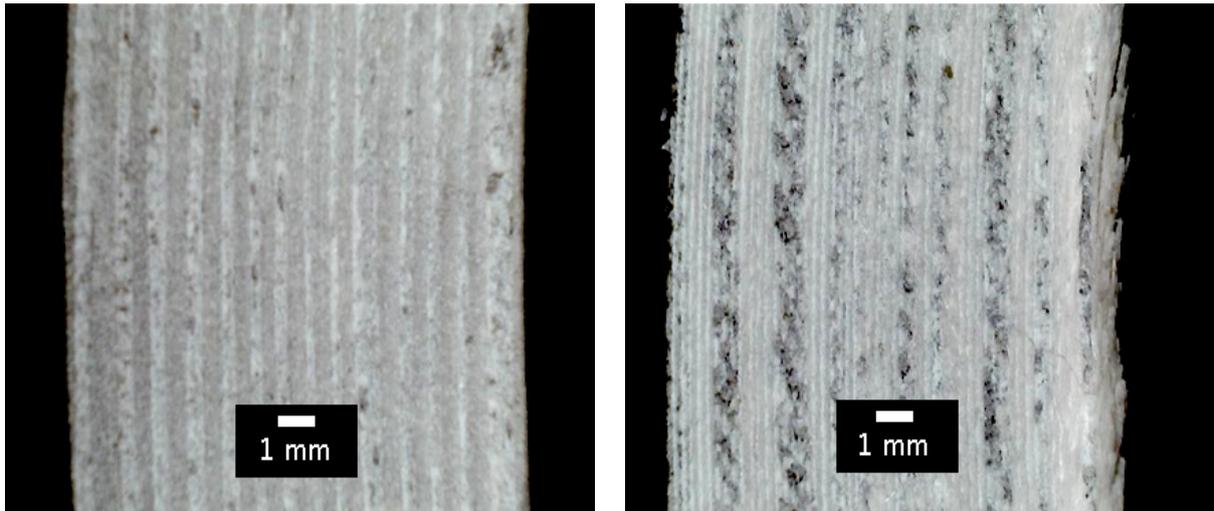


Fig. 38) Superficie mecanizada en: a) condición óptima; b) condición más desfavorable.

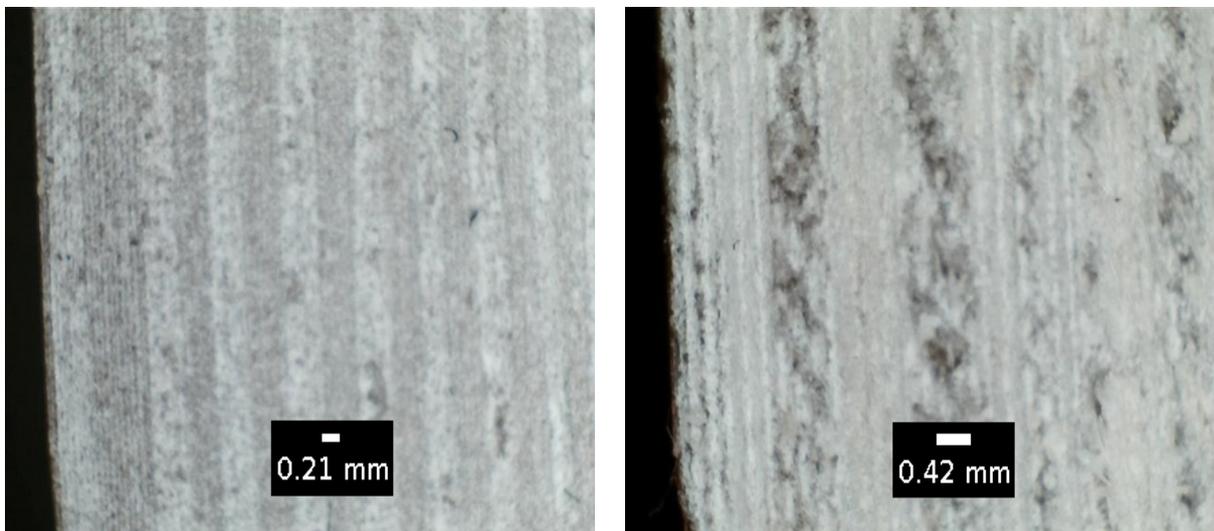


Fig. 38) Superficie zona entrada en: c) condición óptima; d) condición más desfavorable.

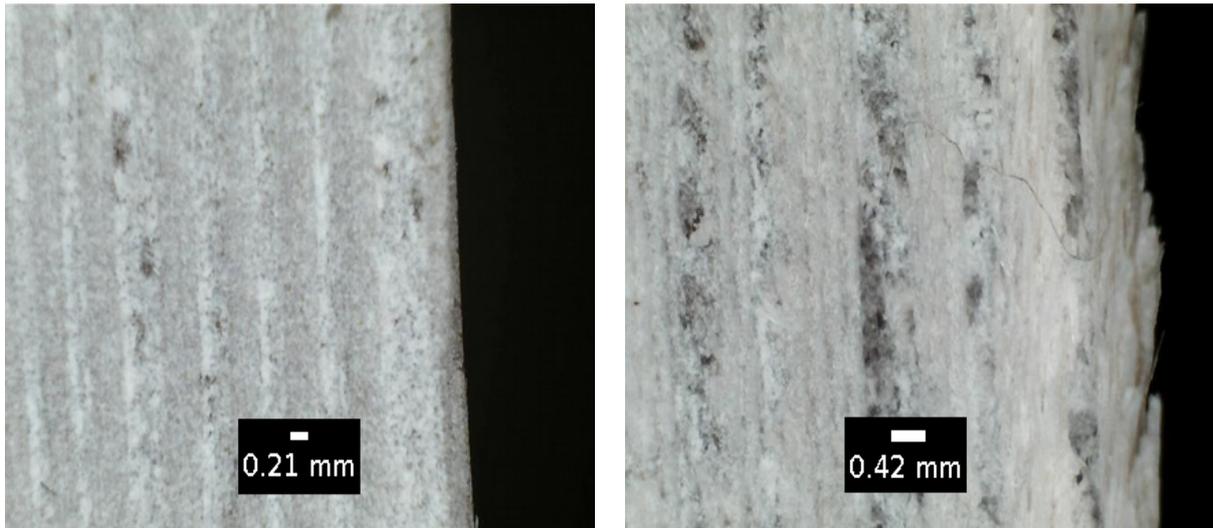


Fig. 38) Superficie zona salida en: e) condición óptima; f) condición más desfavorable.

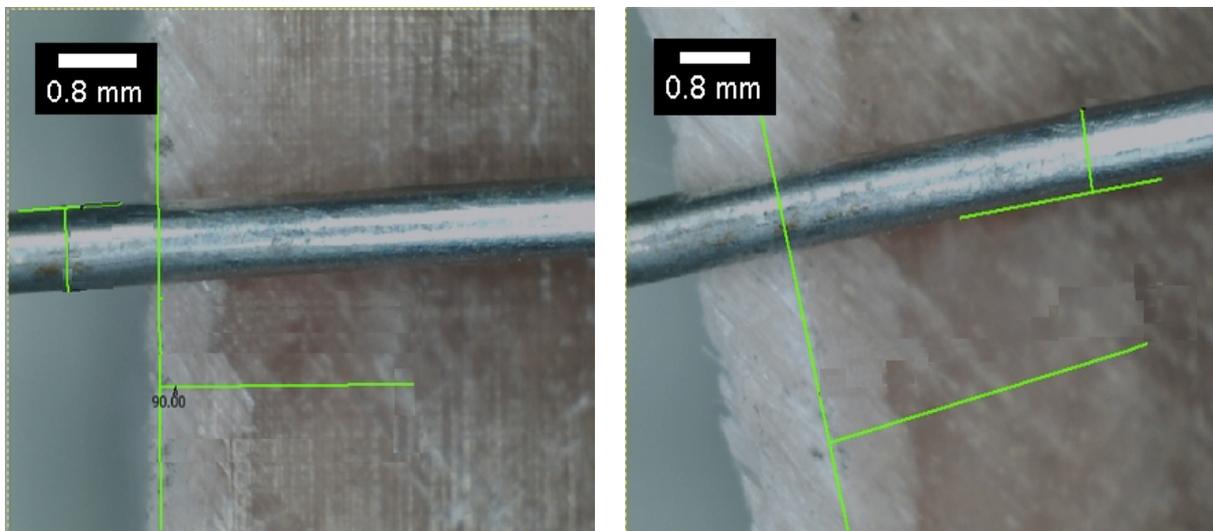


Fig. 38) Daño inducido en: g) condición óptima; h) condición más desfavorable.

6-2 Ensayos de taladrado

En este capítulo se detalla el estudio realizado acerca del comportamiento de piezas mecanizadas en la operación de taladrado. El sistema abordado se compone de material compuesto PRFV y como herramienta de corte la broca convencional de Acero rápido al Cobalto (HSS).

6-2-1 Características del ensayo y condiciones experimentales

El material de partida fue un tubo de PRFV (Plástico reforzado con fibra de vidrio) con 12,5 mm de espesor de pared, 1500 mm de largo y 197 mm de diámetro interno, que posee las siguientes características:

- contenido de fibras de 78,6%

- ángulo de procesamiento de 57,6%
- porosidad de 3,8% (en dirección radial y longitudinal)
- dureza de 97,4 y 88,2 Barcol (exterior e interior, respectivamente)
- temperatura de transición vítrea de 148,2 y 147,5°C (exterior e interior, respectivamente).

Para lograr una correcta sujeción y evitar las dificultades que se obtendrían al mecanizar un tubo, fueron seccionadas porciones prismáticas en dirección axial a la del tubo para obtener porciones de 80 (mm.) de ancho y 180 (mm.) de largo, como se observa en la figura 39-a.

La máquina empleada en los ensayos de taladrado fue un centro de mecanizado C.N.C. fabricado por la empresa Miltronics (Fig. 39-b). Dicha máquina permite la programación de velocidades de corte y de avance constantes de la herramienta, las cuales, no dependen de la fuerza aplicada como sucede en un taladrado del tipo sensitivo. La fuerza de empuje se pudo relevar mediante el empleo de un dinamómetro. El tipo y material de la herramienta a ensayar es una broca convencional de Acero rápido al Cobalto (HSS) de doble filete. Para lograr la repetitividad de las condiciones geométricas y eliminar el desgaste en la broca al exceder una banda de desgaste en la cara de incidencia de 0,3 (mm.) de profundidad, se empleó el accesorio comercial Drill Doctor para practicar el rectificado de la herramienta.

En la bibliografía consultada [24-26/40-55] se encontraron numerosos estudios sobre piezas con formas simples, como la prismática obtenida en los compuestos laminados, haciendo mención al estudio del taladrado en superficies complejas como un área a estudiar. La forma de partida tipo tubo disponible facilitó los estudios en dicho campo novedoso.

Asimismo, se realizó el diseño de una placa de soporte a fin de lograr la reducción de la Delaminación durante el maquinado, Fig. 39-a, siendo este dispositivo un aporte significativo ya que no fue encontrado algo similar en la bibliografía consultada. La función de la placa soporte diseñada fue modificar la condición de borde en el entorno al agujero a maquinar. La restricción del posible desplazamiento de las últimas capas delaminadas y el incremento de sección por parte de la placa soporte, implican un menor daño en el agujero maquinado. Puntualmente, el empleo de la placa presenta una condición favorable para la reducción de la Delaminación Push-out. En el diseño del soporte fue necesario generar una superficie convexa con un diámetro externo igual o mayor al diámetro interno del tubo de 197 (mm.) para lograr una correcta sujeción del conjunto, Fig. 39-a. El material de la placa

fue madera de pino y la superficie cilíndrica fue lograda en torno paralelo con empleo de plato de cuatro mordazas.



Fig. 39-a) Probeta ensayada, método de sujeción, accesorio de apoyo empleado y dinamómetro; b) Centro de mecanizado C.N.C

A fin de seleccionar las condiciones experimentales se realizó una evaluación de las capacidades de la maquinaria disponible en la Facultad de Ingeniería de la U.N.M.d.P y las condiciones de ensayo comunes en la bibliografía. Fueron realizados ocho agujeros preliminares para evidenciar el desgaste en la herramienta y obtener un rango de velocidades a evaluar. Se estableció como fin de vida útil de la herramienta la generación de un desgaste en la cara de incidencia de 0,3 mm, dando lugar al reafilado. Las operaciones de taladrado tuvieron como punto de inicio el diámetro externo de 222 (mm.) y punto final el diámetro interno de 197 (mm.) de la probeta, con incidencia normal a la bancada de la máquina como se observa en la Fig. 86. Las operaciones de taladrado fueron realizadas sin fluido de corte y con aspiradora en cercanía a la herramienta para evitar el desprendimiento de polvo de fibra de vidrio al ambiente de trabajo. Se seleccionaron un total de 24 condiciones de ensayo a partir del siguiente set de condiciones experimentales (sin considerar aún el empleo de placa soporte):

- Velocidades de corte: 10, 20, 30 y 40 (m/min)
- Velocidades de avance: 32, 96 y 255 (mm/rmin)
- Diámetro de la herramienta: 10 (mm)

6-2-2 Relevamiento y análisis del daño

La metodología empleada consistió del rectificado cada ocho agujeros, mediciones de rugosidad, captura de imágenes en zona de incidencia y de salida de la broca e imágenes

de condición inicial y final de la herramienta, además de la medición de la fuerza de empuje desarrollada en el maquinado (figura 40).

En la literatura fue posible encontrar trabajos con mismo set de herramienta y material compuesto donde se implementó el rectificado de la herramienta cada cinco agujeros, como el llevado a cabo por Sing et al. [40], denotando la baja resistencia a la abrasión de las brocas HSS. Asimismo, a partir de los ensayos preliminares fue posible determinar que el desgaste producido generó una banda de desgaste muy inferior a 0,3 (mm.) de profundidad, con lo cual, se decidió practicar el rectificado de la broca cada ocho agujeros. El accesorio con el que se rectificó y acondicionó a la herramienta empleada fue el dispositivo comercial Drill Doctor. Fueron realizadas capturas de imágenes de la broca empleada cada ocho agujeros maquinados mediante un microscopio digital USB fabricado por Innovative product world para analizar los posibles cambios producidos en la herramienta (Figs. 40: c-e).

La medición del acabado superficial en los ensayos fue relevada a partir del parámetro dimensional Rugosidad superficial aritmético (RMS). La rugosidad RMS pudo obtenerse con un accesorio conocido como rugosímetro, modelo Surtronic 3+ y gestionado por el software Talyprofile. Se realizaron mediciones en distintas regiones superficiales a lo largo del espesor, desde el diámetro externo hasta el diámetro interno de las probetas ensayadas. El valor de rugosidad para cada ensayo surgió del promedio de las mediciones obtenidas, y fueron considerados los valores más altos ya que determinan la calidad del agujero obtenido y el consecuente acabado superficial.

La descripción de la integridad superficial en los ensayos se pudo relevar a partir del parámetro adimensional Factor de delaminación. Dicho factor pudo obtenerse mediante la captura de imágenes (Figs. 40:a-b) con el microscopio USB. Mediante las imágenes se pudo establecer y medir la zona delaminada en el entorno a la superficie generada haciendo uso de una medida patrón (alfiler con 0,8 mm. de diámetro). El posterior análisis de las imágenes en el software Inventor permitió obtener el parámetro de interés.

La medición de la fuerza de empuje se pudo realizar mediante el empleo de un dinamómetro fabricado en la Facultad de Ingeniería. La información obtenida acerca de la fuerza de empuje sirvió de complemento para la comprensión y descripción de las variables de salida del proceso de maquinado, es decir, el comportamiento del acabado e integridad superficial en relación a los parámetros de corte.

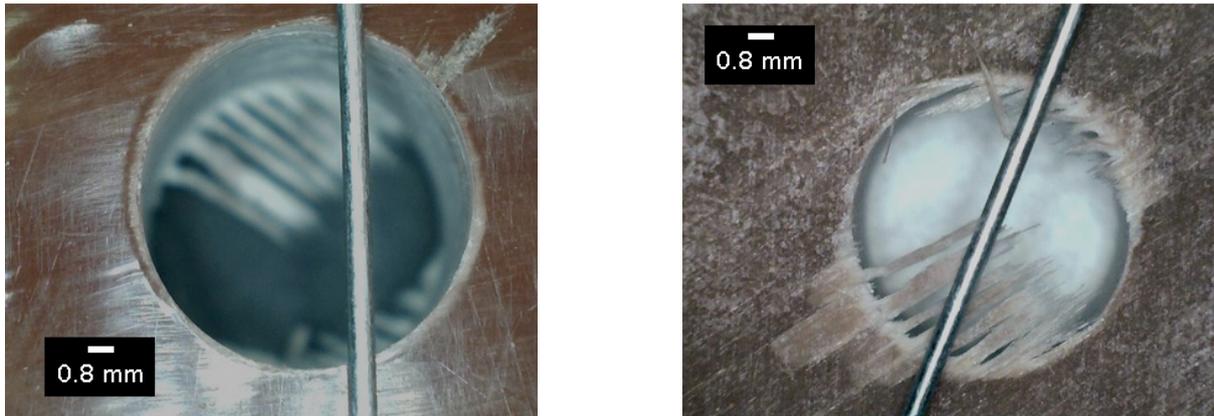


Fig. 40. Agujero de 10 (mm.) de diámetro: a) Zona de entrada; b) Zona de salida.

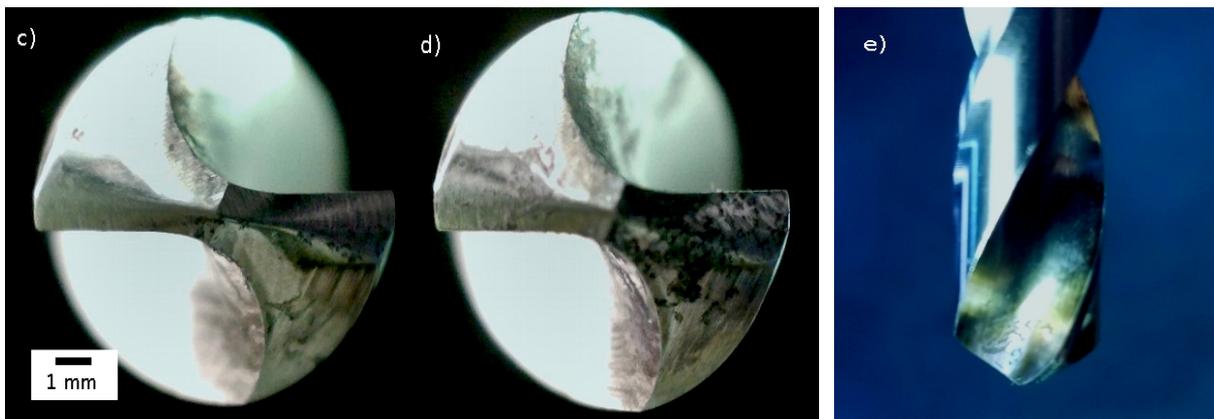


Fig. 40. Broca de 10 (mm.) de diámetro: c) Condición inicial (velocidad de corte alta y de avance baja); d) Condición final (ocho agujeros); e) Vista lateral con presencia de óxidos.

Así, ensayos de torneado se realizaron siguiendo la siguiente secuencia:

1. Rectificado de la broca con el accesorio Drill Doctor.
2. Mecanizado por taladrado de una superficie de la muestra con determinados parámetros de corte. Durante el mismo, se registra los valores de Fuerza de empuje de manera continua con el empleo del dinamómetro descrito.
3. Captura de dos imágenes con el microscopio USB en la cara de incidencia y de salida para cada agujero practicado.
4. Determinación de integridad superficial con el Factor de delaminación, mediante el procesamiento descrito previamente. Asimismo, se evaluó la cantidad, largo, presencia o ausencia de fibras sin cortar por medio del análisis de superficies con las imágenes adquiridas para complementar la investigación acerca de la generación de defectos.
5. Medición del acabado a través del parámetro Rugosidad superficial (RMS) obtenido con rugosímetro modelo Surtronic 3+ gestionado por el software Talyprofile. Las mediciones de rugosidad fueron efectuadas a 3 (mm.) con

respecto al radio interno debido a la presencia de fibras sin cortar en la zona de salida. El valor de rugosidad se calculó como el promedio de las mediciones y la consideración de los valores más altos ya que determinan la calidad superficial generada. De ésta manera fue como se determinó el comportamiento del compuesto PRFV con la obtención de los parámetros de salida del sistema: la rugosidad superficial (RMS) y el daño inducido.

6-2-3 Análisis y discusión de resultados

6-2-3-1 Fuerza de empuje desarrollada

En la figura 41-b se encuentran graficados los valores promedio de fuerza de empuje desarrollada en función de la velocidad de avance empleada en los ensayos. Puede apreciarse que la fuerza necesaria para que la broca avance presenta un comportamiento creciente a medida que se emplea mayor velocidad de avance. Este fenómeno se debe a que el aumento de la velocidad de avance implica un aumento de la sección de viruta a cortar. Dicha sección puede calcularse como el producto entre una constante (0,25), el diámetro de la broca (mm) y el avance empleado (mm/rev). El aumento de la sección de viruta sin cortar implica una mayor resistencia al corte de la misma, por lo que es necesario aplicar una mayor fuerza resultante para lograr el corte. El mencionado comportamiento es observado en gran parte de los trabajos publicados [40-55].

En la figura 41-c se observan los valores promedio de fuerza de empuje desarrollada en función de la velocidad de corte, en el que se establece un comportamiento proporcional decreciente. El empleo de velocidad de avance constante mientras se aumenta la velocidad de corte, promueve la generación de calor producto de un mayor roce entre las superficie de la herramienta con el PRF. La zona de contacto entre la herramienta y el material compuesto, desde un punto de vista térmico, puede interpretarse como una fuente de calor. Cuanto mayor es el tiempo de permanencia de la fuente de calor en el compuesto, el aumento de temperatura produce el ablandamiento de la matriz polimérica, dando como resultado una disminución de la fuerza necesaria para efectuar el maquinado (Fig. 41-a). La resistencia al corte del compuesto disminuye notablemente al mecanizar con velocidad de avance baja y velocidad de corte alta (Figs. 41). La generación de calor y excesiva temperatura en la zona de corte distinguirse de forma apreciable en la herramienta ensayada con alta velocidad de corte. Se pudo observar la presencia de óxidos de color amarillo en los filos principales, gran parte de los filos secundarios y los canales de evacuación de viruta (Fig. 40-e). En los estudios de taladrado realizados por Ramulu M. et al. [52] sobre distintos materiales de herramienta, detectaron el desarrollo de las más altas

temperaturas en la broca de Acero rápido al Cobalto al combinar velocidades de corte alta con avance bajo. El comportamiento inversamente proporcional y la sensibilidad entre la fuerza de empuje y la velocidad de corte es concordante con las investigaciones de Rawat S. y Attia H. [49], Singh I. et al. [40], Dhiraj Kumar y K.K. Singh [51].

Ensayo con broca de 10 mm

$V_a=32$ mm/min $V_c=10, 20, 30, 40$ m/min

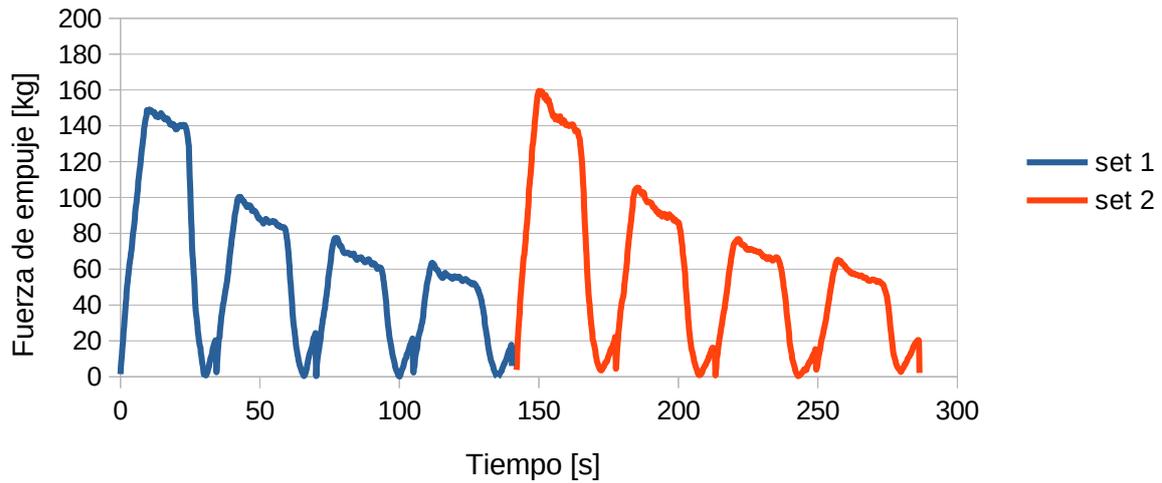


Fig. 41-a. Fuerza de Empuje en función del tiempo de ensayo para dos repeticiones empleado velocidad de avance constante y distintas velocidades de corte.

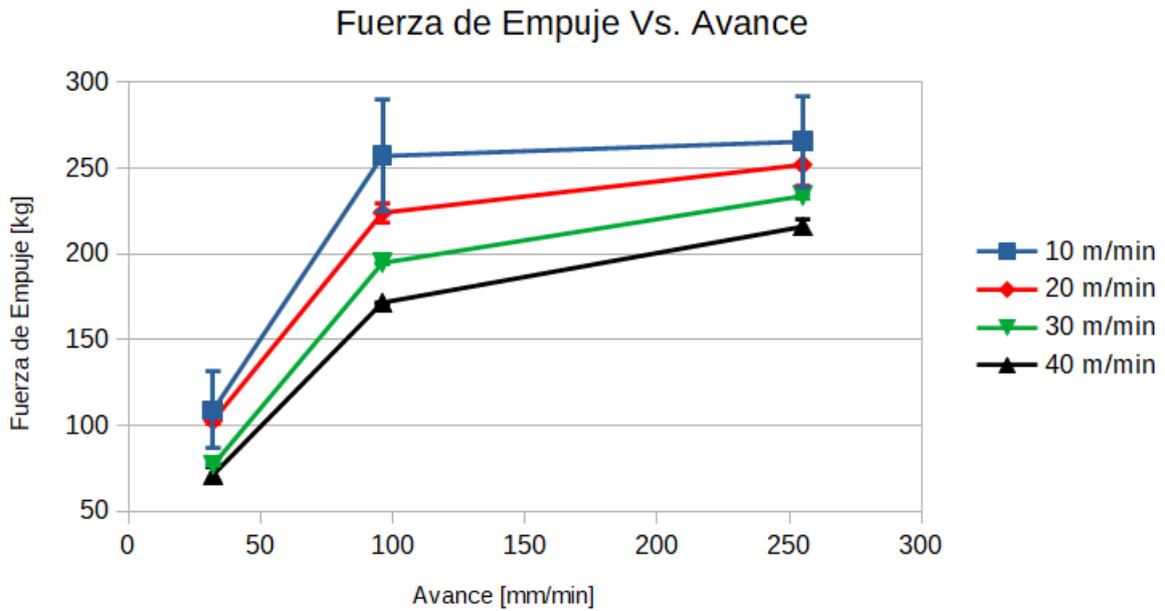


Fig. 41-a. Fuerza de Empuje frente a la velocidad de avance con velocidades de corte como parámetro.

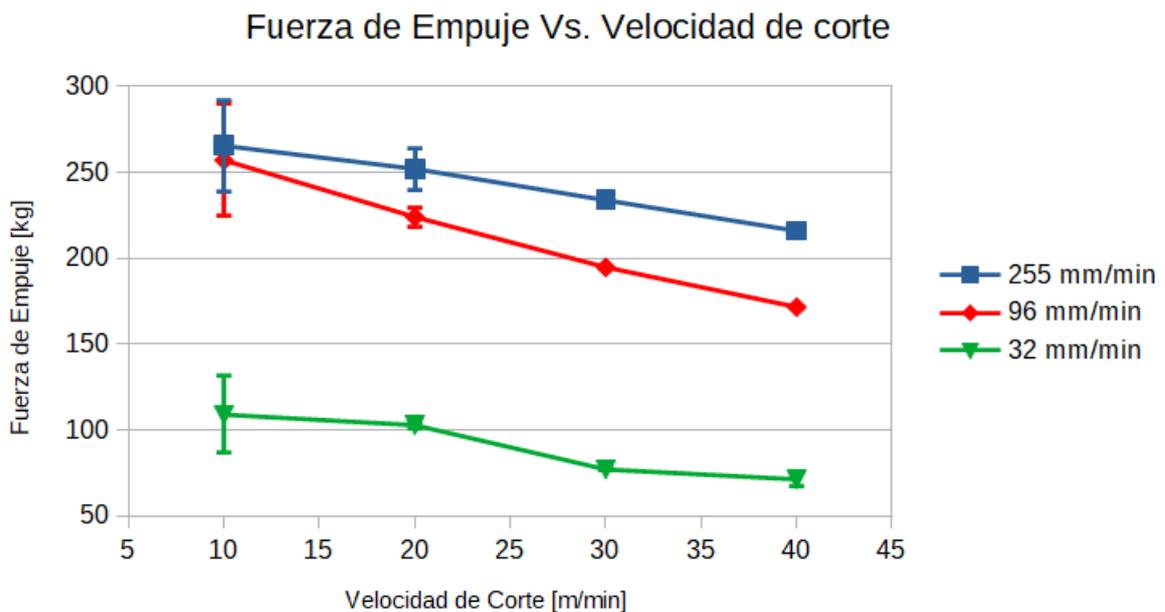


Fig. 41-b. Fuerza de Empuje frente a la velocidad de corte con velocidad de avance como parámetro.

En la figura 42-a se puede ver la evolución de la fuerza de empuje máxima con respecto al número de agujeros, llevados a cabo por tres series de ensayo con las condiciones experimentales de la Tabla 5. Se empleó una broca de 5 (mm.) y otra de 10 (mm.) de diámetro. Los valores de fuerza graficados corresponden a la máxima fuerza de

empuje desarrollada en cada agujero. En los grupos de ensayos con mayor número de agujeros se aprecia de forma más clara el fenómeno mediante la aproximación por curvas logarítmicas. Se deduce que la fuerza de empuje es creciente con tendencia hacia un valor constante. Pudo comprobarse el efecto proporcional en la fuerza de empuje al aumentar el diámetro de la herramienta o la velocidad de avance, debido al aumento de sección de la viruta sin cortar. Se evidenció el desgaste en las herramientas producto de la pérdida de capacidad de corte de los filos principales de las mismas, con lo cual, es necesaria una mayor fuerza para ejecutar el corte. La progresión del desgaste y el efecto térmico en las brocas se observa en las imágenes de la Fig. 42: b-c. El desgaste en brocas de HSS en el taladrado de PRFV fue investigado por Khashaba U.A. et al. [50] con la misma tendencia. Luego, la evolución de la fuerza de empuje en condiciones de estudio similares fue visto en [44, 46, 50, 51]. El efecto de la geometría de la broca fue visto por Sikiru et al. [53] en concordancia con numerosos investigadores mencionados en dicho trabajo.

Nro. de agujeros	Condición	Diámetro [mm]	Vc [m/min]	Avance [mm/rev]	Color de curva
16	nueva	5	27	0,05	verde
5	nueva	10	27	0,05	azul
11	5 aguj. Previos	10	27	0,1	roja

Tabla 5) Condiciones experimentales en la evolución de la fuerza de empuje.

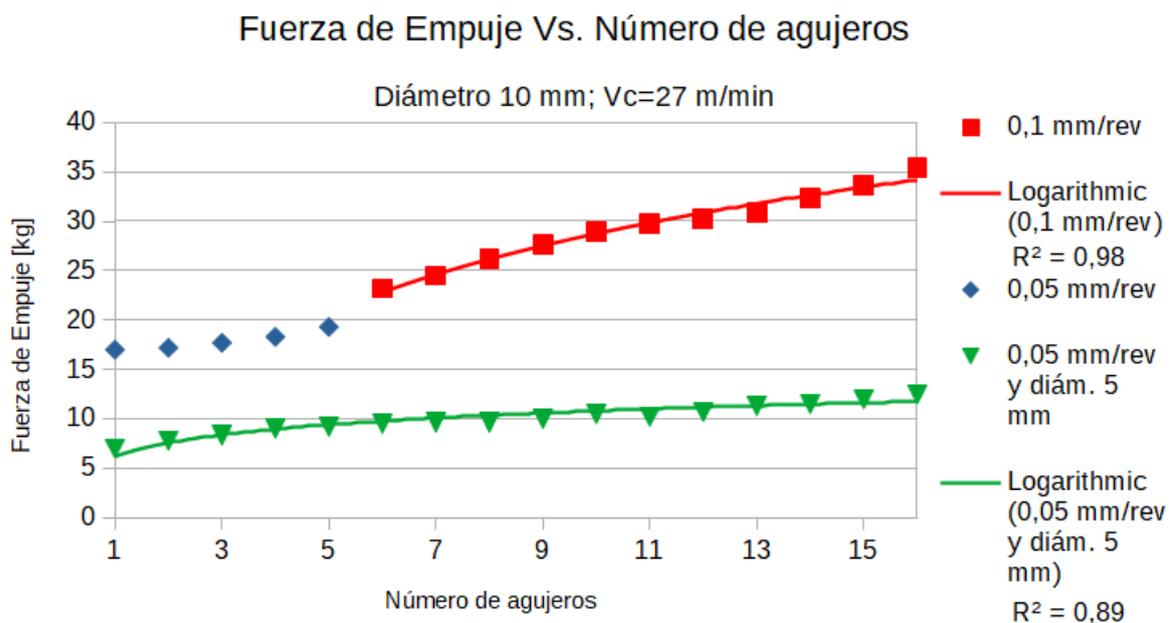


Fig. 42-a. Evolución de la fuerza de empuje con el aumento del número de agujeros.

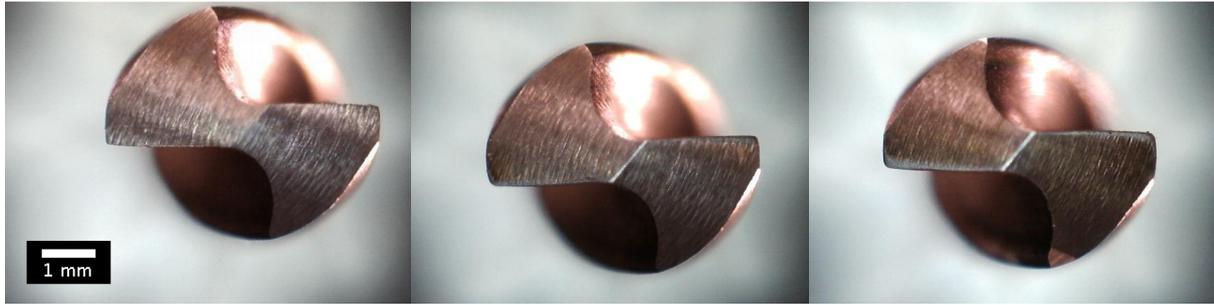


Fig. 42-b. Desgaste y efecto térmico en broca de 5 mm (curva verde figura 42-a).

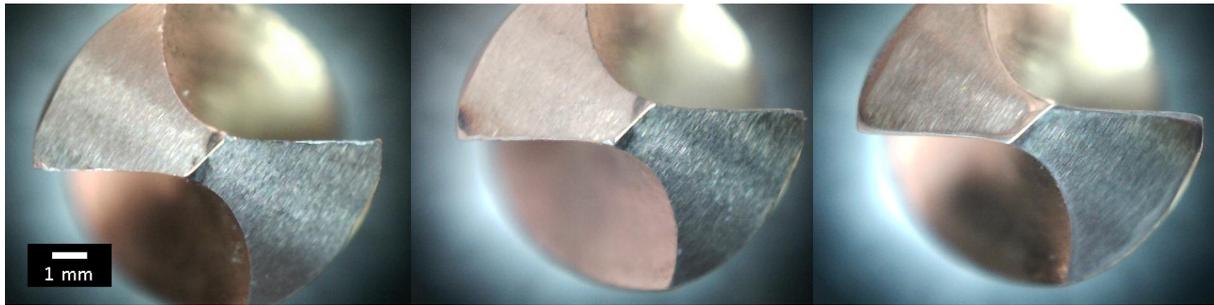


Fig. 42-c. Desgaste y efecto térmico en broca de 10 mm (curva azul y roja figura 42-a).

6-2-3-2 Integridad superficial

Los valores promedio de la delaminación sufrida en la zona de salida (Push-out) en función de la velocidad de avance se encuentran en la figura 43-a. Se puede apreciar una tendencia proporcional creciente entre las variables mencionadas. En el caso de la delaminación en la entrada (Peel-up) se apreció un comportamiento similar, pero con valores de daño significativamente menores rondando un 70% del valor de Push-out. Al emplear avances cada vez mayores, está demostrado que el daño inducido es del tipo impacto, postulado por Caprino G. et al [54]. El tipo de daño es distinguible y toma mayor relevancia ya que son nucleadas gran cantidad de fisuras interlaminares y existen zonas con alta densidad de micro-fisuras por la propia acción de corte, además de los defectos propios del PRF. El defecto tipo impacto es producido al emplear avances altos dando lugar al desarrollo de fuerzas de empuje elevadas y/o excesivas (ver Fig. 41-a) y que en forma conjunta con las fisuras existentes es promovido tanto el crecimiento como la nucleación de fisuras, causando el despegue de capas y consecuente separación de la matriz-refuerzo producto de la rotura de interfaces. Por otro lado, el daño inducido es más leve al ensayar avances cada vez más bajos debido al mayor tiempo de contacto y la generación de calor durante el corte. Como se mencionó previamente, altas temperaturas producen el ablandamiento de la matriz polimérica y una reducción de la fuerza de empuje, razón por la que la zona dañada es menor y abarca la intersección de la superficie cónica producida por los filos principales y la superficie cilíndrica del agujero maquinado. Puede denotarse una relación proporcional

existente entre la fuerza de empuje desarrollada y la delaminación, siendo conveniente la reducción de ambas variables, o lo que es lo mismo el avance empleado, para disminuir daños y defectos en la pieza maquinada. El fenómeno existente entre la delaminación y el avance empleado fue reportado en [40-55].

La figura 43-b muestra la delaminación sufrida en la zona de salida (Push-out) en función de la velocidad de corte. En este caso fue posible observar una tendencia a la reducción del daño con el aumento de la velocidad de corte. Nuevamente, la delaminación en la zona de entrada mostró un comportamiento similar (un 70% menor respecto a la zona de salida). La influencia del efecto térmico en el compuesto toma mayor relevancia al aumentar las rotaciones por minuto de la broca, producto de una mayor fricción. El aumento de temperatura promueve el ablandamiento de la matriz polimérica y la disminución de la fuerza de empuje necesaria para efectuar el corte (similar efecto en la Fig. 41-b). Dicho fenómeno entre la delaminación y la velocidad de corte es también observado en las investigaciones de otros autores [46-49].

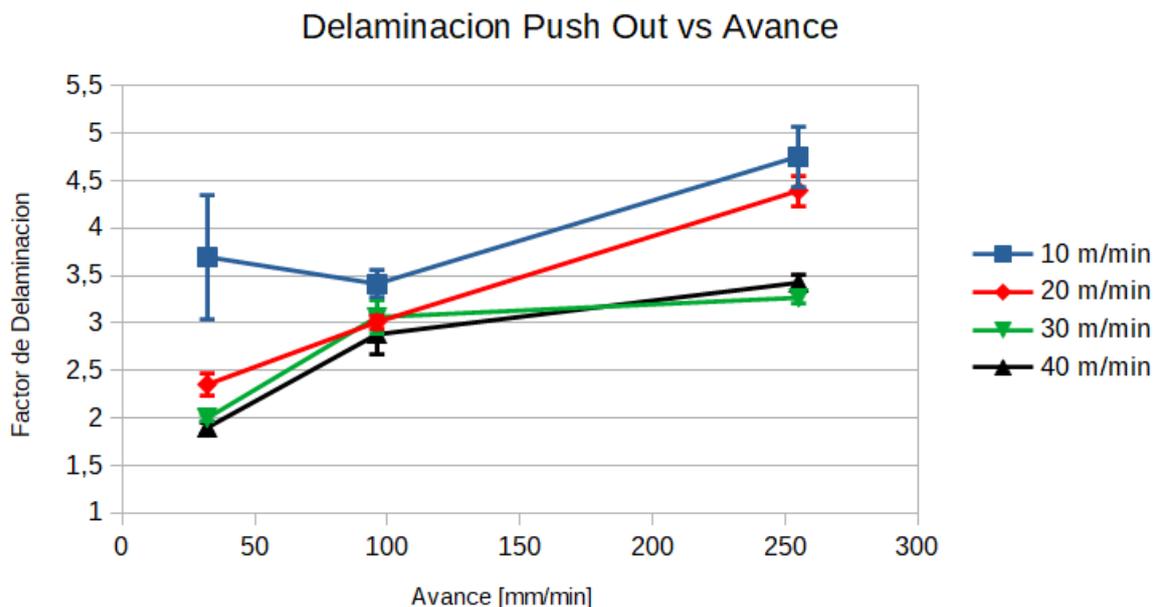


Fig. 43-a. Delaminación Push Out frente a la velocidad de avance con velocidades de corte como parámetro.

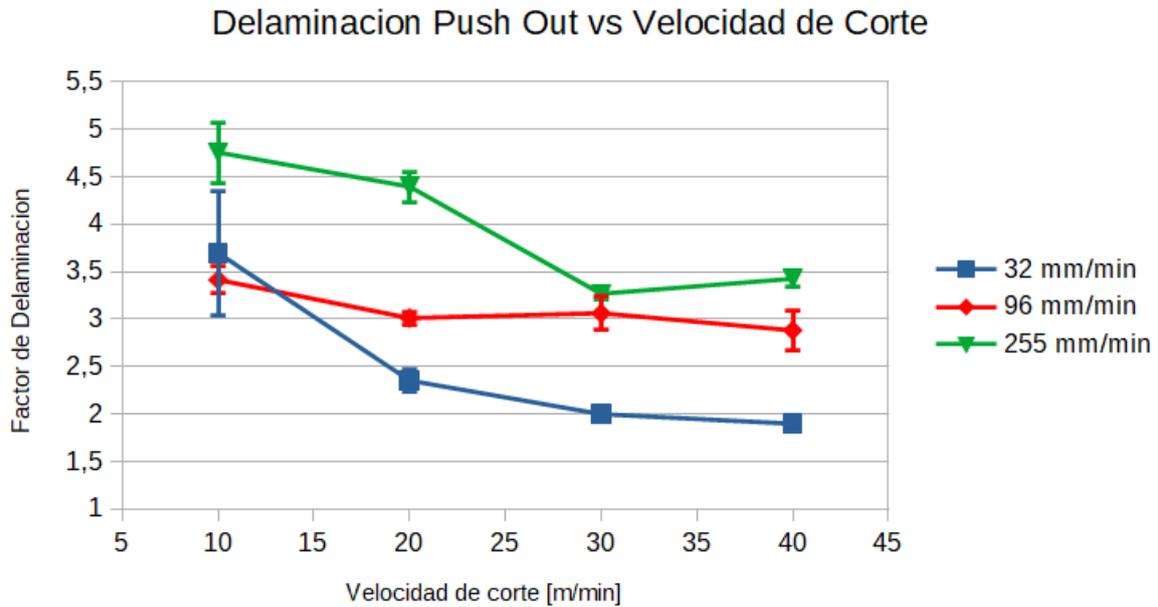


Fig. 43-b, Delaminación Push Out frente a la velocidad de corte con velocidad de avance como parámetro.

Con la finalidad de evaluar el comportamiento de la placa soporte diseñada, se emplearon condiciones de corte comparables con las utilizadas sin la placa soporte. Para lograr un parámetro de comparación, la unidad de medida de la velocidad de avance [mm/min] fue expresada en términos de tasa de avance [mm/rev], obteniendo la figura 44-a. En los ensayos con placa soporte fue empleada una broca de 5 y otra de 10 (mm.) de diámetro. La condición de ambas brocas fue desde nueva hasta usada. Se realizaron los ensayos con avance bajo en primer lugar, para luego pasar a un avance alto, según las condiciones de corte de la Tabla 6. Los resultados obtenidos con el empleo de la placa soporte pueden observarse en las Figs. 44: b-c. La mínima delaminación Push Out para velocidad de corte de 30 (m/min) y de avance de 0,05 (mm/rev) alcanzó un valor de 1,125 que implica una reducción de 50% con valores de 2,25 a 1,125, como se puede obtener de las Figs. 44: a-b. En caso de 30 (m/min) y 0,1 (mm/rev) se logra una reducción de 60% con valores de 3,125 a 1,25, como se deduce de las Figs. 44: a y c..

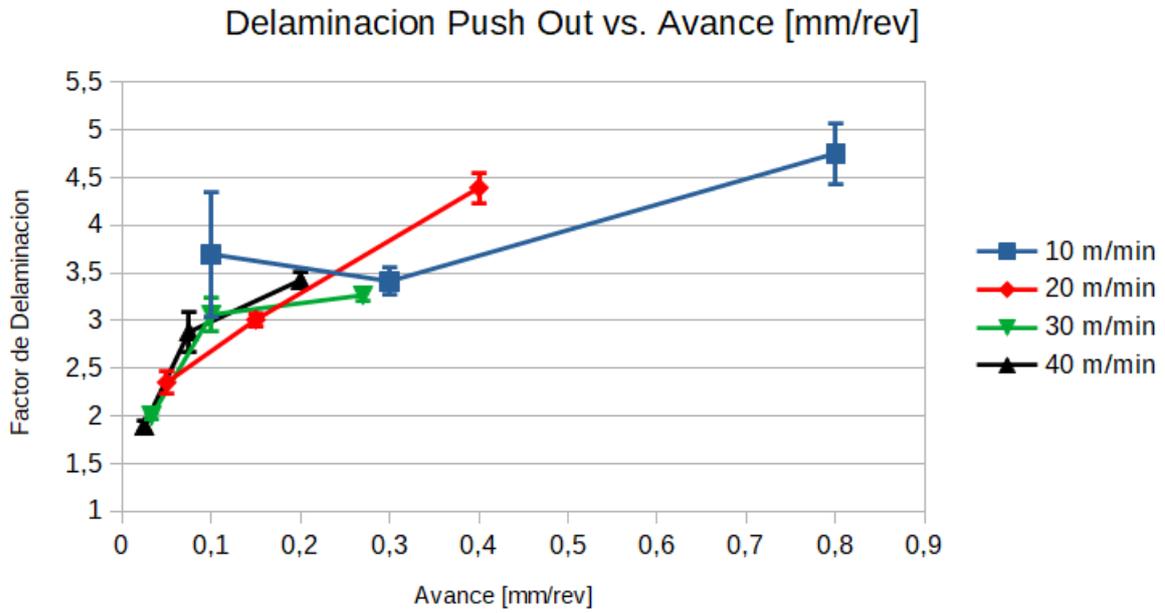


Fig. 44-a. Delaminación Push Out en función de la velocidad de avance (mm/rev) con velocidad de corte como parámetro.

Nro. de agujeros	Condición	Diámetro [mm]	Vc [m/min]	Avance [mm/rev]
5	nueva	5	27	0,05
5	nueva	10	27	0,05
5	usada	5	27	0,1
5	usada	10	27	0,1

Tabla 6. Condiciones de corte al emplear la placa soporte diseñada.

Broca con 5 y 10 (mm.) de diámetro. Con placa soporte

Vc=27 m/min; Va=0,05 mm/rev; Brocas nuevas

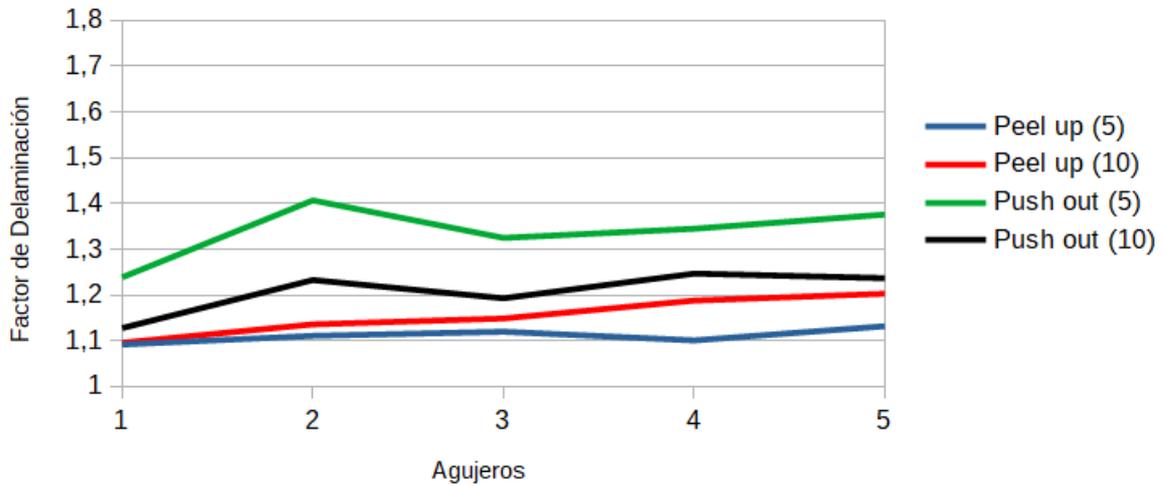


Fig. 44-b. Evolución de la delaminación con el número de agujeros para avance bajo.

Broca con 5 y 10 (mm.) de diámetro. Con placa soporte

Vc=27 m/min; Va=0,1 mm/rev; Brocas usadas

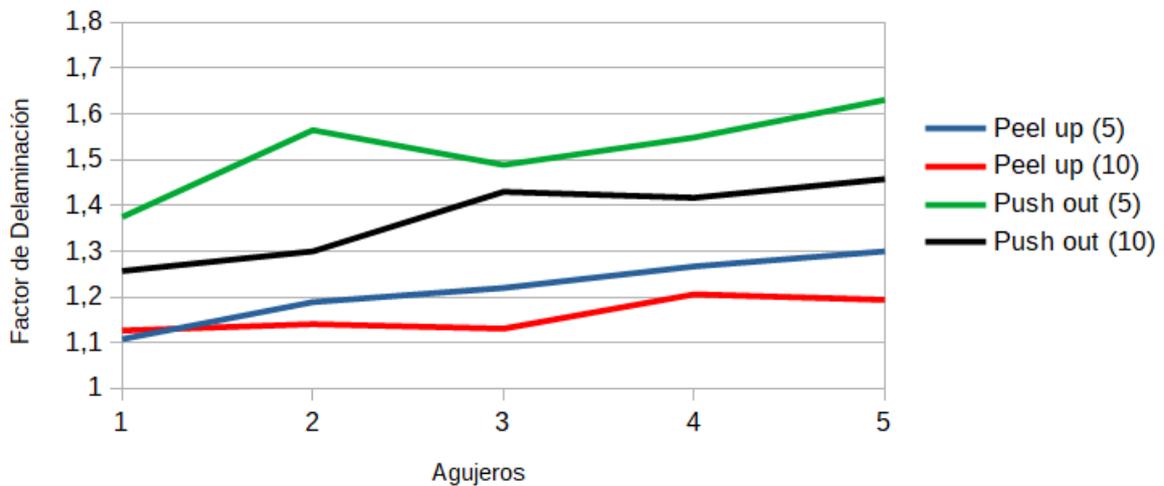


Fig. 44-c. Evolución de la delaminación con el numero de agujeros para avance alto.

6-2-3-3 Acabado superficial

Los valores promedio de rugosidad RMS obtenidos en los ensayos son graficados en relación a la velocidad de avance en la Fig. 45-a. Se deduce que el aumento del avance implica un comportamiento proporcional decreciente en la rugosidad RMS. Sucede que el empleo de avances altos solicita al PRF con un esfuerzo mayor a comparación al obtenido

con avances bajos, ver figura 41-a, por lo que el refuerzo probablemente falla debido a un estado tensional equivalente en el que es superada la resistencia de las fibras de vidrio. Asimismo, el empleo de avance alto produce el daño tipo impacto, con el cual, las fibras de vidrio son cortadas por la propagación de fisuras interlaminares generando una topografía lisa por tratarse de un material resistente y frágil. Observaciones similares fueron realizadas por Hocheng et al. [55] y Sikiru et al. [53], donde el aumento de la velocidad de deformación produce que el material falle de forma temprana, evidenciando un comportamiento frágil y su consecuente topografía más lisa con bajos valores de rugosidad. Por otro lado, el avance bajo implica un aumento del tiempo de contacto en la zona maquinada, evidenciado por perfiles de rugosidad con picos y valles cada vez más pronunciados. Tales picos y valles, hacen referencia Sikiru et al. [53], se deben a matriz quemada, porosidades o cavidades generadas en el corte, discontinuidades del compuesto, fibras despegadas o arrancadas; produciendo un notable aumento en la medición de rugosidad RMS. La presencia de material polimérico quemado y adherido en la punta de la broca en tono oscuro puede observarse en las Figs. 40:c-d.

En la figura 45-b puede observarse la rugosidad RMS con los valores promedio obtenidos en los ensayos en relación a la velocidad de corte. Se deduce un comportamiento proporcional creciente entre las variables mencionadas. El efecto térmico toma gran relevancia al emplear avance bajo y velocidad de corte alta. Como fue reportado por Sikiru et al, la presencia de picos y valles fue apreciable al emplear velocidades de corte cada vez mayores. El aumento de las rotaciones por minuto de la broca es proporcional a la temperatura desarrollada producto de la fricción entre las superficies en contacto, asistido por un bajo coeficiente de conductividad térmica del tubo PRFV. La investigación llevada a cabo por Sikuru et al, además destacó que una alta temperatura generada en el maquinado debilita a las fibras de vidrio y degrada la matriz. Dicha temperatura incentiva la aparición de fibras arrancadas, el ablandamiento de la matriz o despegues entre matriz/refuerzo producto del debilitamiento del ligante entre los constituyentes. Un similar comportamiento al del proyecto donde la rugosidad y la velocidad de corte resultan proporcionales decrecientes, se encuentra en concordancia a los estudios realizados por Dhiraj Kumar y K.K. Singh [51].

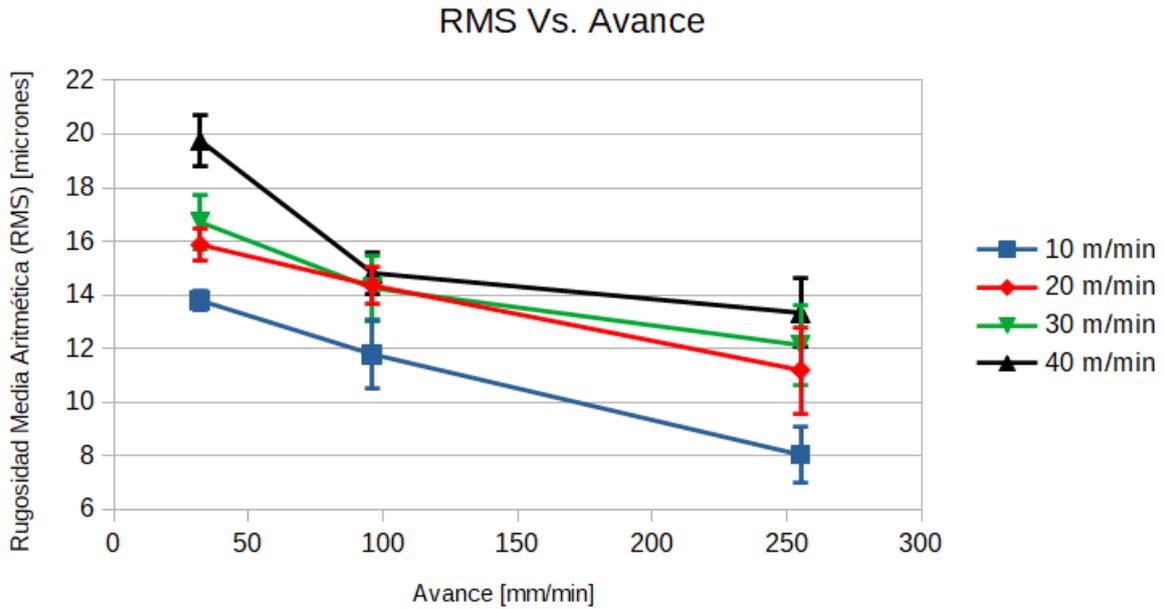


Fig. 45-a. Rugosidad RMS frente a la velocidad de avance con velocidades de corte como parámetros.

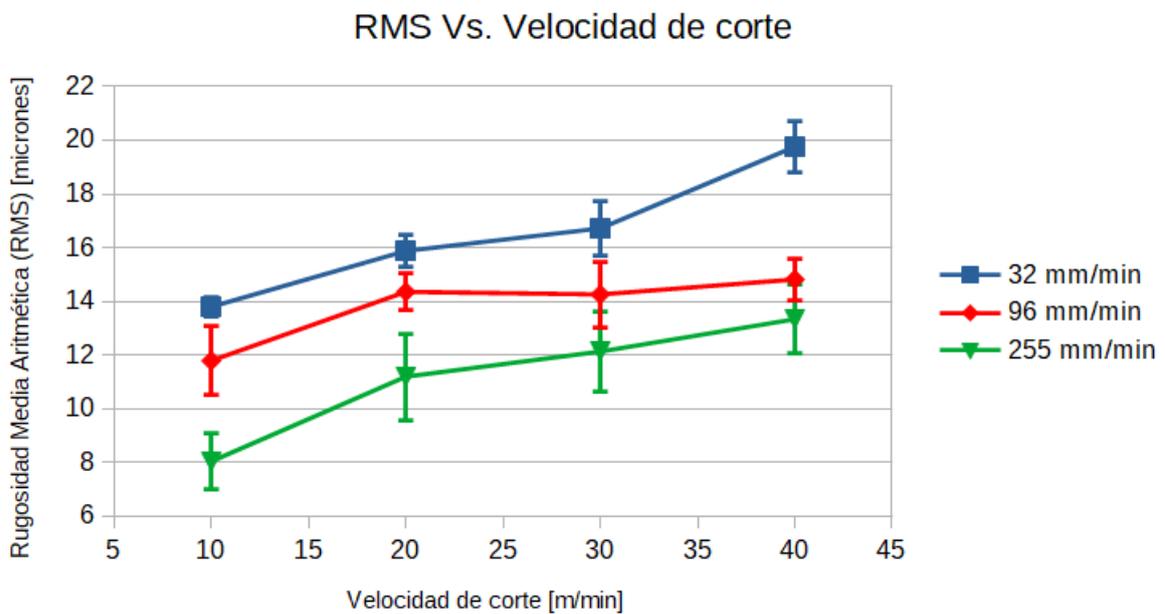


Fig. 45-b. Rugosidad RMS frente a la velocidad de corte con velocidades de avance como parámetros

A raíz de las mediciones de rugosidad RMS llevadas a cabo, se pudo apreciar y detectar su variación en función de la zona de medición, discriminando por grupos de valores en la zona de entrada y de salida con respecto al contacto herramienta-probeta (curvas de color azul y rojo, respectivamente) como se aprecia en la figura 46. Dado que el

desgaste de la herramienta a lo largo de los ensayos con broca de 10 (mm.) de diámetro es mínimo, se atribuye el efecto térmico como el fenómeno principal que trae cambios en la respuesta del sistema. Del análisis de la Fig. 46, se observa que los valores promedio de rugosidad RMS en la zona de entrada son prácticamente un 50% inferiores a los de la zona de salida. Más aún, el rango de valores obtenidos en la zona de entrada se vuelven comparables con los observados en la bibliografía consultada [12-14, 16, 24-27, 40-55].

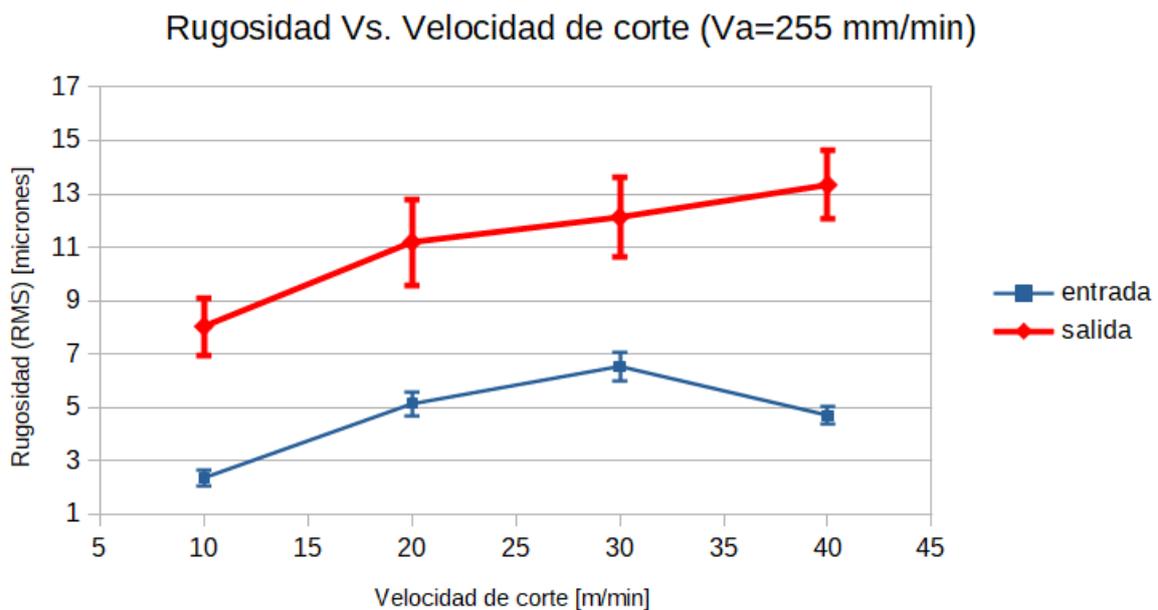


Fig. 46. Rugosidad RMS en zona de entrada y de salida con respecto al contacto entre herramienta-probeta.

6-2-4 Condición óptima

En el taladrado la calidad de la superficie generada es evaluada por el Factor de Delaminación y la rugosidad RMS. La delaminación adquiere un comportamiento proporcional decreciente con la velocidad de corte y proporcional creciente respecto de la velocidad de avance ensayada. Por otro lado, el aumento de la rugosidad RMS sucede cuando la magnitud de la velocidad de corte aumenta y al disminuir la magnitud de la velocidad de avance. Los parámetros de corte que minimizan el acabado y la integridad superficial dependen del tipo de producción buscado. Al priorizar el acabado superficial de la pieza maquinada sobre la integridad superficial (Fig. 47-a), el empleo de velocidad de avance alta con velocidad de corte baja implica alta productividad y buen acabado superficial. En caso que interese sólo la integridad superficial como en la Fig. 47-b, el

empleo de velocidad de corte alta con velocidad de avance baja establece un bajo nivel de producción con buena integridad superficial.

		Integridad superficial *	
Alto		↑↑↑	↑
Intermedio		↑↑	↑↑
Bajo		↑	↑↑↑
Magnitud		Velocidad de corte	Velocidad de avance

(*) La integridad superficial mejora de ↑ a ↑↑↑.

Fig. 47-a. Resultados de la integridad superficial en función de las variables de entrada.

		Acabado superficial *	
Alto		↑	↑↑↑
Intermedio		↑↑	↑↑
Bajo		↑↑↑	↑
Magnitud		Velocidad de corte	Velocidad de avance

(*) El acabado superficial mejora de ↑ a ↑↑↑.

Fig. 47-b, Resultados del acabado superficial en función de las variables de entrada.

7 - Conclusiones

Los objetivos particulares además de ser alcanzados, fueron superados al extender el análisis hacia la determinación de la influencia de los parámetros de corte específicos para cada ensayo de corte en referencia a las superficies producidas.

A través de la bibliografía consultada [12-55] se observó que el Acabado Superficial es la variable usualmente relevada cuando se practican operaciones en torno y la Integridad Superficial la variable principal en operaciones tipo taladrado.

En el proyecto se buscó la manera de informar tanto el acabado como la integridad superficial cuando en los trabajos científicos no es práctica habitual. Por tal motivo, se definió el parámetro "Daño inducido" en los ensayos de torneado. El desarrollo de la metodología empleada aporta una valiosa información para el estudio de la minimización de defectos y mejora del rendimiento en servicio de materiales compuestos. Así, la integridad superficial resultante se pudo evaluar mediante el factor de delaminación y el daño inducido para operaciones de torneado y taladrado respectivamente.

En ambos tipos de mecanizado se pudo corroborar el efecto negativo de la distancia maquinada frente al acabado e integridad superficial de los tubos PRFV. La distancia maquinada en el proyecto fue mucho mayor a la utilizada en otros trabajos experimentales [12-55] en los que no fue detectado un hallazgo similar. La mecánica del corte o el empleo de herramientas de corte con uno o dos filos no fueron los condicionantes de la variación del acabado e integridad superficial obtenida. El detrimento observado se atribuye al desgaste de las herramientas de corte y/o el efecto térmico desarrollados conforme el aumento de la distancia maquinada.

El empleo de la placa soporte diseñada permite una notable mejora en la calidad de los agujeros producidos sobre los tubos PRFV. La placa oficia como sustento en el entorno a las últimas capas por cortar, siendo recomendable su utilización. Puede lograrse una mejora del acabado superficial y de la producción al emplear alta velocidad de avance.

Como trabajo futuro se plantea la publicación de los resultados y la confección de un trabajo científico para realizar el aporte de las metodologías diseñadas para el ensayo de compuestos de geometría curva. Los mencionados aportes sirven de referencia para el desarrollo de trabajos futuros aún más complejos.

8 - Referencias bibliográficas

1. Moncada et al., 'Machinability of austempered ductile iron' AFS Trans. 106, 1991, 39–45.
2. Moncada et al., "Dimensional change in austempered ductile iron", 1996, AFS Transactions, V104, p577-580.
3. Echeverria et al., "Influence of the dimensional change, and its dispersion, on the fabrication size tolerances of ADI parts: comparison with SAE 4140 steel", 2001, ISIJ International, Vol. 41, pp. 25-30.
4. Sosa et al., "Machining heat treatment effects on distortion and residual stresses in an industrial application of ADI", 2004, Vol., pp. 1195-1200.
5. Sosa et al., "Analyses of stresses in ADI internal gears mounted with interference: Distortion and Residual stresses effects", Latin American Applied Research. Vol. 35, pp 241-246 (2005).
6. Sosa et al., "Residual stresses, distortion and surface roughness produced by grinding thin wall ductile iron plates" Int. Journal of Machine Tools Manufacture. Vol 47 (2), pp229-235, 2007.
7. Sosa et al., "Surface reactivity of thin wall ferritic ductile iron. The effect of nodule count and grinding variables", Materials Letters, 62 pp100-102, 2008.
8. Sosa A.D., and Echeverria M.D, "Surface alterations produced in grinding of Austempered Ductile Iron", Procedia Materials Science, Vol. 8, pp 155-161. 2015
9. Colombo et al., "Comportamiento mecánico de recubrimientos PVD depositados sobre ADI"; 16º Congreso SAM/CONAMET, Córdoba, Argentina, Nov.2016.
10. Colombo et al., "Correlación entre el daño superficial y las propiedades mecánicas a escala nanométrica de recubrimientos PVD depositados sobre ADI"; D.A. 16º Congreso SAM/CONAMET, Córdoba, Arg, Nov. 2016.
11. G. Fargas et al., "Influencia de la microestructura en el daño inducido por corrosión en los carburos cementados WC-Co", VI Congreso Nacional de Pulvimetalurgia y I Congreso Iberoamericano de Pulvimetalurgia, Ciudad Real, España, Junio 2017.
12. Paulo Davim J., "Machining: Fundamentals and Recent Advances".
13. M. Henerichs et al., "Machining of carbon fiber reinforced plastics: Influence of tool geometry and fiber orientation on the machining forces"
14. Sikiru Oluwarotimi Ismail et al., "Comprehensive study on machinability of sustainable and conventional fibre reinforced polymer composites"
15. M.F. Ashby, Y.J.M. Bre´chet., "Designing hybrid materials".
16. Sheikh-Ahmad, Jamal., "Machining of polymer composites".

17. Robert M. Jones., "Mechanics of Composite Materials, Second Edition".
18. Marita Reboredo., "Procesamiento polímeros reactivos y materiales compuestos".
19. Lina Riaño et al., "Effect of interphase region on the elastic behavior of unidirectional glassfiber/epoxy composites".
20. Hongyu Chen et al., "Thermal conductivity of polymer-based composites: Fundamentals and applications".
21. S. Kalpakjian and S. R. Schmid., "Manufactura, Ingeniería y Tecnología, 5ta Edición".
22. Área Metrología, FI UNMdP., "Tecnología mecánica I".
23. Sandvik Coromant Academy., "Tecnología del Corte del Metal: Libro de Formación".
24. Palanikumar, K. et al., "Influence of machining parameters on delamination in drilling of GFRP-armour steel sandwich composites".
25. D'Orazio, A. et al., "Tool wear and hole quality in drilling of CFRP/AA7075 stacks with DLC and nanocomposite TiAlN coated tools"
26. António T. Marques., "Delamination analysis of carbon fibre reinforced laminates: Evaluation of a special step drill".
27. Chen WC., "Some experimental investigations in the drilling of carbon fibre reinforced plastic (CFRP) composite laminates".
28. Ranjan Mahananda and Saurav Datta. "Optimization of Machining Performance Yields during Turning of GFRP Composites: A Grey based Taguchi Approach".
29. Santhanakrishnan, G., "High speed steel tool wear studies in machining of Glass-Fiber-Reinforced-Plastics".
30. Sivasankaran, S., "Effect of process parameters in surface roughness during turning of GFRP pipes using PCD insert tool".
31. Hari Vasudevan, "Grey Fuzzy Multiobjective Optimization of Process Parameters for CNC Turning of GFRP/Epoxy Composites".
32. Paulo Davim J. and Francisco Mata., "New machinability study of glass fibre reinforced plastics using polycrystalline diamond and cemented carbide (K15) tools"..
33. Shiv Sharma., "Fuzzy logic modeling and multiple performance optimization in turning GFRP composites using desirability function analysis".
34. Palanikumar, K. et al., "Optimizing the machining parameters for minimum surface roughness in turning of GFRP composites using design of experiments"
35. Ranjan Mahananda and Saurav Datta., "Optimization of Machining Performance Yields during Turning of GFRP Composites: A Grey based Taguchi Approach".
36. Vijaya, M. and Chincholkar, A.M., "Effect of machining parameters on surface roughness and material removal rate in finish turning of $\pm 30^\circ$ glass fibre reinforced polymer pipes".

37. Alessandra Caggiano., "Machining of Fibre Reinforced Plastic Composite Materials".
38. Sakuma K. and Seto M., "Tool wear in cutting glass-fiber-reinforced plastics (the relation between cutting temperature and tool wear)".
39. Palanikumar et. al., "Machinability of glass fiber reinforced plastic (GFRP) composite materials".
40. Singh I. et al., "Drilling of uni-directional glass fiber reinforced plastics: Experimental and finite element study".
41. Davim J. and Reis P., "Drilling carbon fiber reinforced plastics manufactured by autoclave – experimental and statistical study". *Mater Des* 2003;24:315–24.
42. Davim J., Reis P. and Antonio C.C., "Experimental study of drilling glass fiber reinforced plastics (GFRP) manufactured by hand lay-up". *Compos Sci Technol* 2004;64:289–97.
43. Sardinias R., Reis P. and Davim J., "Multi-objective optimization of cutting parameters for drilling laminate composite materials by using genetic algorithms". *Compos Sci Technol* 2006;66:3083–8.
44. Khashaba U.A., "Delamination in drilling GFR-thermoset composites". *Compos Struct* 2004;63:313–27.
- 45 Kilickap E., "Optimization of cutting parameters on delamination based on Taguchi method during drilling of GFRP composite". *Expert Syst Appli* 2010;37:6116–22.
46. Khashaba U.A., El-Sobaty I.A., Selmy AI, Megahed A.A., "Machinability analysis in drilling woven GFR/epoxy composites: part I – effect of machining parameters". *Composites: Part A* 2010;41:391–400.
47. Gaitonde V.N., Karnik S.R., Rubio C.J., Esteves C.A., Abrao A.M., Davim J., "Analysis of parametric influence on delamination in high-speed drilling of carbon fiber reinforced plastic composites". *J Mater Process Technol* 2008;203:431–8.
48. Rubio J.C., Abrao A.M., Faria P.E., Correia A.E., Davim J., "Effects of high speed in the drilling of glass fibre reinforced plastic: evaluation of delamination factor". *Int J Mach Tools Manuf* 2008;48:715–20.
49. Rawat S and Attia H., "Characterization of the dry high speed drilling process of woven composites using machinability maps approach". *CIRP Annals – Manuf Technol* 2009;58:105–8.
50. Khashaba U.A., El-Sobaty I.A., Selmy AI, Megahed A.A., "Machinability analysis in drilling woven GFR/epoxy composites: part II – effect of drill wear". *Composites: Part A* 2010;41:1130–7.

51. Dhiraj Kumar, K.K. Singh., "Experimental analysis of Delamination, Thrust Force and Surface Roughness on drilling of Glass Fibre Reinforced Polymer composites material using different drills".
52. Ramulu M., Branson T., Kim D., "A study on drilling of composite and titanium stacks".
53. Sikiru O.I., Hom N.D., Popov I., Beaugrand J., "Comprehensive study on machinability of sustainable and conventional fibre reinforced polymer composites".
54. Caprino G. et al. "Interpretation of size effect in orthogonal machining of composite materials. Part I: Unidirectional glass-fibre-reinforced plastics".
55. Hocheng H., Puw H.Y., "On drilling characteristics of fiber reinforced thermosets and thermoplastics".