



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID
ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Mecánica

Análisis del taladrado de fibra de carbono: Fuerzas de corte y delaminación

Autor:

Pastor de Frutos, Javier

Tutor: San Juan Blanco, Manuel

Dpto. Ingeniería de Procesos de Fabricación

Valladolid, Julio 2016



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

RESUMEN

El estudio de este proyecto tiene como fin el determinar los factores de mayor influencia en la operación de taladrado y su repercusión en el acabado final, pudiendo determinar además las condiciones óptimas para cada broca, su vida útil o limitaciones al mecanizar este material.

Se empearon dos tipos de brocas HSCO, variando las velocidades de corte (n_1 y n_2) y avances (f_n , f_+ y f_-), realizando una medición de la fuerza de empuje en cada taladrado mediante un dinamómetro Kistel 9124 y el software DasyLab.

La medición de la delaminación se realizó mediante un microscopio óptico y un posterior tratamiento de imágenes computarizadas con el software *Deltec Vision*. Dicha medida fue transformada en un factor de delaminación (F_d').

Se estudia el desgaste de la herramienta mediante la fuerza de empuje y se relaciona con el factor de delaminación.

PALABRAS CLAVE

Fibra de carbono

Fuerza de empuje

Delaminación

Factor de delaminación

Desgaste de herramienta



ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	4
1.2 Introducción	4
1.2 Antecedentes a la investigación.....	4
1.3 Motivación y objetivos	5
1.4 Aplicaciones	6
2. ESTADO DEL ARTE	8
2.1 Fibra de carbono.....	8
2.1.1 Introducción.....	8
2.1.2 Clasificaciones.....	8
2.1.3 El refuerzo (FC).....	11
2.1.4 La matriz	12
2.1.5 Propiedades generales	13
2.1.6 Maquinabilidad.....	14
2.1.7 Riesgos para la salud.....	15
2.2 El mecanizado: Taladrado.....	16
2.2.1 Velocidad de corte (V_c).....	17
2.2.2 Velocidad de rotación (n).....	17
2.2.3 Velocidad de avance (V_f).....	18
2.2.4 Otros parámetros	19
2.2.5 Fuerzas de corte.....	19
2.2.6 Fuerzas de corte en el taladrado	25
2.2.7 Potencia de corte	28
2.3 La herramienta: Broca helicoidal	31
2.3.1 Geometría de la broca helicoidal	31
2.3.2 Estado del filo:.....	34
2.4 Delaminación.....	35
2.4.1 Parámetros influyentes en la delaminación.....	35
2.4.2 Modelos de daño.....	37
2.4.3 Medida del daño por delaminación	39
3. REALIZACIÓN DEL ESTUDIO	41
3.1 Introducción	41



3.2 La cadena de medida.....	41
3.2.1 Características de las cadenas de medida	42
3.3 Elementos del ensayo	45
3.3.1 La fresadora	45
3.3.2. El dinamómetro	47
3.3.3 El estátor.....	50
3.3.4 El acondicionador de señal	50
3.3.5 Sistema de adquisición de datos	52
3.3.6 Tratamiento de datos mediante ordenador	53
3.3.7 Microscopio y procesamiento digital de imágenes	54
3.4 Metodología del ensayo	56
3.4.1 Herramientas.....	56
3.4.2 Material.....	57
3.4.3 Realización del ensayo	58
3.4.4 Adquisición de datos.....	60
3.4.5 Tratamiento de datos.....	63
3.5 Ensayos previos	66
3.5.1. Problemas detectados	67
4. RESULTADOS.....	72
4.1. Introducción	72
4.2. Fuerzas de corte: Resultados	73
4.2.1 Broca HSC05524 (800rpm).....	75
4.2.2 HSC05524 (3000rpm)	80
4.2.3 Broca HSC01261.....	85
4.3 Análisis de la fuerza de empuje.....	91
4.3.1 Comparativa entre series 1 Y 4 (V_{fn})	91
4.3.2 Comparativa entre series 2 Y 5 (V_{f+})	92
4.3.3 Comparativa entre series 3 Y 6 (V_{f-})	93
4.3.4 Comparativa global entre brocas y series	94
4.3.5 Desgaste de la herramienta	97
4.4 Análisis de delaminación	99
4.4.1 Factores de delaminación (F_d y F_d') en cada broca.....	102
4.4.2 Delaminación media entre brocas y series	105
4.5 Análisis Fuerza de empuje - Delaminación	109
4.5.1 HSC05524 (800rpm).....	109



4.5.2 HSC05524 (3000rpm)	110
4.5.3 HSC01261.....	111
4.5.4 Comparaciones entre brocas	111
5. CONCLUSIONES	113
5.1 Fuerzas de corte	113
5.2 Delaminación.....	114
5.3 Comparaciones globales.....	115
6. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	117
7. BIBLIOGRAFÍA.....	119

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.2 Introducción

Entre los procesos de mecanizado, el taladrado es de los más utilizados para posibilitar la unión de piezas mediante remaches o tornillos siendo, en el ámbito que nos ocupa -los materiales compuestos- de vital importancia puesto que los métodos de unión son limitados, siendo necesario un estudio del proceso en profundidad y más ahora que este tipo de materiales está en expansión en muy variados ámbitos; aumentando su producción, disminuyendo su precio y sustituyendo a otros materiales.

La perforación de polímeros reforzados con fibra de carbono, o simplemente fibra de carbono -FC- (así nos referiremos a este material en el proyecto), así como de la mayoría de materiales compuestos, presentan varios modelos de daño tales como delaminación, astillado, desconchado, fibras no cortadas, rugosidad superficial o errores dimensionales. En el caso de materiales reforzados con fibras, la delaminación es uno de los mayores inconvenientes que se nos presenta, pues su aparición es muy frecuente y perjudicial, originando mala tolerancia para el montaje, reduciendo la integridad estructural del material y originando una zona potencialmente expuesta al deterioro al ser sometida a diferentes esfuerzos, los cuales suelen ser frecuentes al tratarse de zonas de tornillería.

La fuerza de empuje se ha citado como causa principal de la delaminación en muchos estudios anteriores, por lo que en este proyecto se tratará de determinar la influencia que ejercen sobre esta fuerza el avance del mecanizado y el desgaste de la herramienta, para luego relacionarlo con un factor de delaminación. Los ensayos se realizarán sobre un composite laminado de resina epoxi reforzado con FC, empleando dos diferentes tipos de brocas (un total de tres brocas, dos de ellas iguales) con el fin de estudiar la influencia del desgaste de la herramienta y tratar de determinar unas condiciones de corte que ayuden a reducir el daño por delaminación para cada tipo de broca utilizada.

1.2 Antecedentes a la investigación

Podemos encontrar estudios similares en los que apoyarnos para seguir las técnicas y procedimientos que hayan dado buenos resultados anteriormente, buscando su perfeccionamiento. En dichos estudios, normalmente artículos científicos, se tratará de estudiar la influencia de uno o varios parámetros en la delaminación o daños producidos al mecanizar la FC, con el fin de determinar con

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

qué parámetros empleados se obtienen los mejores resultados, pudiendo afinar aún más dichos resultados en futuros estudios que partan de los anteriores.

Los parámetros o técnicas de taladrado, que es el tema que nos ocupa, pueden variar desde las condiciones de corte, brocas empleadas, material empleado, posicionamiento del material, etc. por lo que en cada estudio se varía uno o dos parámetros como mucho, o de lo contrario su correlación individual con el daño de mecanizado puede ser confusa e inexacta.

Se ha observado en sucesivos estudios que el valor del avance es uno de los principales condicionantes de las fuerzas de empuje y, por lo tanto, de la delaminación. Así pues nosotros disponemos de tres brocas para variar su avance (la velocidad de corte se varía entre brocas, siendo constante para cada una de ellas) y compararlo con la fuerza de empuje y delaminación, siguiendo los procedimientos de estudios similares anteriores pero realizados con otros tipos de brocas.

Por último, cabe mencionar nuestras brocas no son específicas para mecanizar la FC, por lo que el fabricante no ofrece información sobre las condiciones de corte para tal fin. Por ello nos apoyaremos en artículos anteriores que tratan la delaminación en el taladrado de FC con brocas convencionales (HSS y HSCO), en la que es común emplear para dichas brocas valores de avance y velocidades de corte pequeñas:

- Avances en torno a 0.05-0.15 mm/rev.
- Velocidades de corte en torno a 10-35 mm/min.

1.3 Motivación y objetivos

Actualmente nos encontramos en un momento de evolución de la demanda como del desarrollo del material que nos ocupa: La fibra de carbono (FC). Debido a las grandes ventajas que presenta respecto a los materiales más tradicionales a los que reemplaza, y a que su precio se reduce continuamente debido a que su producción se incrementa notablemente, su utilidad puede llegar a límites insospechados hoy en día.

Por ello, es de vital importancia el estudio de cómo trabajar con dicho material puesto que uno de los principales problemas que presenta es la dificultad de su mecanizado, debido a las formas diversas y complejas que se le quiere dar y a su comportamiento variable ante este tipo de operaciones, en nuestro caso, el taladrado. Además, la FC presenta dificultad para la unión mediante resinas, por lo que para cubrir la necesidad de montaje de elementos estructurales será necesario taladrar el material. Sin embargo, en el taladrado de FC se puede presentar una serie de problemas como las delaminaciones, degradación térmica, la pérdida de

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

calidad en el acabado superficial o el desgaste rápido y excesivo de la herramienta de corte.

Nos centraremos primeramente en el estudio de las fuerzas del taladrado en la FC con diferentes tipos de brocas y variando los parámetros de corte, obteniendo resultados que se procesaran en DasyLab, y posteriormente se analizarán tratando de determinar la influencia de cada parámetro en el resultado final.

El segundo objetivo será el estudio del problema de delaminación tras el taladrado, fenómeno a evitar en este tipo de material puesto que provoca repercusiones negativas en sus propiedades o limita sus utilidades. Su estudio es especialmente fundamental en el taladrado de láminas de carbono (necesario para su unión) donde se tratarán de escoger correctamente las técnicas adecuadas, mediante la elección de herramientas concretas y con condiciones de corte específicas.

Para finalizar el análisis de resultados, se relacionarán los datos de fuerza con los de delaminación para de esta manera investigar las posibles influencias que existan entre estas dos variables, posibilitando reducir el daño producido en un futuro.

Cabe mencionar que las brocas empleadas son estándar, de menor precio que las específicas para FC (5 veces más caras) y cuyos rendimientos para este tipo de material no son muy buenos. Sin embargo se tratará de estudiar si su uso podría ser rentable para casos en los que las tolerancias de los agujeros sean reducidas.

Por último, los posibles beneficios esperados serán: optimización de costes, reducción de daños o mejoras en el tiempo en la fabricación mediante una correcta elección de los parámetros de corte, obteniendo una serie de estrategias de mecanizado que superen a las ya existentes o simplemente se presenten como alternativas de las mismas.

Dichas estrategias se llevarán a cabo mediante diferentes métodos desarrollados en el presente proyecto con cada una de las brocas de ensayo para obtener valores cuantitativos comparables y poder así optar por la mejor elección.

1.4 Aplicaciones

Su uso está en alza, impulsado además por la reducción progresiva de su precio, y no solo en sectores industriales, sino que también se puede ver en el ámbito del deporte (ciclismo, tenis, Fórmula1, etc.). Su desarrollo está más presente en la industria aeronáutica, llegando a fabricar recientemente el avión comercial Boeing 787, el cual tiene un 50% de su peso estructural fabricado en materiales compuestos repartidos por todo el avión, siendo principalmente de FC.



1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Las demás industrias que emplean este material son la aeroespacial, naval (hélices), militar, ingeniería civil o automovilística. En esta última suscita un gran interés debido a la alta eficiencia y bajos costes que se podrían conseguir en un sector que mueve altísimas cantidades de dinero, existiendo alianzas millonarias entre automovilísticas y fabricantes de FC, estando a la cabeza el grupo BMW. Como curiosidad, mencionamos el caso muy llamativo de su uso en la fabricación de F1, los cuales pueden estar fabricados en un 80% de FC.

La principal función de la FC en cualquier sector mencionado, es aportar un reducido peso específico al conjunto estructural donde esté acoplada y soportar altos esfuerzos en la dirección de las fibras. De tal manera que dichos esfuerzos han de ser transmitidos por medio de las uniones entre la FC y el conjunto estructural, resaltando de nuevo la necesidad de que los taladros que posibilitan la unión se realicen dañando lo menos posible el material y evitar así que sean puntos potenciales de fallo.

Por lo tanto, si se logran uniones altamente fiables y un mecanizado sin demasiada dificultad y bajo coste, este material hoy en día no tiene competidor en cuanto a las características que nos ofrece, presentándose como alternativa para sustituir a muchos materiales de características funcionales similares (dependiendo de la aplicación) pero superadas prácticamente en su totalidad por la FC, tales como la fibra de vidrio, el aluminio, plásticos o varios tipos de aceros.

Es interesante mencionar que existe un gran problema antes de llegar al abaratamiento de la FC, y es que hasta el momento todavía existe un gran proteccionismo de los fabricantes para con la tecnología desarrollada. Como ya pasara con el aluminio, el excesivo celo en preservar las patentes y tecnologías desarrolladas para su fabricación y usos, ralentizan que la FC abarate sus costes a través de una colaboración a gran escala y se acabe implantado como uno de los materiales más empleados a nivel industrial.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1 Fibra de carbono

2.1.1 Introducción

La FC es un material compuesto desarrollado recientemente obtenido mediante la unión de fibras sintéticas con resinas (matriz), logrando materiales de baja densidad, muy resistentes y duraderos. Debido a ello, y a que su precio se va reduciendo poco a poco, este material está adquiriendo cada día más peso en aeronáutica, automoción, marina, deporte y aquellos campos donde prime la baja densidad y alta resistencia u otras de sus variadas y notables características.

Al igual que en la mayoría de materiales compuestos, su mecanizado presenta ciertas complicaciones debido a la no uniformidad del material, variando su maquinabilidad en función de la orientación del material. Ante dichas complicaciones trataremos de exponer y buscar la mejor solución posible en este estudio.

2.1.2 Clasificaciones

La FC pertenece a un grupo de materiales denominados composites y dentro de éstos, pertenece a la familia de materiales compuestos reforzados con fibras, que engloban a todos aquellos que estén constituidos por fibras (ya sean continuas o discontinuas) encargadas de soportar las cargas y una matriz con las funciones de mantener la estructura unida y de transmitir los esfuerzos a las fibras.

Existen gran variedad de combinaciones fibra-matriz que crean dicha sinergia que les hace más eficientes, como es el claro ejemplo del hormigón armado; sin embargo podemos poner otros ejemplos que guardan más similitud con la FC como son la unión de matriz polimérica con: fibra de vidrio, fibras cerámicas, fibras metálicas, fibras de boro, etc. De esta manera, se obtienen diferentes materiales de características variadas, pero siendo la FC la que mejores características generales presenta así como un mayor coste.

En nuestro estudio solo tratamos la FC, por lo que nos centraremos únicamente en su clasificación.

2.1.2.1 Atendiendo a sus propiedades mecánicas pueden clasificarse en:

- Ultra alto módulo (UHM) con un módulo elasticidad superior a los 500 GPa.

2. ESTADO DEL ARTE

- Alto módulo (HM) con módulo de elasticidad superior a 300 GPa y relación resistencia a la tracción/módulo de tensión menor del 1%.
- Alta fuerza (HT) con valores de resistencia a la tensión superiores a 3 GPa y relaciones resistencia a la tracción/módulo de 0.015-20.
- Módulo intermedio (IM) con un módulo de tensión superior a 300 Gpa y relación de resistencia a la tracción/módulo del orden de 0.01.
- Bajo módulo, con estructura isótropa, valores bajos del módulo de elasticidad y de resistencia a la tensión.

2.1.2.2 Atendiendo a la disposición de fibras: Laminados

Los laminados se forman a partir del apilamiento de láminas, cada una de las cuales, es una capa de resina de pequeño espesor reforzada con fibras. Existen dos tipos de láminas: de cinta o de tejido, que forman diferentes tipos de laminados. La principal característica de las láminas de cinta es que todas las fibras se encuentran orientadas en una única dirección y que presentan una isotropía transversal (misma propiedades en direcciones perpendiculares a la fibra).

A la hora de taladrar los laminados, nos encontraremos con dificultades para penetrar limpiamente, pues la fuerza axial empuja las láminas aún por taladrar hacia abajo, separándolas de las ya taladradas.

- Los laminados unidireccionales se forman al apilar láminas de cinta, donde las fibras se encuentran orientadas en la misma dirección (Figura 2.1).

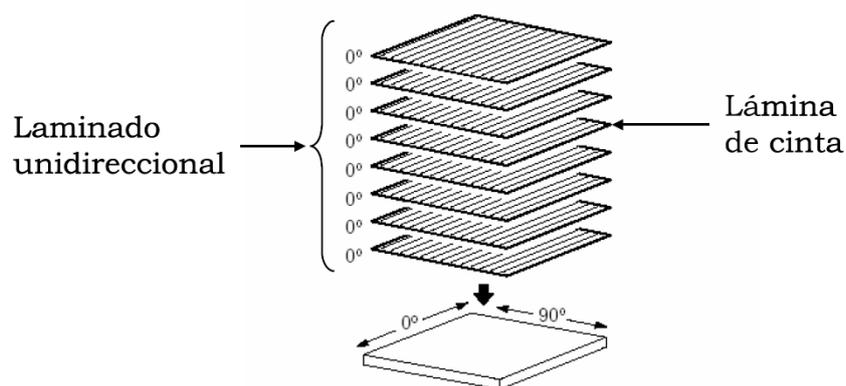


Figura 2.1. Laminado unidireccional. Fuente: www.hexcel.com.

- Los laminados 0°-90° (Figura 2.2) se fabrican a partir del apilamiento de láminas de cinta en dos direcciones ortogonales, cuya principal característica es su comportamiento ortótropo.

2. ESTADO DEL ARTE

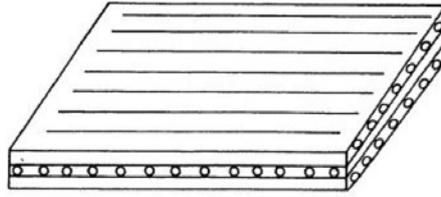


Figura 2.2. Laminado ortótropo. Fuente: www.hexcel.com.

- Los laminados cuasi-isótropos están fabricados a partir del apilamiento de láminas de cinta que encuentran orientadas en diferentes direcciones (0° , 90° y $\pm 45^\circ$). Sus propiedades son aproximadamente las mismas en todas las direcciones, debido a las diferentes orientaciones en cada lámina. En la Figura 2.3 se muestra un ejemplo de una configuración cuasi-isótropa que presenta la secuencia de apilamiento $[0^\circ, 90^\circ, \pm 45^\circ]$.

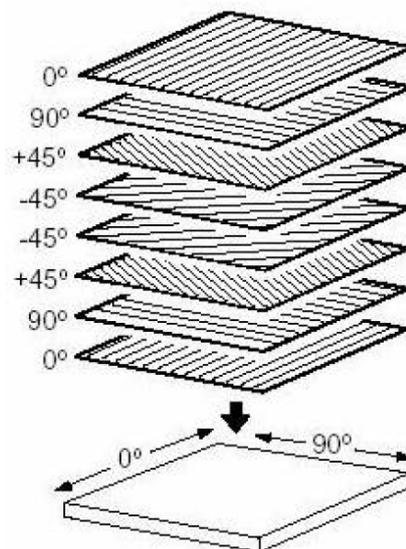


Figura 2.3. Ejemplo de un laminado cuasi-isótropo. Fuente: www.hexcel.com.

- Los laminados de tejido se fabrican a partir del apilamiento de láminas de tipo tejido, las cuales pueden ser de varias configuraciones, pero con un factor en común: la orientación de las fibras se realiza en dos direcciones, perpendiculares entre sí, siguiendo una determinada secuencia de enlazado. Si en cada dirección existe el 50 % de fibra se habla de un tejido equilibrado, también llamado tafetán, cuya principal característica es la uniformidad en las propiedades mecánicas en las direcciones 0° y 90° . Esta configuración es la más utilizada. En la Figura 2.4 se muestra una lámina de tejido de tipo tafetán y otros tipos de configuraciones.

2. ESTADO DEL ARTE

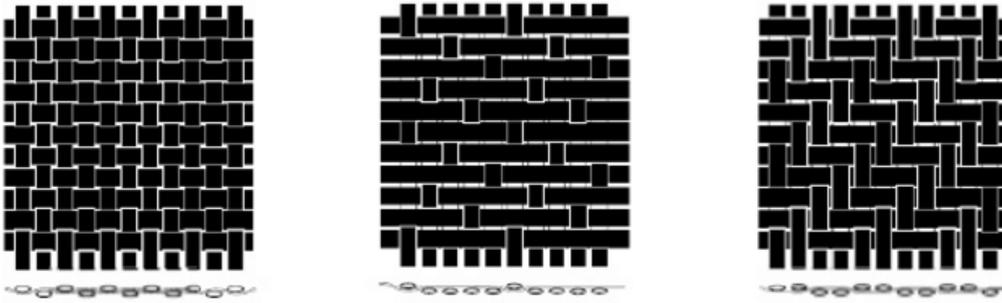


Figura 2.4. Lámina de tejido (Tafetán, Stain y Twill).

Fuente: www.hexcel.com.

2.1.2.3 Atendiendo a la longitud de la fibra:

- Debido a las partes menos eficaces de los extremos de las fibras, la tensión media en una fibra discontinua será menor que la tensión media que se podría lograr con una fibra continua. El valor medio de la tensión depende de la distribución de tensión en los extremos de las fibras y de la longitud de la fibra, lo cual se puede observar en la Figura 2.5.
- El caso más particular es el de segmentos de fibras distribuidas de forma aleatoria por la matriz obteniéndose un comportamiento isótropo pero no tan resistente como el de fibra continua. El módulo elástico aumentará cuanto mayor sea la concentración en volumen de fibras en la matriz. En este caso el problema de separación de láminas que existía en el taladrado de laminados desaparece pues la composición es uniforme; sin embargo también se producirá delaminación.

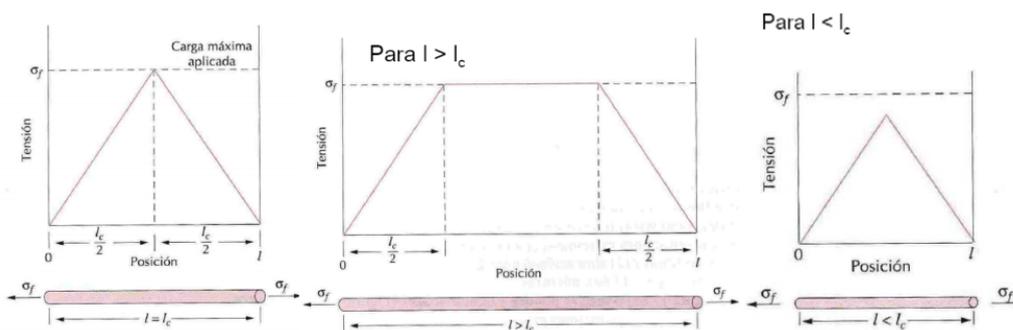


Figura 2.5. Distribución de la tensión de tracción en fibras cortas.

Fuente: www.hexcel.com.

2.1.3 El refuerzo (FC)

La fibra tiene el único cometido de soportar todas las cargas que tienen lugar en la dirección de la misma, por lo que es de vital importancia su correcta orientación en el caso de que presente un comportamiento anisótropo, según su disposición de las fibras (expuesto anteriormente).

2. ESTADO DEL ARTE

Aunque existe una gran variedad de fibras de carbono basadas en los distintos precursores, procesos químicos y tecnológicos, su obtención se realiza siempre mediante el proceso de pirólisis (normalmente de poliacrilonitrilo (PAN)), que consiste en inducir cambios químicos mediante temperatura. Consta de las siguientes etapas:

- 1º: Hilado formado por miles de fibras (diámetro de milésimas de milímetro) a partir de una disolución o fundido. Dichas fibras están compuestas por cadenas de cristales de carbono.
- 2ª Estabilización de las fibras hiladas mediante peroxidación o estabilización térmica, para evitar que la fibra se funda en el posterior proceso de carbonización.
- 3º Carbonización en atmosfera inerte (entre 1200°C y 1400°C) o grafiticación (hasta 3000°C). Con la carbonización se obtiene una pureza en carbono del 80-90%, mientras que con la grafiticación es mayor al 99% (a mayor % en C, mayor módulo elástico).

Posteriormente se puede tratar la fibra de diversas formas para obtener propiedades específicas como pueden ser tratamientos térmicos adicionales (mejorar prestaciones o conductividad) o tratamientos superficiales para mejorar la adhesión a la matriz.

2.1.4 La matriz

La elección de la matriz tiene una repercusión importante en las características finales puesto que sus funciones principales son:

- Transferir las cargas a las fibras y dar estabilidad ante deformaciones.
- Aísla y protege las fibras ante deterioro mecánico o ambiental.
- Evita propagación de grietas.

El principal problema que presentan es, que al ser plásticos, están limitados a determinadas temperaturas a las cuales el plástico fundirá inutilizando al completo el material.

Se puede emplear tres tipos de plástico como matriz:

- Termoestables: Son los más empleados (alrededor del 75%) debido a que presentan las mejores características mecánicas y una baja viscosidad que facilita la fabricación. Son plásticos que necesitan un curado mediante temperatura o catalizadores que la endurecen, imposibilitando su reciclado. Los más comunes en la FC son las denominadas matrices epoxi.
- Termoplásticos: Estos plásticos presentan la ventaja de ablandarse con la temperatura y reciclar repetidas veces, así como una alta resistencia al impacto

2. ESTADO DEL ARTE

- Elastómeros: Su uso se reduce a situaciones en las que sea necesario cierta elasticidad del material.

A continuación se nombran algunas resinas de diferentes propiedades que se emplean como matriz:

- Epoxis: Son las de uso más general para altas prestaciones (termoestables), limitadas a temperaturas superiores a 170°C. Presentan muy buenas prestaciones de resistencia a tracción (en caliente o húmedo) del material compuesto y de dureza. Tienen buena adherencia a muchos sustratos, son especialmente resistentes a los ataques y poseen una baja contracción durante la polimerización, permitiendo moldeos de alta calidad con buena tolerancia dimensional. En la Tabla 2.1 se pueden observar sus propiedades generales de este tipo de resinas.
- Bismaleimidias (BMI): Estabilidad frente altas temperaturas (hasta 250°C).
- Poliamidas: Estos polímeros son capaces de soportar hasta 300°C.
- Fenólicas: Resistencia al fuego y a altas temperaturas.
- Poliésteres: Uso reducido debido a bajas prestaciones mecánicas y problemas en la fabricación.
- Cianoésteres: Utilizados en aplicaciones radioeléctricas, pues presentan características adecuadas (baja absorción de humedad).

MAGNITUD (UNIDADES)	VALOR
Densidad (Kg/m ³)	1100 - 1400
Módulo de Young (MPa)	3000 - 6000
Relación de Poisson	0.38 - 0.4
Resistencia a la tracción (MPa)	35 - 100
Resistencia a la compresión (MPa)	100 - 200
Alargamiento de rotura a tracción (%)	1 - 6
Conductibilidad térmica (W/m°C)	0.1
Coefficiente de dilatación térmica (x 10 ⁻⁶ /°C)	60
Temperatura de distorsión por calor (°C)	50 - 300
Contracción de curado (%)	1 - 2
Absorción de agua de 24 h a 20°C (%)	0.1 - 0.4

Tabla 2.1 Propiedades generales para la resina epoxi. [MIRAVETE, 2003].

2.1.5 Propiedades generales

- Baja densidad (1.75 Kg/m³), lo que implica que sus propiedades mecánicas por unidad de peso sean muy elevadas. Su resistencia es casi 3 veces superior a la del acero, y su densidad es 4.5 veces menor.

2. ESTADO DEL ARTE

- Alta resistencia y rigidez específica (El módulo de elasticidad es elevado y depende del tipo de fibra escogida pudiendo variar entre 250 y algo más de 500GPa).
- Estabilidad dimensional, pues presenta bajo coeficiente de dilatación térmica y alta resistencia a la abrasión.
- Estabilidad química y biológica, puesto la resina actúa de aislante.
- Elevada resistencia a la corrosión.
- Alta conductividad eléctrica y baja conductividad térmica.
- Fácil de pintar o recubrir con otros productos para mejorar o modificar su apariencia.
- Buena resistencia al impacto.
- Alta resistencia a fatiga.
- Gran reactividad en atmósfera oxidante cuando se sobrepasan los 400-500°C.
- Alargamientos menores al 2%.

2.1.6 Maquinabilidad

Una de las características negativas que presenta la FC en su mecanizado es su gran carácter abrasivo que conlleva un rápido desgaste de la herramienta, lo cual repercutirá todavía más negativamente en el corte debido a que si el filo de la arista de corte no está correctamente afilado, romperá (en vez de cortar) las fibras de carbono, produciendo un mal acabado denominado astillamiento. También tiene el inconveniente de la delaminación (se desarrollará más adelante).

Es muy importante un correcto ajuste del avance y velocidad de corte con el fin de evitar un excesivo roce de la herramienta y al mismo tiempo evitando que se produzcan roturas de fibras.

En el caso de la FC, la vida de la herramienta es proporcional a las condiciones de corte (como viene siendo habitual) y a la concentración de fibra/matriz (mayor cantidad de fibra demanda un mayor mecanizado y mayor desgaste). Existe el riesgo de rotura de la broca en mecanizados profundos debido a que la viruta que genera es en forma de polvo, complicando su extracción si no se tienen geometrías de herramienta adecuada.

Por último, mencionar que existen herramientas especiales para el mecanizado de composites aunque en el caso de la FC es posible el uso de brocas comunes, como las utilizadas en nuestros ensayos. Uno de los tipos de broca más empleado es la “broca phi”, la cual está fabricada con materiales duros y con aristas de corte largas, propiciando que el material se pretensione antes de cortarlo, obteniendo así un corte más limpio.



2. ESTADO DEL ARTE

2.1.7 Riesgos para la salud

Las fibras de carbono tienen por norma general un tamaño de seis micrómetros de diámetro, haciéndolas respirables una vez cortadas (polvo) y por ello es necesario tomar ciertas medidas de seguridad al trabajar con este material. De no ser controladas, estas fibras microscópicas producen un riesgo potencial para la salud ya que generan irritación en la piel y en las membranas y mucosas del sistema respiratorio.

También cabe mencionar que la mayoría de fibra tiene una capa exterior de resina epoxi que además causa irritación química. Muchos de los disolventes utilizados en los procesos son volátiles, inflamables e irritantes para la piel y los ojos.

Este riesgo potencial tiene lugar cuando se maneja de continuo FC, siendo necesario protección con mascarillas de filtros, guantes, gafas y extractores que aspiren la viruta en forma de polvo. Nuestro ensayo dura escasamente 30 min y empleamos un extractor, por lo que no es estrictamente necesario tomar más medidas de seguridad.

2.2 El mecanizado: Taladrado

El taladrado es un proceso de fabricación de arranque de viruta de los más empleados en la industria y consiste en la realización de un agujero cilíndrico por medio de una broca y mediante la combinación de dos movimientos; uno rotativo y otro lineal (la forma más normal de trabajar es que la broca posea ambos movimientos). Su principal utilidad es la de posibilitar la unión de dos o más componentes mediante uniones atornilladas y concretamente para la FC será un proceso muy recurrido, puesto que su unión mediante resinas epoxi presenta dificultades debido a la alta conductividad (rápidos enfriamientos) de las fibras, pudiendo originar alabeos o delaminaciones causadas por la liberación de la energía elástica almacenada en las fibras al perder la matriz sus propiedades mecánicas, dando lugar a uniones poco fiables si no se toman las medidas necesarias (enfriamientos controlados, aplicación de tensiones, etc.).

En el taladrado, el diámetro y la longitud del agujero a realizar influirán bastante en la dificultad para realizar el proceso, como en la evacuación de la viruta. En nuestros ensayos emplearemos material de espesores y diámetros pequeños, por lo que no desarrollaremos dichas dificultades.

Al ser una operación tan habitual, los estudios realizados son abundantes y exhaustivos, tratando las siguientes características del proceso:

- Reducción del coste económico: Aumentar durabilidad de la herramienta y disminución de la potencia consumida.
- Reducción de tiempos: Mayor productividad.
- Mejorar la calidad.

Estos objetivos se consiguen mediante el estudio de las fuerzas de corte (el proceso del corte similar al torneado o fresado) las cuales varían en función de los parámetros de corte y de la herramienta empleada y por ello, nuestros ensayos estarán orientados en esa línea, considerando las siguientes características del corte:

- Velocidad de corte.
- Velocidad de avance.
- Velocidad de giro.
- Tipo de broca y diámetro de la misma.
- Profundidad del agujero.
- Refrigeración.
- Sistema de fijación.
- Potencia de la máquina.

2. ESTADO DEL ARTE

A continuación se describen los parámetros más relevantes que controlaremos directa o indirectamente en nuestro estudio para obtener las conclusiones pertinentes.

2.2.1 Velocidad de corte (V_c)

Para el taladrado, es determinada por la velocidad periférica de la broca y su valor se puede calcular fácilmente, conociendo el valor del diámetro de la herramienta y de la velocidad rotativa del husillo. Su valor es fundamental a la hora de estudiar las fuerzas de corte y por ello, es un factor muy influyente en la herramienta (durabilidad) y en los tiempos de corte.

La velocidad de corte (m/min) se define como:

$$V_c = \frac{\pi \cdot D_c \cdot n}{1000}$$

- D_c (mm): Diámetro de corte (periférico).
- n (rad/min): Velocidad de rotación de la herramienta.
- 1/1000: Para pasar de “mm” a “m”.

De tal manera que la V_c será constante en el filo del cuerpo de la broca pero en el filo del labio su valor disminuye a medida que nos acerquemos a eje de la misma, teniendo diferentes valores de las fuerzas de corte.

Respecto a las herramientas, es común que los fabricantes ofrezcan información de la durabilidad de la herramienta cuando trabaja con una velocidad de corte óptima (dada por el fabricante), suponiendo que dicha herramienta se emplea para mecanizar los materiales apropiados para la misma. Así mismo existen factores de correlación (no lineales) que relacionan la vida útil de la herramienta con la velocidad de corte a la que trabaja. El no trabajar con la velocidad de corte óptima puede verse traducido en:

Velocidades de corte excesivas	Velocidades de corte insuficientes
Calidad final deficiente	Rotura de herramienta
Rápido desgaste del filo	Mala evacuación de viruta
Deformación del filo (Pérdida de tolerancia)	Mayores costes

Tabla 2.2. Repercusiones de la variación de V_c .

2.2.2 Velocidad de rotación (n)

La velocidad de rotación es la que posee husillo y por tanto la herramienta. Su valor se expresa comúnmente en “rpm” y puede variar en pequeños saltos cuando la

2. ESTADO DEL ARTE

máquina posee una caja de cambios que determina dichos saltos o en el caso de máquinas más modernas (CNC) que emplean variadores de frecuencia y un sistema de realimentación, puede estar contenido dentro de un rango de valores limitado por las características de la máquina.

Si reordenamos los términos de la ecuación de velocidad de corte, podemos expresar la velocidad de rotación (rev/min) como:

$$n = \frac{1000 \cdot V_c}{\pi \cdot D_c}$$

2.2.3 Velocidad de avance (V_f)

La velocidad de avance o avance de penetración se define como el avance de la herramienta en relación con la pieza o viceversa, expresado en unidades de longitud por unidad de tiempo (normalmente mm/min) es decir, es el tiempo que tarda en mecanizar una longitud determinada. Su valor está limitado por la potencia máxima de la máquina y determinará el espesor de la viruta obtenida.

$$V_f (mm/min) = \frac{\text{longitud a mecanizar}}{\text{tiempo de mecanizado}}$$

Su valor se calcula mediante el parámetro **avance por revolución (f)**, el cual viene expresado en mm/rev (determina la longitud recorrida por la herramienta en cada revolución) y depende principalmente del diámetro de la broca. Al igual que ocurría en la velocidad de giro, los valores que toma puede ir dado saltos pequeños o estar contenidos en un rango.

$$V_f (mm/min) = n (rpm) \cdot f (mm/rev)$$

A la hora de determinar el valor del avance por revolución disponemos de un rango de valores a utilizar (obtenidos experimentalmente) recomendado por el fabricante, existiendo rangos diferentes para diferentes brocas, materiales o acabados finales. El no utilizar valores dentro de los rangos, puede dar lugar a (manteniendo “n” cte.):

Avances altos	Avances bajos
Menor fricción (menor desgaste de herramienta pero puede romper)	Mayor fricción (Desgaste acelerado de la herramienta)
Disminución de tiempos	Aumenta tiempos de trabajo
Buen control de la viruta (corta)	Viruta más larga y delgada
Peor acabado	Mejora el acabado
Mayores fuerzas de corte (mayor potencia requerida)	Menores fuerzas de corte (principalmente de empuje)

Tabla 2.3. Repercusiones de la variación de f.

2. ESTADO DEL ARTE

2.2.4 Otros parámetros

- **Tiempo de corte:** De la expresión del avance se puede obtener el tiempo de mecanizado, al cual habría que sumar el tiempo de retroceso de la herramienta, cuyo avance puede ser mayor que el empleado al mecanizar, quedado:

$$\text{Tiempo total (s)} = \left(\frac{\text{longitud a mecanizar (mm)}}{V_f(\text{mm/min})} + \text{tiempo de retroceso (min)} \right) \cdot \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}}$$

- **Ancho de corte (a_p):** Es la mitad de la diferencia entre el diámetro previo a mecanizar “d” (si lo hubiera) y el obtenido con la mecanización “D”. Viene a ser el ancho de la viruta y se suele expresar en “mm”.

$$a_p = \frac{D - d}{2}$$

Cuanto mayor sea su valor, menor será el control dimensional pero aumenta el volumen mecanizado (disminución de tiempos)

- **Avance por filo (f_z):** (en mm/filo) espesor de material arrancado por unidad de filo. Por lo tanto se puede expresar, siendo Z el número de filos de la broca, como:

$$f_z = \frac{f}{Z} \quad A = a_p \cdot f_z$$

- **Área de viruta (mm^2):** Área de material arrancado.

$$A = a_p \cdot f_z$$

2.2.5 Fuerzas de corte

2.2.5.1 Introducción:

Las fuerzas producidas en el corte son de gran utilidad para conocer el comportamiento de los materiales, determinar el tipo de herramienta a utilizar y evaluar la potencia necesaria de la máquina. Por todo ello, su estudio es fundamental y existen varios métodos de hacerlo que simplifican el proceso y arrojan valores estimados. Nosotros emplearemos un dinamómetro para su determinación directa y real, pero es importante conocer los fundamentos básicos de las fuerzas de corte que desarrollaremos a continuación.

El proceso del corte tiene lugar debido a las tensiones originadas por las fuerzas producidas por la incidencia de la herramienta sobre la pieza. Dichas tensiones

2. ESTADO DEL ARTE

generan una deformación plástica tal que logra romper el material en una zona determinada, originando gran cantidad de calor. Las deformaciones que se observan se pueden clasificar en tres zonas (Figura 2.6):

- *Zona primaria:* Es la correspondiente al plano de cizallamiento, el cual se desarrolla a continuación.
- *Zona secundaria:* Es la zona del material ya cortado (viruta) pero que aún sigue en contacto con la herramienta (fricción).
- *Zona terciaria:* Zona pequeña de la pieza donde incide la herramienta (fricción) que aún almacena ciertas tensiones del corte y que libera instantes después, produciéndose una retracción elástica.

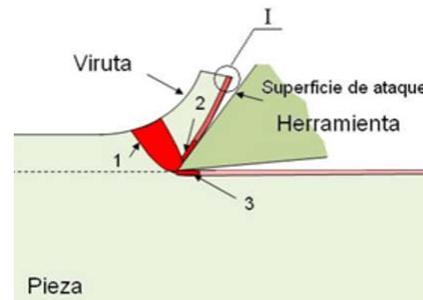


Figura 2.6. Zonas de deformación. [RODRÍGUEZ-MOLINER, 2010].

En el mecanizado podemos descomponer de forma general la fuerza de corte como se observa en la Figura 2.7:

- *Fuerza tangencial:* cuyo vector tiene la misma dirección que la velocidad de corte y suele ser la de mayor valor.
- *Fuerza axial:* Es aquella que se aplica en la misma dirección que el avance.
- *Fuerza radial:* Dirigida en la dirección perpendicular a la línea central de la pieza a trabajar. En el caso del taladrado, la fuerza radial tiene valores mínimos, siendo nula en el caso ideal, por lo que se podrá despreciar.



Figura 2.7. Fuerzas de corte [SANDVIK, 1994].

2.2.5.2 Fuerzas de corte simplificadas. Corte ortogonal:

Si estudiamos el problema plano (corte ortogonal), dando lugar a un estudio idealizado en el que una herramienta de corte se mueve (en la figura 2.8 hacia la izquierda) a lo largo de una pieza de trabajo a una velocidad constante y a una profundidad determinada, la fuerza resultante se puede descomponer en **tres sistemas diferentes** formando todos los vectores una circunferencia de diámetro “F resultante” (Figura 2.8):

- En los ejes Y-Z se descompone en:
 - Fuerza de corte (tangencial): F_t ó F_c
 - Fuerza de empuje o normal: F_n
- Según la dirección de la cara de desprendimiento. Dependientes del ángulo de desprendimiento “ γ ”:
 - Fuerza de fricción: F_γ
 - Fuerza normal a ésta: $F_{\gamma n}$
- Según la dirección del plano de cizallamiento. Dependientes del ángulo de cizallamiento “ Φ ”:

2. ESTADO DEL ARTE

- Fuerza de cizallamiento: F_s
- Fuerza normal a ésta: F_{sn}

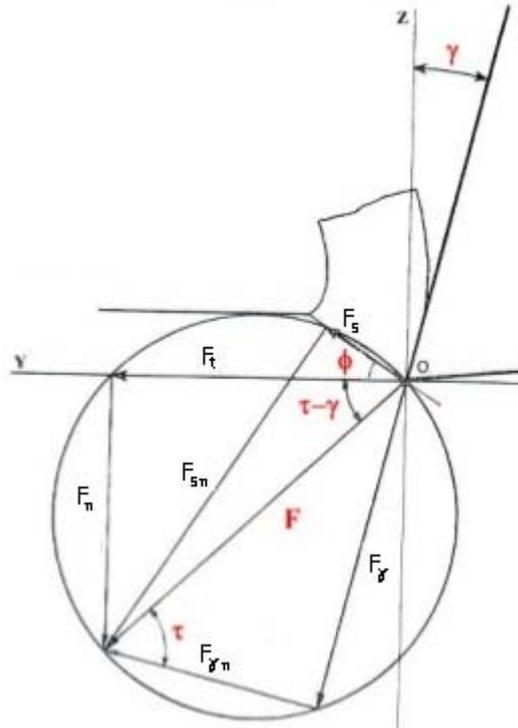


Figura 2.8. Descomposición de fuerzas en modelo bidimensional. [MICHELETTI, 1980].

Introduciendo los conceptos de tensión dinámica de cizallamiento (τ_s), que actúa a lo largo de la superficie de cizallamiento, y área de cizallamiento (A_s):

$$A_s = \frac{A}{\sin \Phi}$$

$$F_s = A_s \cdot \tau_s$$

y aplicando trigonometría, obtenemos las expresiones de las fuerzas tangencial y normal:

$$F_t = A \cdot \tau_s \cdot \frac{\cos (\tau - \gamma)}{\sin \Phi \cdot \cos(\Phi + \tau - \gamma)}$$

$$F_n = A \cdot \tau_s \cdot \frac{\sin (\tau - \gamma)}{\sin \Phi \cdot \cos(\Phi + \tau - \gamma)}$$

Existe otra descomposición a mayores en la que aparece la denominada **Fuerza de presión (F_p)** (Figura 2.9), que agrupa las fuerzas que aparecen tanto en el filo como en el flanco de la herramienta y no incluye las correspondientes a la extracción de la viruta. Mediante esta relación, se explica el aumento de la fuerza específica de

2. ESTADO DEL ARTE

corte (fuerza para remover un volumen específico de material) cuanto menor sea el espesor de la viruta, puesto que la contribución de la fuerza de presión a la fuerza total de corte será mayor.

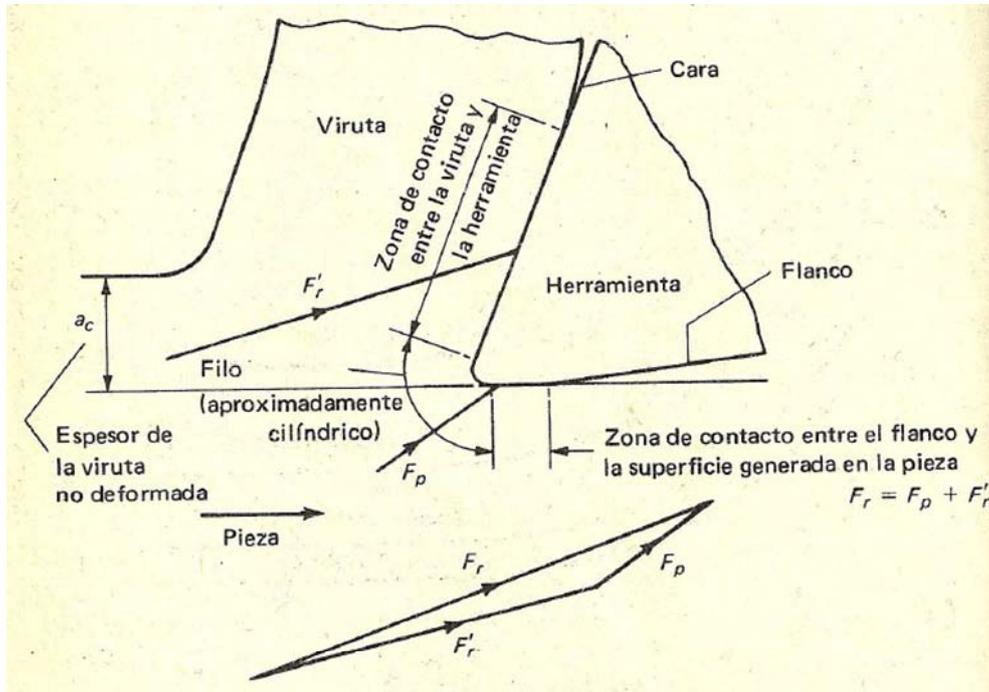


Figura 2.9. Fuerza de presión, Contacto de la herramienta. [BOOTHROYD, 1988].

- F_r : Fuerza resultante sobre la herramienta
- F'_r : Fuerza requerida para remover la viruta.
- F_p : Fuerza de presión. Actúa sobre el filo y zona de contacto entre el flanco y la superficie generada. Se supone constante.

2.2.5.3 Ángulos del corte (Figura 2.9 y 2.10):

- **Ángulo de desprendimiento (γ):** Determina la posición de la herramienta con la salida de la viruta, pudiendo ser positivo (sentido contrario al avance de la herramienta) o negativo. Normalmente son positivos y cuanto mayor sea, menor será el rozamiento pero mayor el desgaste de la herramienta. En el taladrado dicho ángulo lo determina el filo principal.
- **Ángulo de incidencia (α)** (Figura 2.10): Es el ángulo con el que la herramienta ataca al material (siempre positivo). Evita el roce del talón de la herramienta con la cara mecanizada (después del arranque del material, la parte de la pieza liberada de la presión de la herramienta tendrá cierta recuperación elástica).
- **Ángulo de fricción (τ):** La relación de F_y y F_{yn} es el **coeficiente de fricción (μ)** herramienta-viruta y se puede calcular aplicando trigonometría:

2. ESTADO DEL ARTE

$$\mu = \frac{F_\gamma}{F_{\gamma n}} = \frac{F_n + F_t \cdot \tan \gamma}{F_t - F_n \cdot \tan \gamma} = \tan \tau$$

- **Ángulo de cortadura o cizallamiento (Φ):** Ángulo formado por un plano horizontal y el plano en el cual tiene lugar la deformación de material por el efecto cortante que produce la herramienta y su consiguiente generación de calor. Su valor condicionará los valores de potencia, fuerza de corte, espesor de la viruta y calor generado. Para determinarlo se recurre a modelización numérica, pero también se pueden emplear métodos clásicos que ofrecen una aproximación de su valor. Los más conocidos son:
 - Teoría de Ernst y Merchant [BOOTHROYD, 1988]: Considera el plano de cizallamiento como plano de máximo esfuerzo cortante y que además está orientado de forma que el trabajo absorbido sea mínimo. Suponiendo condiciones apropiadas de corte, la ecuación se reduce a:

$$2\Phi + \tau - \gamma = \frac{\pi}{2}$$

- Teoría de Lee y Shaffer [BOOTHROYD, 1988]: Aplica teorías plásticas y al igual que Ernst, considera al plano de cizallamiento como plano de máximo esfuerzo cortante. Se considera que las tensiones herramienta-viruta son constantes.

$$\Phi + \tau - \gamma = \frac{\pi}{4}$$

- Resultados experimentales: La relación de ángulos es lineal, al igual que en las anteriores teorías, pero los valores reales que obtenemos para diferentes materiales suelen alejarse considerablemente de estas teorías debido a las simplificaciones de los métodos como al hecho de despreciar la fuerza de empuje. Por ello actualmente se recurre a la simulación por ordenador.
- **Ángulo de posición de filo principal (κ_r):** Determina el ángulo de la punta de la broca.

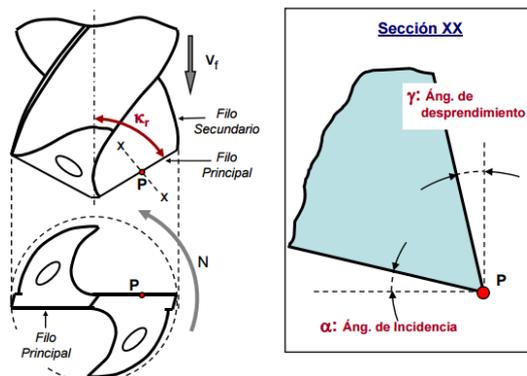


Figura 2.10. Ángulos de la herramienta [SANDVIK, 1994].

2. ESTADO DEL ARTE

La conclusión más importante que se puede obtener es que, aumentando el ángulo de desprendimiento (γ), siempre obtendremos un aumento del ángulo de cizalladura y, por consiguiente, una disminución de las fuerzas de corte (menores deformaciones plásticas del material). El problema reside en que al aumentar el ángulo de desprendimiento la fricción herramienta-viruta aumenta, dando lugar a un mayor calentamiento de la herramienta y a un desgaste más acusado. Por lo tanto, el ángulo de desprendimiento tendrá un valor óptimo en un punto en el cual la herramienta tenga una temperatura límite capaz de soportar y unas fuerzas de corte correspondientes. En ocasiones es favorable que dicho ángulo sea negativo (mayores fuerzas de corte).

Respecto al ángulo de incidencia (α), si es grande, la herramienta puede fracturar su punta debido a las altas fuerzas de corte y, cuanto más pequeño sea, mayor desgaste sufrirá la punta, aumentando las pérdidas por rozamiento de la herramienta con la superficie de la pieza.

2.2.5.4 Velocidades de corte:

- *Velocidad de corte (V_c):* Velocidad relativa herramienta-pieza.

$$V_c = \frac{\pi \cdot D_c \cdot n}{1000}$$

- *Velocidad de deslizamiento (V_s):* Velocidad relativa de la viruta con respecto a la pieza.

$$V_s = \frac{\cos \gamma}{\cos(\Phi - \gamma)} \cdot V_c$$

- *Velocidad relativa de viruta (V_v):* Velocidad relativa de la viruta con respecto a la herramienta, dirigida a lo largo de la cara de ésta.

$$V_v = \frac{\sin \Phi}{\cos(\Phi - \gamma)} \cdot V_c$$

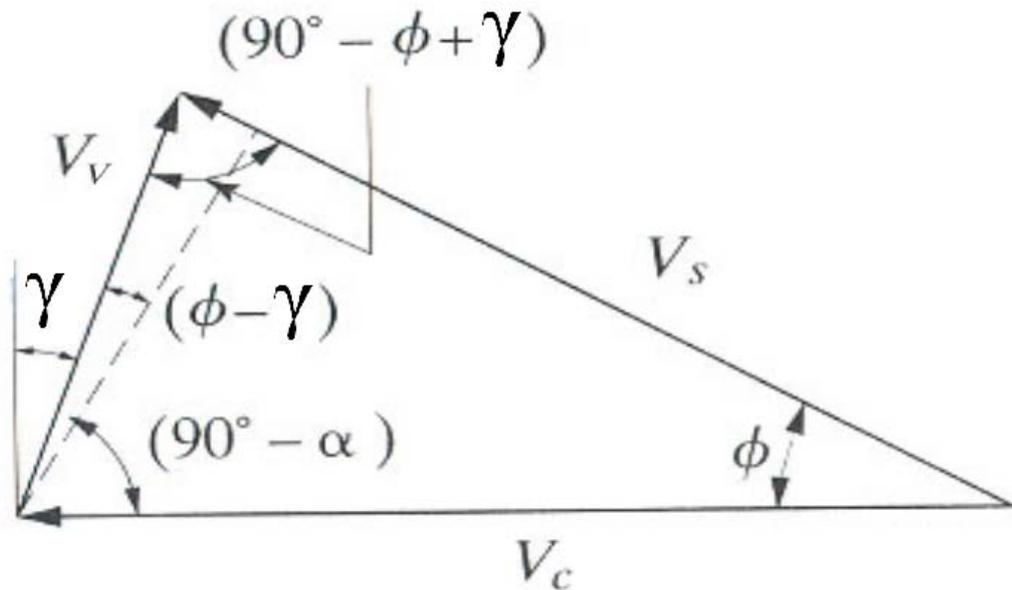


Figura 2.11. Triángulo de velocidades en la zona de corte. [MICHELETTI, 1980].

2.2.6 Fuerzas de corte en el taladrado

2.2.6.1 Método teórico

En el taladrado podemos diferenciar tres fuerzas meramente de corte (sobre los filos):

- Fuerzas sobre el filo para el arranque de viruta.
- Fuerzas sobre el filo transversal.
- Fuerzas debidas al rozamiento dorsal.

Las principales fuerzas son las debidas al arranque de viruta y las podemos descomponer en dos direcciones normales al plano de corte como observamos en la Figura 2.12, donde se supone que las fuerzas de corte se aplican en el punto medio de los filos principales:

- *Fuerzas en el plano horizontal (F_t ó F_c):* Aparece la denominada fuerza de corte. Para su cálculo aplicaremos los resultados obtenidos en el estudio del corte ortogonal; sin embargo, en el taladrado, la velocidad de corte tiene distintos valores en función del punto de filo considerado (máxima en la periferia y mínima en el centro), por lo que el ángulo de cizallamiento no es constante y se estimará su valor medio (Φ_m) [MICHELETTI, 1980]. Por el mismo motivo, el ángulo de desprendimiento variará y se considerará un valor medio: γ_m . Dicho lo cual, la expresión de la fuerza tangencial del problema plano nos quedará [MICHELETTI, 1980]:

2. ESTADO DEL ARTE

$$F_t = A \cdot \tau_s \cdot \frac{\cos(\tau - \gamma_m)}{\sin \Phi \cdot \cos(\Phi_m + \tau - \gamma_m)}$$

y en el caso del taladrado:

$$A = \frac{d - d_0}{2} \cdot \frac{f}{2}$$

donde “d” es el diámetro de la broca, “d₀” es espesor del núcleo central (fillo transversal) y “f” el avance por revolución.

A esta fuerza habría que sumarle el valor de F_t' debida a la componente tangencial de la fuerza de rozamiento dorsal, cuyo valor es pequeño y se puede estimar en función de las dimensiones de la broca.

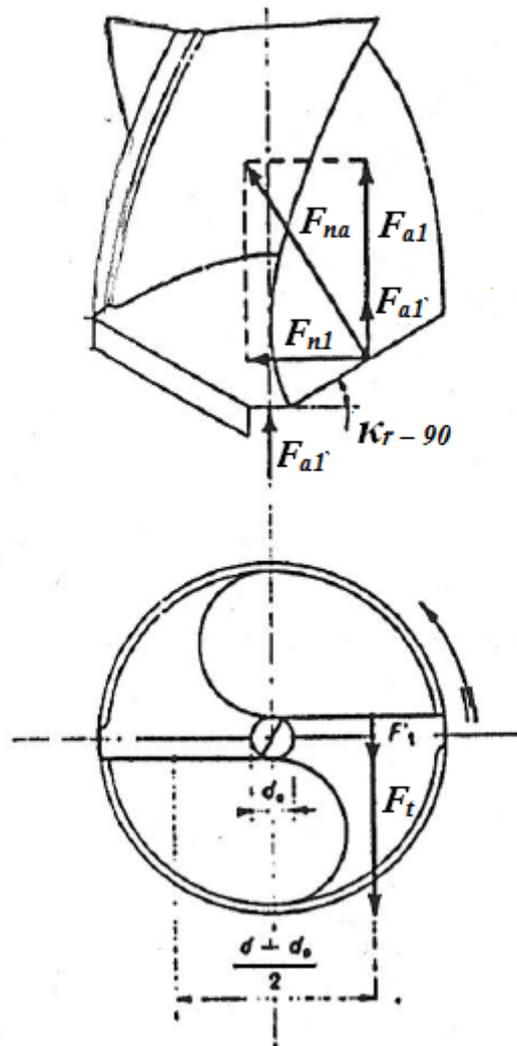


Figura 2.12. Fuerzas aplicadas en el filo de corte. [MICHELETTI, 1980].

- **Fuerzas en el plano vertical (F_{na}):** La fuerza de empuje (F_n) es la denominada en el taladrado como F_{na} y se puede descomponer en [MICHELETTI, 1980]:

2. ESTADO DEL ARTE

- F_{n1} : Se puede despreciar puesto que se iguala con la fuerza de igual valor y sentido contrario producida en el otro filo.
- F_a : Es la suma de las fuerzas presentes en los tres fillos diferentes:
 - Suma de la fuerza existente en cada filo principal (F_{a1}). Su valor es el más influyente y puede ser calculado a partir del valor F_t aplicando trigonometría en los triángulos de fuerzas de corte, quedándonos [MICHELETTI, 1980]:

$$\frac{F_n}{F_t} = \operatorname{tg}(\tau - \gamma) \rightarrow \frac{F_{na}}{F_t} = \operatorname{tg}(\tau - \gamma_m)$$

$$F_{a1} = F_{na} \cdot \sin(k_r) = F_t \cdot \operatorname{tg}(\tau - \gamma_m) \cdot \sin(k_r)$$

- F_{a1} , debida al filo transversal (el del extremo de la punta). Su influencia en F_a puede llegar a ser grande dependiendo del material.

- F_{a1} agrupa también la correspondiente a la componente de las fuerzas de rozamiento dorsal, que dependen del ángulo K_r , longitud de la broca, diámetro, etc. (suelen ser muy pequeñas para brocas de tamaño y geometría estándar).

2.2.6.1 Cálculo a partir de parámetros de corte

Las fuerzas de corte en el taladrado se ven influenciadas por el material, profundidad de corte, avance, velocidad de rotación y geometría de la herramienta, pudiendo relacionarlas entre sí para obtener aproximaciones de una forma más rápida de las fuerzas de corte.

La fuerza tangencial o de corte (F_t ó F_c) es la fuerza principal de corte y da lugar al par de torsión (M). Es el producto del número de fillos y la fuerza tangencial por filo, siendo el par de torsión

la suma del momento de cada filo. En la Figura 2.13 se puede observar la dirección y punto teórico de aplicación de dicha fuerza en los casos de no tener un taladro previo y de tenerlo ("d").

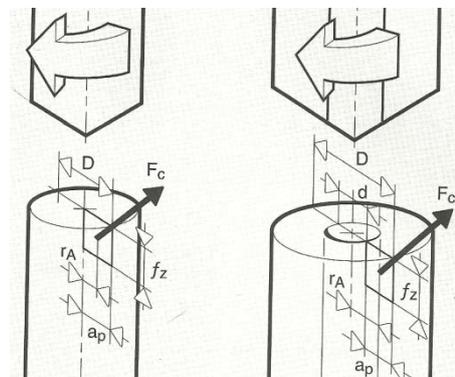


Figura 2.13. Dirección y pto. de aplicación de F_c [SANDVIK, 1994].

$$F_c(N) = K_c(N/mm^2) \cdot a_p(mm) \cdot f(mm/rev)$$

$$M = F_c \cdot r_A$$

$$r_A = \frac{d}{2} + \frac{a_p}{2} = \frac{D + d}{4}$$

2. ESTADO DEL ARTE

$$M_T(Nm) = \frac{f(mm/rev) \cdot K_c(N/mm^2)}{1000} \cdot \frac{D^2 + d^2}{8} (mm^2)$$

- r_A es el radio hasta el punto central del área virtual.
- La *fuerza específica de corte “Kc”* (N/mm²) es una constante que determina la maquinabilidad de un material dado, con un determinado ángulo de incidencia y espesor de viruta. Se define como la fuerza tangencia de corte necesaria para cortar viruta con sección de un milímetro cuadrado. Tiene pequeñas variaciones dependiendo de la condiciones de corte pero que se pueden despreciar.

La suma de las componentes de fuerza axial, es decir, el producto del número de filos y la fuerza del corte axial por filo, da lugar a las *Fuerzas de empuje* (*presión de taladrado F_a*) [SANDVIK, 1994].

$$F_a(N) = 0.5 \cdot K_c(N/mm^2) \cdot a_p(mm) \cdot f(mm/rev) \cdot \sin(k_r)$$

2.2.7 Potencia de corte

2.2.7.1 Métodos teóricos:

La potencia de corte (P_c) necesaria para efectuar un determinado mecanizado puede calcularse de formas diversas en las cuales existirán un mayor o menor número de aproximaciones, simplificando la ecuación correspondiente. Posteriormente tendremos que dividir dicha potencia de corte por el rendimiento mecánico de la máquina para obtener la **potencia consumida**.

Si conocemos las fuerzas de corte en el taladrado, podemos calcular la potencia de avance (P_a) y la potencia de corte transversal (P_t), expresadas en “Kw”:

$$P_a = \frac{F_a \cdot n \cdot f}{60 \cdot 10^6} \quad P_t = \frac{M_{tot} \cdot 2\pi \cdot n}{60 \cdot 10^6}$$

$$P_c = P_a + P_t$$

P_c : potencia total de corte total (kw)

F: Fuerzas de corte (N)

M_{tot} : Momento total (N·mm)

n: Velocidad de giro (rev/min)

f: Avance (mm/rev)

2. ESTADO DEL ARTE

El valor de la potencia de corte transversal es considerablemente mayor al de potencia de avance, siendo despreciable para brocas y avances normales. El valor del M_{tot} corresponde a la suma de los momentos provocados por las fuerzas transversales se puede aproximar a [MICHELETTI, 1980]:

$$M_{tot} = (F_t + F_t') \cdot \frac{d + d_0}{2}$$

Esta potencia obtenida es la resultante de los siguientes sumados:

- **Potencia de cizallamiento (P_s):** Provocar la deformación plástica.
- **Potencia de rozamiento (P_γ):** Necesaria para vencer la fricción herramienta-viruta.
- Potencia absorbida en el arrollamiento de viruta, la cual se puede despreciar (<5%).

Finalmente, también se puede aproximar la potencia total de corte como:

$$P_c = P_s + P_\gamma = F_s \cdot V_s + F_\gamma \cdot V_v;$$

Otra forma común de su cálculo es a través del momento de la broca (Nm) y su velocidad (rad/s) angular. Este método es más inexacto que el anterior, puesto que no se considera la variación del ángulo de desprendimiento y de velocidad a lo largo del filo. Además tampoco se consideran las fuerzas de fricción existentes entre las paredes y los fillos laterales, así como también se desprecia la potencia de extracción de viruta. Nos queda una expresión tal que:

$$P_c(Kw) = \frac{M_T \cdot \omega}{1000}, \text{ siendo: } M_T(Nm) = \frac{a_p(mm) \cdot f(mm/rev) \cdot R(mm) \cdot K_c(N/mm^2)}{1000}$$

Como podemos ver, M_T se calcula a partir del valor del volumen de arranque de viruta y de la constante de fuerza específica de corte (K_c).

Por último, se puede correlacionar la velocidad de corte con la fuerza de corte (F_t o F_c), para brocas de dos fillos:

$$P_c(Kw) = \frac{V_c(m/min) \cdot F_t(N)}{1000 \cdot 60}$$

2.2.7.1 Métodos experimentales:

Existen otros métodos experimentales que nos ofrecen los fabricantes, como es el caso de Sandvik, para taladrado que se expone a continuación. De esta manera podemos calcular la potencia de corte de una manera más directa a través de los parámetros de corte y de la geometría de la herramienta:

2. ESTADO DEL ARTE

$$P_c(Kw) = \frac{f \cdot V_c \cdot D \cdot K_c}{132 \cdot 10^3}$$

Donde K_c es la fuerza de corte específica (N/mm²):

$$K_c = K_{c1} \cdot [f_z \cdot \sin(k_r)]^{-m_0} \cdot \left(1 - \frac{\gamma_0}{100}\right)$$

Los valores K_{c1} y m_0 dependen del material a mecanizar.

Avance por filo: f_z

Ángulo de posición de filo principal: K_r

Angulo de desprendimiento efectivo: γ_0

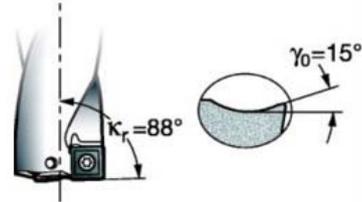


Figura 2.14. Ángulos de la boca.
[SANDVIK, 1994]

2.3 La herramienta: Broca helicoidal

En los taladrados existen diversos tipos de herramientas en función de las características del proceso (brocas con plaquita intercambiable, enterizas de metal duro, para agujeros profundos, específicas para materiales...). Efectivamente, existen brocas específicas para taladrar FC con las que se obtienen calidades óptimas y delaminaciones mínimas, pero su precio es elevado debido a:

- Geometría más compleja (más de dos filos, ángulos determinados...)
- Requieren un muy buen afilado y una mínima desviación de sus ángulos para su correcto funcionamiento.
- Suelen llevar recubrimiento de diamante.

En el estudio se emplearán brocas helicoidales de acero rápido, más comunes, sencillas y baratas, descritas a continuación.

2.3.1 Geometría de la broca helicoidal

La broca helicoidal está fabricada principalmente con aceros rápidos y extrarápidos de alta dureza y resistencia al desgaste, pudiendo añadir en los filos plaquitas de metal duro o diamante. Se pueden distinguir tres partes (Figura 2.15):

2.3.1.1. Mango de sujeción: De forma cilíndrica o cónica para su fijación en el husillo.

2.3.1.2. Cuerpo cortante: Viene caracterizado por dos acanaladuras helicoidales con filos en los bordes y que proporciona una inclinación progresiva y positiva a la arista de corte (ángulo de la hélice), actuando de guía para garantizar la verticalidad del orificio. El paso de la hélice es de 6-8 veces el diámetro (d).

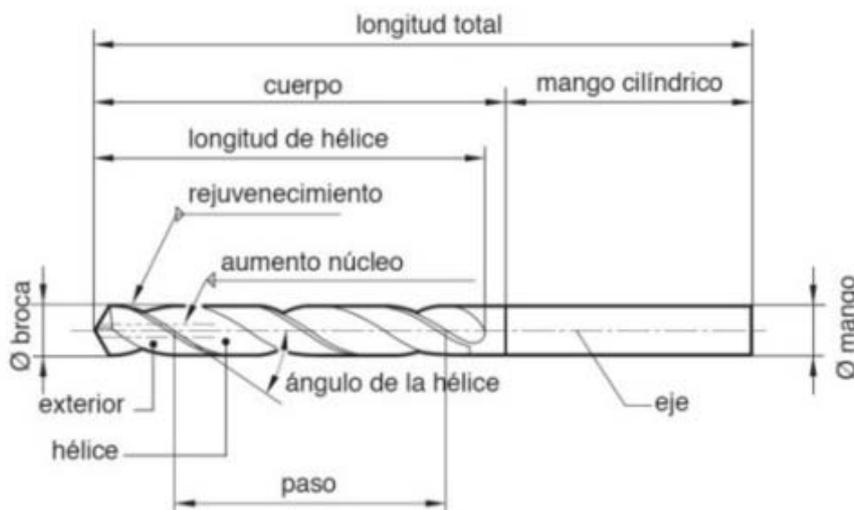


Figura 2.15. Partes de la broca. Fuente: DIN 5419.

2. ESTADO DEL ARTE

2.3.1.3. Punta: Es el elemento resistente principal de corte situado en el extremo de la broca. Su geometría es variada y en ella podemos distinguir los diferentes ángulos de corte y dos zonas concretas (Figura 2.16):

- *Núcleo o alma:* Es el área circular de diámetro igual a la arista transversal ($d_0 = [0.15-0.25] d$) situado su centro justo en el eje de la broca, que no acaba en punta, sino en forma de cincel, formando un ángulo determinado con las aristas de corte: Ángulo del filo transversal (Figura 2.17). Su velocidad de corte es prácticamente nula y viene a actuar como un punzón que provoca el deslizamiento de material desde el centro al exterior, donde es cortado por los filos principales.
- *Filos principales:* Son filos (aristas de corte), dos normalmente, con una determinada inclinación, que van desde los filos longitudinales de la broca hasta los extremos del filo transversal. La geometría del afilado determina el ángulo de incidencia (α) y la inclinación del filo (ángulo de punta) denominado anteriormente como ángulo de posición de filo principal (κ_r). Son los principales responsables del corte y por ello su desgaste es acusado, principalmente en las esquinas exteriores, requiriendo ser intercambiados o afilados al cabo de un tiempo de corte.

2.3.1.4. Ángulos de corte: El inconveniente presente en el taladrado se presenta a la hora de determinar los ángulos de corte debido a que su valor varía a lo largo del filo principal, debiéndose estimar su valor medio como ya se explicó anteriormente. Existen métodos para realizar dichas aproximaciones en función de la geometría de la herramienta, pudiendo sacar las siguientes conclusiones [ROMMEL, 2014]:

- El ángulo de la punta, denominado anteriormente como ángulo de posición de filo principal " κ_r " (que es la mitad de dicho ángulo), suele tomar casi siempre un valor de 118° , siendo de gran importancia que la bisectriz del ángulo coincida con el eje de la broca.
- *El ángulo de desprendimiento o nominal de incidencia (γ)* (se le da ese nombre en la Figura 2.17) toma valores decrecientes de la periferia (máximo valor de 25° a 30°) al centro, donde su valor es nulo. Su valor depende del ángulo de la punta, el ángulo de inclinación de la hélice y de la variable de posición eje-punto del filo principal (radio).
- *El ángulo de incidencia (α)*, por el contrario, debe aumentar de la periferia al centro. Esta es una consideración importante en el afilado de brocas, estado su valor delimitado entre ciertos máximos y mínimos (10° y 22° aproximadamente) en función del material a cortar, para un correcto funcionamiento.

2. ESTADO DEL ARTE

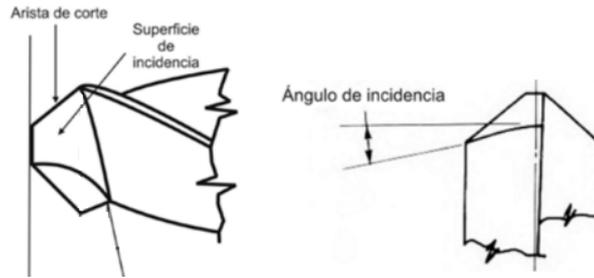


Figura 2.16. Ángulos en la periferia de desprendimiento y de incidencia. [ROMMEL, 2014].

- El ángulo de cizallamiento (Φ) variará de igual modo que lo hace el de desprendimiento debido a su relación según las teorías de Ernst-Merchant y Lee-Shaffer expuestas en el apartado Fuerzas de corte.

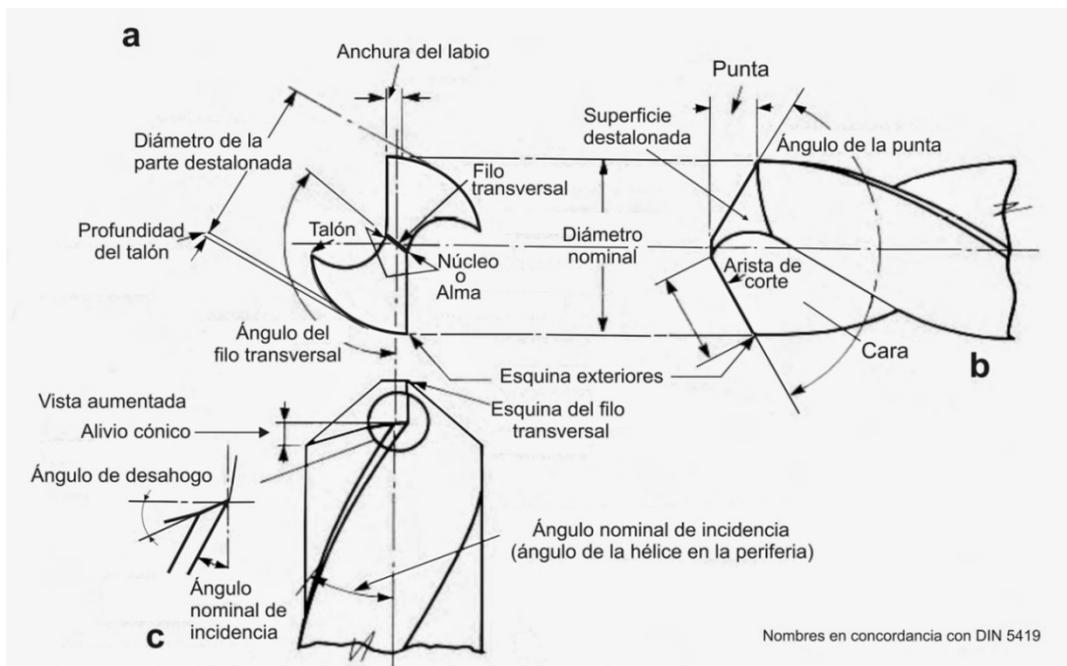


Figura 2.17. Nombres comunes y detalles de la punta de la broca helicoidal. Fuente: Norma DIN 5419.

En la Figura 2.18 se representa el arranque de material en las diferentes zonas de la punta de la broca, pudiendo observar como en el núcleo se aparta el material a la periferia, como ya explicamos, donde es cortado por el filo principal, pudiendo observar las variaciones de los ángulos de incidencia y de inclinación a lo largo de éste.

2. ESTADO DEL ARTE

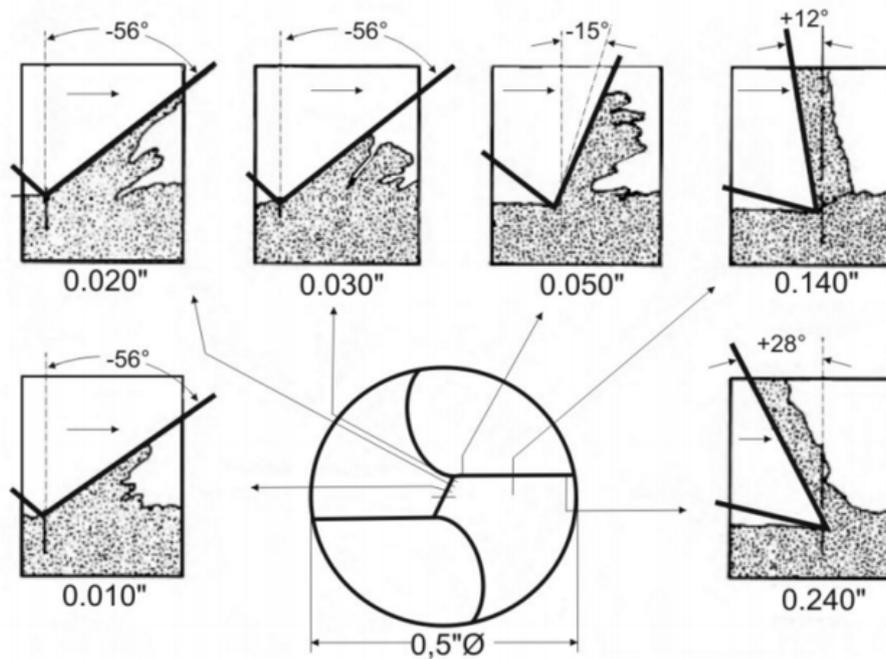


Figura 2.18. Diagramas de formación de la viruta y de la variación de los ángulos [ROMMEL, 2014].

2.3.2 Estado del filo:

En el taladrado, los filos de la arista de corte son los que más rápidamente se desgastan puesto que son los que mayor cantidad de material cortan y sobre ellos se producen las fuerzas de corte de mayor valor. Ello es mínimamente apreciable en los primeros cortes, hasta llegar un momento dado en el que la calidad del corte es inaceptable (mal acabado o fuera de tolerancias) y se requiere un afilado o cambio de herramienta. Dicho momento, denominado como vida útil de la herramienta, viene especificado por el fabricante, siempre que se empleen los parámetros de corte que recomienda.

En nuestro estudio, al ser la FC un material muy abrasivo, es de esperar que el desgaste de la herramienta sea muy apreciable en los sucesivos ensayos que se realicen con ella y, además, como para este material es imprescindible un muy buen afilado, también es de esperar que la delaminación aumente al no poder cortar limpiamente las fibras.

2.4 Delaminación

Los taladrados de FC que no requieren una calidad óptima son realizados con brocas estándar, como es nuestro caso. Sin embargo hay riesgo de que tengan lugar variaciones de las propiedades mecánicas de la pieza y delaminación, así como de un desgaste rápido de la herramienta que aumenta dichos riesgos.

La delaminación es un fenómeno que consiste en la separación entre capas o láminas (la lámina como tal no se delamina) de un material compuesto debido a la aplicación de diferentes fuerzas, principalmente de empuje, que logran vencer las uniones de las mismas. Puede aparecer en zonas visibles como internas (entre capas), que no se pueden apreciar a simple vista y sería necesario su estudio con técnicas específicas (radiografías, termogramas o ultrasonidos (Figura 2.19)) o mediante simulación por ordenador. En nuestro caso, emplearemos un microscopio para determinar el grado de delaminación exterior (visible), calculando mediante métodos experimentales.

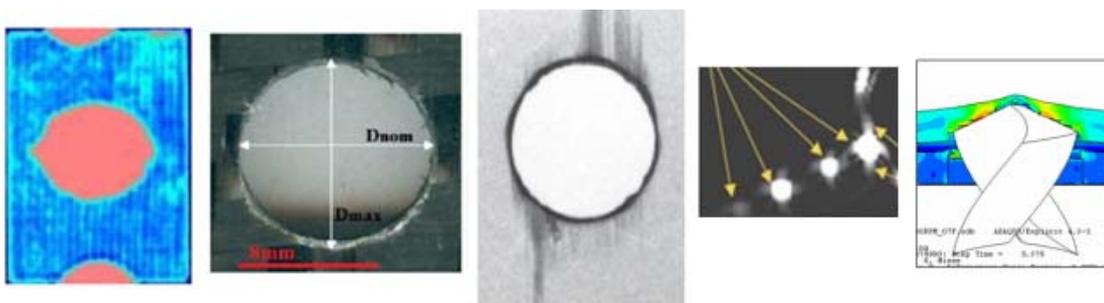


Figura 2.19. Ensayos no destructivos de delaminación. Por orden: Ultrasonidos, imágenes computarizadas, radiografía, termografía y simulación [CASTILLO, 2007], [DE ALBUQUERQUE, 2008], [HERBERT, 2014].

Por lo general, los parámetros más influyentes en la delaminación, por orden, son: Avance, velocidad de corte, geometría de la herramienta y desgaste del filo, pudiendo alternar su grado de influencia en función de los valores que tomen. En los estudios de delaminación, los parámetros de corte que se suelen modificar para observar sus resultados son: f , n y V_c , los cuales son influyentes en la variación de F_{na} [KOBOEVIĆ, 2012] [MIŠKOVIĆ, 2011].

2.4.1 Parámetros influyentes en la delaminación

A continuación se describen detalladamente la influencia de los parámetros y factores mencionados junto con otros de interés, así como sus causas y consecuencias, obtenidas de diversos estudios y artículos consultados:

- Según Tsao y Hocheng [TSAO, 2005] el valor del avance “ f ” (recordamos que es la longitud recorrida por revolución) es el parámetro de mayor influencia

2. ESTADO DEL ARTE

en la delaminación puesto que determina en gran medida las fuerzas de empuje “ F_{na} ” y, cuanto menor sea f , menor será F_{na} ; sin embargo, si se reduce el avance en exceso cabe la posibilidad de una fricción y calentamiento excesivo que reblandecería el material y sería necesario su control mediante estudios termográficos.

- Para una combinación de velocidades de cortes bajas y avances altos se ha demostrado que se obtiene un daño por delaminación aceptable pero una rugosidad del agujero muy mala [ÁLVAREZ, 2005]. Sin embargo estas condiciones de corte pueden ser útiles en determinados procesos industriales si se emplean herramientas adecuadas.
- Es común, pero no siempre tiene por qué cumplirse, que al aumentar la velocidad de giro del husillo (es equivalente a aumentar la V_c manteniendo diámetro cte.) reduce la delaminación y el tamaño del agujero (más preciso), sin embargo, disminuye la cilindricidad del mismo. Estas dos últimas características del agujero dependen principalmente de la velocidad de giro y podrían ser observadas al determinar el factor de delaminación (*apartado 2.4.2*) [RATHOD, 2015].
- Al aumentar el diámetro de la broca (supone, para una velocidad de giro cte., un aumento de V_c) aumenta la delaminación, puesto que las fuerzas de empuje aumentan, siendo de considerable importancia en taladros grandes [DE ALBUQUERQUE, 2008].
- Se puede reducir el daño realizando un taladro previo de menor diámetro (menores fuerzas de empuje), pero puede ser desfavorable si es demasiado grande, pues reduce la resistencia de la unión alrededor del agujero piloto y favorece la delaminación en el segundo taladrado. Otra ventaja es la reducción del grado de delaminación Push-out generada por el cincel de la punta al salir [MARQUES, 2007] [DE ALBUQUERQUE, 2008].
- Para disminuir la delaminación, existen brocas específicas para composites de mayor número de filos (de 3 a 6) y fabricadas con materiales y geometrías determinadas y de gran variedad.
- El desgaste del filo, que además es acelerado debido al carácter abrasivo de la FC, repercute considerablemente en el acabado si el desgaste es acusado (se cuantifica por el número de taladros realizados) [MIŠKOVIĆ, 2011].
- El tipo de fibra de carbono, así como la orientación de las fibras en el mecanizado, juegan un papel importante principalmente en la determinación de las fuerzas de empuje críticas [CASTILLO, 2007], como se verá más adelante. Otra característica de las fibras sometidas a un proceso de curación para aumentar la cohesión, es el efecto “volcán” de delaminación que puede aparecer a la salida del taladro.
- Geometría de la punta: El ángulo de la punta en brocas convencionales tiene una importancia reducida si varía algunos grados, estando en torno a los 118° . Sin embargo, es un parámetro de importancia en las brocas específicas de FC, con ángulos de punta muy variados. Reducir la longitud

2. ESTADO DEL ARTE

del cincel de la punta [MIŠKOVIĆ, 2011] y emplear ángulos más agudos reducen en cierto grado la delaminación [SEDLACEK, 2010].

- Posibles flexiones sufridas por el material durante el taladrado favorecen la aparición de tensiones y con ellas la aparición de delaminación [CASTILLO, 2007].
- El espesor del material a taladrar, cuanto mayor sea, mejor. Si el agujero no es pasante evitaremos la de laminación Push-out.
- En el caso de brocas recubiertas se ha demostrado experimentalmente que ciertos recubrimientos (de diamante principalmente) reducen la delaminación notablemente [RATHOD, 2015].

Una vez consideradas las dependencias de la delaminación, se debe ensayar con rangos variables de dichos parámetros influyentes para encontrar un conjunto de valores que minimicen el daño al máximo, tal y como se hizo para llegar a las conclusiones citadas anteriormente. En este proyecto se variarán solo los parámetros más influyentes, pues el problema se complica en gran medida al añadir al estudio un parámetro influyente más.

2.4.2 Modelos de daño

Podemos distinguir dos tipos de delaminación de acuerdo con sus causas y consecuencias (Figura 2.21); el primero debido a la acción de despegar laminados (peel-up) y el segundo debido al empuje de laminados (push-out). En ambos aparecerá delaminación y astillamiento (fibras sin cortar limpiamente) de manera uniforme, siendo el push-out mucho más notable, crítico y común.

- **Peel-up:** Se produce por una fuerza de empuje hacia arriba realizada por la herramienta al incidir sobre la superficie a mecanizar, debido a que las primeras láminas de material ascienden por las espirales de la herramienta antes de ser cortado por completo, guiadas por el ángulo de desprendimiento. Dependerá pues, de la resistencia de la fibra a ser cortada y de la fuerza de unión que proporciona la matriz. En ocasiones, los resultados experimentales no demuestran una clara dependencia de este tipo de delaminación con los parámetros de corte, pudiendo ser más notable al variar el avance.

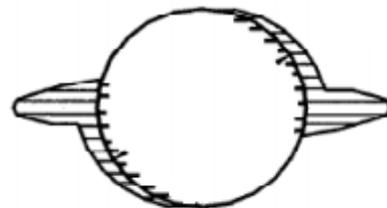


Figura 2.20. Daño común de delaminación y astillamiento a la salida del taladro [VIJAYARAGHAVAN, 2005].

- **Push-out:** En este caso, la delaminación puede tener lugar a lo largo de las sucesivas capas que se mecanizan debido a que el cincel de la punta siempre ejercerá una cierta presión de empuje (en torno al 50% de la F_{na} total) sobre las láminas previas a cortar, siendo también de cierta importancia el empuje que

2. ESTADO DEL ARTE

produce el filo principal. Cuando dicha presión supera la resistencia de unión entre láminas, se produce la delaminación, siendo la resina escogida la que determinará la presión máxima que es capaz de soportar la unión. Estos daños son difíciles de detectar mediante la inspección visual puesto que se da en uniones interlaminares y además, afectan considerablemente a las propiedades mecánicas de la zona en la que se producen, que serán las más solicitadas (sujeción de tornillos, pernos, roblones...). A medida que la broca se aproxima a las últimas láminas tendremos un caso más crítico al no haber nada debajo de éstas que compense en cierto modo la fuerza de empuje, siendo comunes y apreciables los defectos a la vista en esta zona (Figura 2.20). Sin embargo, se podría minimizar el daño colocando una placa de apoyo debajo del agujero durante el mecanizado.

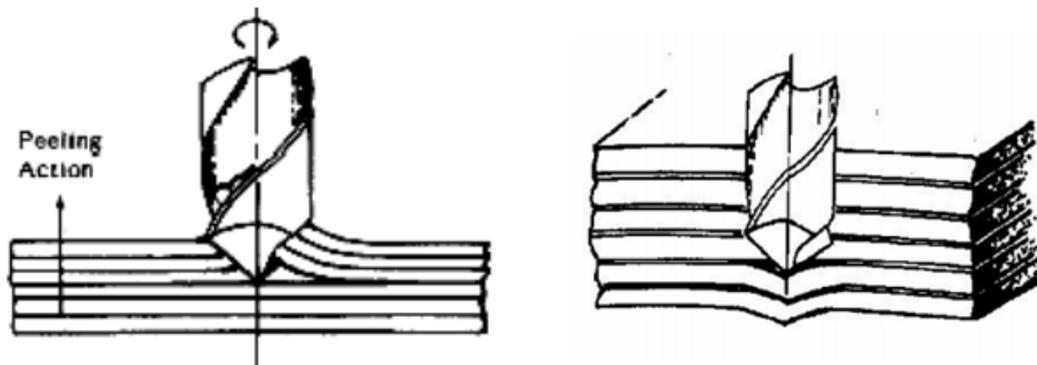


Figura 2.21. Delaminación tipo Peel-up (izq.) y Push-out (dcha.) [MARQUES, 2007].

Como podemos deducir, la delaminación del material está influenciada por las fuerzas de corte, principalmente por fuerzas de empuje. Existen modelos que relacionan las características del material, diámetro y espesor a taladrar para obtener un valor crítico de la fuerza de empuje que, en caso de superarse, aparecerá delaminación (existen otros factores influyentes como la geometría de la herramienta, estado del filo, etc. que no se consideran en los modelos). Uno de los más conocidos es el de *Hocheng-Dharan*, que permite conocer las fuerzas de empuje críticas para los dos tipos de delaminación mencionados.

- Fuerza crítica para laminación Push-out en taladros pasantes [HOCHENG, 2005]:

$$F_{crit.}(h) = \pi \sqrt{32 \cdot M \cdot G_{IC}} = \pi \sqrt{\frac{8 \cdot G_{IC} \cdot E_1 \cdot h^3}{3 \cdot (1 - \nu^2)}}$$

donde “h” es el espesor de material a cortar, “G_{IC}” es la tenacidad interlaminar a la fractura en modo I, “E₁” es el módulo de elasticidad a lo largo de la dirección de la fibra y “ν” es la relación de Poisson.

2. ESTADO DEL ARTE

Cabe destacar que la naturaleza del daño es a menudo aleatoria, siendo necesario realizar un alto número de ensayos y aplicar herramientas estadísticas para una estimación del daño precisa.

2.4.3 Medida del daño por delaminación

A la hora de determinar el daño por delaminación se lleva a cabo mediante diferentes estrategias de comparación entre cortes realizados sobre el mismo material, orientación y número de capas, cambiando los parámetros de corte y broca, como es nuestro caso.

En el estudio emplearemos la metodología de medición mediante imágenes computarizadas con el fin de obtener las imágenes de las zonas del agujero circundante para su medición. *Chen W.C.* [CHEN, 1997] propuso un factor que permite la comparación de la evaluación y análisis de la delaminación en materiales compuestos: Factor de delaminación (F_d), definido como el cociente entre el diámetro máximo " D_{max} " delaminado (calculado mediante algoritmos de los puntos tomados) y el diámetro nominal " D_0 " del agujero (Figura 2.22):

$$F_d = \frac{D_{max}}{D_0}$$

Posteriormente *J.P. Davim* [DAVIM, 2007] sugiere otro criterio llamado Factor ajustado de delaminación (F_{da}). Con este criterio se pretende hacer frente a la forma irregular de la delaminación que contiene roturas y grietas, y se define como:

$$F_{da} = \alpha \cdot \frac{D_{max}}{D_0} + \beta \cdot \frac{A_{max}}{A_0}$$

donde A_{max} es el área relacionada con el máximo diámetro de la zona de delaminación (D_{max}) y A_0 es el área del orificio nominal (D_0). Las constantes α y β se utilizan como porcentajes, siendo su suma igual a uno.

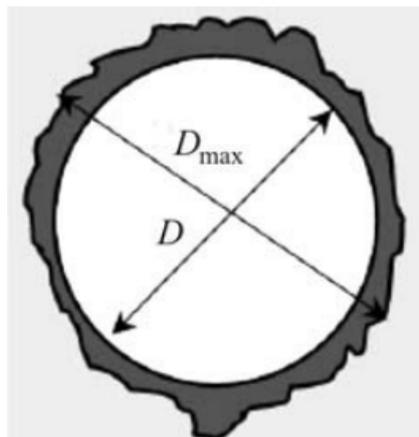


Figura 2.22. Mediciones del agujero para el estudio de delaminación [KOBOEVIĆ, 2012]



2. ESTADO DEL ARTE

Es importante determinar los factores causantes de la delaminación así como la mayor o menor influencia de los mismos. Para los estudios de calidad de taladrado se pueden relacionar dichos factores y representarlos gráficamente junto con el factor de delaminación para comparar diferentes herramientas a diferentes condiciones de corte, siendo imprescindible realizar un cierto número de ensayos para reducir la aleatoriedad de los resultados.

3. REALIZACIÓN DEL ESTUDIO

3.1 Introducción

A continuación se describirán los métodos y procedimientos que se han llevado a cabo para la realización de los ensayos como los posteriores tratamientos de datos, de tal manera que podamos garantizar la fiabilidad de los resultados obtenidos (precisión y dispersión) para su posterior análisis y toma de conclusiones.

La metodología empleada se guía por medio de una cadena de medida que refleja los procesos a los cuales son sometidos los datos; desde los sensores que los toman, hasta el resultado final. Para comprender dicha metodología, se describirán ciertos aspectos relevantes de los instrumentos empleados así como el funcionamiento de los mismos y los materiales que lo componen, que en nuestro estudio serán: un dinamómetro, un acondicionador de señal, tarjeta de adquisición de datos y registro y tratamiento de datos por ordenador.

3.2 La cadena de medida

La cadena de medida podemos definirla como: “El conjunto de instrumentos que convierten una magnitud mecánica, en una forma observable y cuantificable, proporcional a la magnitud mecánica”. Está constituida normalmente por un traductor o captador, un equipo de acondicionamiento e indicador y/o registrador, siguiendo el esquema de la Figura 3.1.

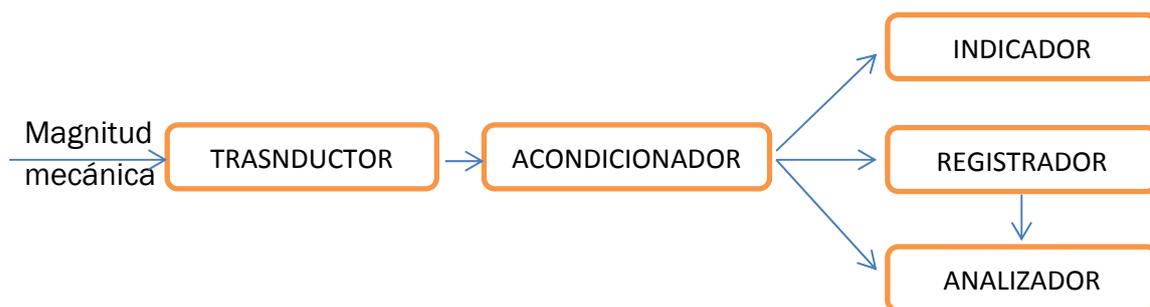


Figura 3.1. Cadena de medida. Fuerzas de corte.

- **El transductor:** Es el dispositivo que convierte la magnitud a medir (desplazamiento, aceleración, fuerza, presión...) en una señal eléctrica proporcional a dicha magnitud. Normalmente la medida se transmite mediante medios eléctricos o electrónicos para, por tanto, es necesario que el transductor produzca una señal eléctrica (señal primaria) que sea lo más

3. REALIZACIÓN DEL ESTUDIO

exacta posible a la magnitud a medir y que recoja y represente toda la información necesaria para su correcto procesamiento. A la parte encargada de producir esta señal dentro del transductor, se le denomina elemento de transducción.

- *Cuerpo de ensayo:* Es un elemento del transductor que crea una señal no eléctrica (señal secundaria) cuando el elemento de transducción no es susceptible a medir la magnitud y, de esta manera, sí será capaz de crear una señal eléctrica a partir de la señal secundaria.
- **El acondicionador de señal:** Es común que la señal eléctrica generada por el transductor sea débil y pueda contener distorsiones que modificarían el resultado real (ruido). El acondicionador (o amplificador) tiene como función eliminar dicho ruido filtrando la señal para ofrecer resultados más exactos, así como ampliarla para facilitar su conversión (señal acondicionada).
- **El indicador y registrador:** El indicador como un convertidor de energía transformado la señal acondicionada eléctrica en otra proporcional que representa la medida original de forma cualitativa, la cual se muestra de forma permanente y puede ser reproducida las veces que sea necesario. El conjunto indicador-registrador puede ser elementos muy diferentes, siendo en nuestro caso un ordenador.

En el estudio nos encontramos con otra cadena de medida más sencilla (Figura 3.2) perteneciente a la medida de la zona de delaminación mediante imágenes digitales.



Figura 3.2. Cadena de medida. Zona de delaminación.

3.2.1 Características de las cadenas de medida

Podemos diferenciar características y propiedades de las cadenas de medida que pueden tomar mayor o menor relevancia en función de qué queremos medir y que dependen de los medios de los que disponemos.

- **Sensibilidad:** Es la relación que existe entre la magnitud e entrada que estemos midiendo. Normalmente se expresa en unidades de tensión por unidad de magnitud mecánica que se mide (mV/mm, mV/m, etc.). En el caso de que el captador sea pasivo (necesita para funcionar una fuente de

3. REALIZACIÓN DEL ESTUDIO

alimentación), la sensibilidad se expresa además por unidad de tensión suministrada (mV/V/bar, mV/V/N, etc.).

- **Resolución:** Es la variación más pequeña de la magnitud mecánica de entrada (presión, fuerza,...) para la cual se puede distinguir una variación en la señal eléctrica de salida. Esta resolución puede venir dada por la naturaleza del elemento de transducción (por ejemplo si es potenciométrico por la resistencia de una espira) o por el conjunto de la cadena de medida. La resolución puede estar limitada también por los niveles de ruido de la instrumentación, de forma que enmascara cualquier cambio pequeño de la magnitud que estemos midiendo. La resolución es un nivel mínimo de la magnitud mecánica que la cadena es capaz de medir e influye en la precisión con la que se realiza la medida.
- **Sensibilidad transversal:** La sensibilidad máxima de un transductor se da en una determinada dirección del mismo. Igualmente, dicha dirección debería de coincidir con la dirección de la magnitud a medir pero, debido a tolerancias de fabricación y/o a impredecibles variaciones en las características del elemento de traducción, esa coincidencia no ocurre. Pongamos el caso de que S_{max} es la máxima sensibilidad de medida (en la dirección de medida), siendo “ α ” el ángulo formado por la dirección de sensibilidad máxima y la dirección real de medida, pudiendo conocer la sensibilidad de cualquier dirección mediante:

$$S_m = S_{max} \cdot \cos\alpha$$

La sensibilidad transversal máxima se puede expresar como la tangente del ángulo “ α ” y suele ser menor del 0.01, dependiendo del aparato de medida (se expresa en porcentaje).

- **Repetibilidad:** Es la capacidad del sistema de dar el mismo valor de la magnitud medida cuando se realizan distintas medidas en las mismas condiciones. La repetibilidad está caracterizada por la desviación típica (σ) de la medida.
- **Histéresis:** es el fenómeno por el cual el valor medido depende del sentido en el que se alcance el punto de medida. Por ejemplo, un transductor de desplazamiento puede no medir lo mismo si el desplazamiento está aumentando o disminuyendo. Esto significa que hay dos curvas de respuesta, una cuando la variable a medir está creciendo y otra cuando está decreciendo. En sistemas lineales ideales la histéresis es constante (Fig. 1.5.4b) y está caracterizada por la distancia horizontal entre la rama ascendente y la descendente. En general la histéresis se caracterizará por la máxima distancia horizontal entre las ramas ascendente y descendente.

3. REALIZACIÓN DEL ESTUDIO

- **Estabilidad:** Es la capacidad de mantener fija la curva de respuesta estática a lo largo del tiempo. En sistemas lineales la estabilidad puede cuantificarse dando la deriva del cero (cambio a lo largo del tiempo del término independiente en la función de respuesta) y la deriva de la sensibilidad (cambio a lo largo del tiempo de la sensibilidad).
- **Linealidad:** La curva de calibración más sencilla es la lineal. Los transductores cuya salida es lineal requieren electrónicas más sencillas (y por tanto más baratas) y se encuentran frecuentemente en el mercado. Ningún transductor es exactamente lineal, de hecho, hay transductores que son claramente no lineales en intervalos amplios de medida y que, sin embargo, son aproximadamente lineales en intervalos reducidos. Dicha linealidad indica la variación de la medida respecto unos límites, determinados por la resolución (límite superior) y por las características del transductor (límite inferior).
- **Rango de frecuencias de operación:** Es aquel en el cual la sensibilidad del transductor no varía más de un porcentaje establecido en dicha sensibilidad. Este rango puede estar limitado por las características mecánicas o eléctricas del transductor, o por las del acondicionador asociado. Estos límites, junto con los de linealidad, definen completamente el campo de utilización del instrumento de la cadena de medida.
- **Requerimientos de calibración:** La calibración de la cadena de medida consiste en determinar la relación entre la señal de salida y la magnitud mecánica de entrada del parámetro que se está midiendo, es decir, es la determinación de la sensibilidad total de la cadena de medida. Por tanto, podemos decir que los requerimientos de calibración son el conjunto de acciones a realizar para determinar dicha calibración. Estas acciones pueden reducirse a simples cálculos, o puede ser necesario realizar una medida de una magnitud conocida para calcular la calibración de la cadena. En el caso de ser suficiente con unos cálculos, estos normalmente involucran la sensibilidad del transductor y las características del acondicionador.
- **Efectos ambientales:** Son factores que pueden afectar a la medida y es necesario su consideración para tratar de minimizar sus efectos. Podemos destacar tres:
 - **Temperatura:** Puede afectar a las características de funcionamiento de los transductores (sensibilidad, rangos,...). El efecto de la temperatura puede ser compensado midiendo las características del transductor en función de la misma.

3. REALIZACIÓN DEL ESTUDIO

- **Humedad:** Los transductores que operan con impedancias eléctricas altas, son afectados por la humedad de forma más acusada que los que lo hacen con impedancias eléctricas bajas. En todo caso, es difícil compensar los efectos de la humedad y se recurre a sellados herméticos cuando estos efectos se producen.
- **Ruido acústico:** Es normal que la vibración vaya acompañada de ruido acústico de alta intensidad; sin embargo solo en el caso de que sea la energía acústica la que produce las vibraciones a medir, la relación entre ésta y la energía vibratoria es suficientemente alta como para producir errores importantes.
- **Propiedades físicas:** El tamaño y peso de un transductor son características importantes a tener en cuenta en la medida en ingeniería mecánica, y en especial en la medida de vibraciones. Un transductor de tamaño elevado puede requerir un montaje que varíe las características vibratorias de la estructura a medir. De forma análoga, la masa añadida por el transductor puede introducir campos sustanciales en la respuesta de dichas estructuras. Por último, a mayor masa del transductor, mayor sensibilidad pero pueden aparecer vibraciones indeseadas.

3.3 Elementos del ensayo

3.3.1 La fresadora

La máquina empleada es una *fresadora correa A16* (Figura 3.3.) de bancada fija, accionada por corriente continua y equipada con un centro **TNC Heidenhain 355** mediante el cual programamos de forma manual las posiciones a taladrar, paradas intermedias, velocidades, etc., logrando un proceso preciso y repetitivo, característica de gran importancia para poder comparar resultados obtenidos en las mismas condiciones.

La programación Heidenhain 355 se realiza mediante la introducción de coordenadas y comandos en sucesivos bloques que se ejecutan de forma ordenada, permitiéndonos la posibilidad de modificar bloques, añadirlos en cualquier posición y simular bloque a bloque para poder detectar algún fallo si lo hubiera.

3. REALIZACIÓN DEL ESTUDIO



Figura 3.3. Fresadora correa A16 y centro TNC.

Su configuración nos permite desplazarnos en los tres ejes de ordenadas para la realización de los taladros mediante el accionamiento de los diferentes motores de corriente continua. Los sistemas de accionamiento de los motores disponen de frenos de seguridad que se accionan desde el control de mandos, paralizando y dejando sin tensión a los diferentes componentes de la máquina si se activa la parada de emergencia.

Las condiciones de corte se determinan mediante el control numérico, el cual realiza los cambios oportunos automáticamente en la caja de cambios situada en el interior del carnero, mediante un sistema hidráulico.

Dimensiones	
Dimensiones mesa:	2.000 x 630 mm
Número de ranuras T:	6
Medidas ranuras T:	18 mm
Recorridos de los ejes	
Recorrido longitudinal X:	1.800 mm
Recorrido transversal Y:	800 mm
Recorrido vertical Z:	800 mm
Cabezal	
Modelo cabezal:	Universal manual
Amarre herramienta:	Hidráulico
Cono:	ISO 50
Gama de velocidades:	25 - 3.250 rpm
Potencia mandrino:	16 kW
Avances de máquina	
Avances de trabajo:	5 - 5.000 mm/min
Avances rápidos:	8.000 mm/min
Pesos y dimensiones	
Peso máximo sobre mesa:	3.000 Kg
Peso aproximado máquina:	10.000 Kg
Dimensiones máquina:	4.920 x 2.714 x 2.417 mm

Figura 3.4. Ficha técnica fresadora correa A16.

3. REALIZACIÓN DEL ESTUDIO

3.3.2. El dinamómetro

El dinamómetro es un instrumento de medida con el cual podemos obtener magnitudes de fuerzas mediante la medida de deformaciones y desplazamientos de sus componentes. Es común que dichas deformaciones y desplazamientos tengan lugar en materiales piezoeléctricos, como es el caso del dinamómetro empelado en este proyecto: **Dinamómetro Kistler tipo 9124**, por lo que se desarrollarán algunas nociones básicas de estos materiales.

La parte fundamental del dinamómetro son los cuatro captadores piezoeléctricos, colocados entre los platos del dinamómetro, bajo una alta precarga. Esta es la premisa fundamental para poder medir las fuerzas y el momento de corte.

Dentro del dinamómetro hay un pequeño amplificador de carga para cada una de las 5 componentes que es capaz de medir el dinamómetro (3 componentes de fuerza, momento y zoom), alimentado por medio de inducción sin que exista contacto entre las paredes. Así mismo, tiene integrado un sistema de telemetría para la transmisión de datos.

La señal de salida del amplificador de carga es digital con una resolución de 12 bits. Esta señal digital, es desmultiplexada dentro del dinamómetro y transformada en una señal analógica que es transmitida al captador del estátor.

Los transductores de fuerza que incluye el dinamómetro, disponen de un pequeño convertidor de carga a tensión para tener una salida de baja impedancia. Esto permite el uso de cables normales en medios donde la humedad o la contaminación podrían ser perjudiciales, debido al alto aislamiento requerido en los transductores de alta impedancia.

Los transductores están montados en el dinamómetro, en línea con la dirección de la fuerza a medir, y todos ellos nos dan la magnitud de la fuerza total, así como también podemos medir el par mediante la colocación de piezoeléctricos de forma circular, capaces de medir además el cortante (Figura 3.5). En nuestro caso, tenemos rangos concretos de medidas capaces de realizar por el dinamómetro que, en el caso de ser superados, pueden provocar la despolarización mecánica del dinamómetro pudiendo provocar daños en los cristales, dando lugar a medidas erróneas. Por ello es de importancia conocer una medida aproximada que obtendremos con el Rango I, antes de medir con el Rango II (explicado más adelante).

3. REALIZACIÓN DEL ESTUDIO

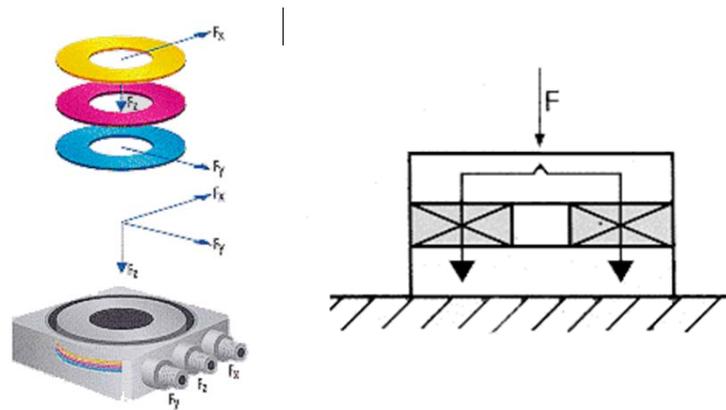


Figura 3.5. Disposición del material piezoeléctrico para la medición de fuerzas y momentos.

Fuente: Manual dinamómetro kistler.

Un transductor de fuerza para medir varias componentes, consiste en un conjunto de discos o platos de cuarzo y unos electrodos, montados dentro de un alojamiento de acero. Cada disco de cuarzo ha sido cortado según un eje definido del cristal, de modo que la dirección de los ejes sensibles del cristal coinciden con las direcciones de las fuerzas que queremos medir.

Las sensibilidades para cada canal de medida, así como las condiciones de aplicabilidad de la calibración, están dadas por el fabricante en la correspondiente **carta de calibración** (Tabla 3.1):

	RANGO	F_x	F_y	F_z	M_z
Rango de medida	I	$\pm 20.000\text{N}$ $\approx 100\% \text{ FS}$	$\pm 20.000\text{N}$ $\approx 100\% \text{ FS}$	$\pm 30.000\text{N}$ $\approx 100\% \text{ FS}$	$\pm 1.500\text{Nm}$ $\approx 100\% \text{ FS}$
Sensibilidad	I	0.467 mV/N	0.467 mV/N	0.341 mV/N	6.59 mV/Nm
Linealidad ($\leq\% \text{FSO}$)	I	0.3	0.3	0.3	0.3
Rango de calibración	II	$\pm 2.000\text{N}$ $\approx 10\% \text{ FS}$	$\pm 2.000\text{N}$ $\approx 10\% \text{ FS}$	$\pm 3.000\text{N}$ $\approx 10\% \text{ FS}$	$\pm 150\text{Nm}$ $\approx 10\% \text{ FS}$
Sensibilidad	II	4.70 mV/N	4.71 mV/N	3.40 mV/N	66.0 mV/Nm
Linealidad ($\leq\% \text{FSO}$)	II	0.3	0.3	0.3	0.3

Tabla 3.1 Calibración del dinamómetro KISTLER 9124.

El intervalo de temperaturas en el que la calibración es válida, es de 0 a +60 °C.

La sensibilidad cruzada puede tener lugar cuando una fuerza externa actúa en una dirección diferente a la de medida, originando perturbaciones en la medida. Para nuestro dinamómetro, los valores del crosstalk determinan dichas perturbaciones:

3. REALIZACIÓN DEL ESTUDIO

$F_x \rightarrow F_y$ de 0.4%	$F_x \rightarrow F_z$ de -1.0%	$F_y \rightarrow F_z$ de -1.8%
$F_y \rightarrow F_x$ de 0.3%	$F_z \rightarrow F_x$ de <0.1%	$F_z \rightarrow F_y$ de -1.0%

Tabla 3.2 Crosstalk

Además, el M_z tiene una influencia de 0.8N/Nm sobre F_z . Sin embargo, estas influencias son pequeñas, siendo común despreciar todas aquellas inferiores al 3%.

3.3.2.1 Materiales piezoeléctricos

Dado que el dinamómetro que hemos usado en el proyecto es un dinamómetro piezoeléctrico, vamos a hacer una breve introducción teórica de los principios en los que se basan estos dinamómetros.

Un material piezoeléctrico, es aquel que desarrolla una carga eléctrica cuando se le somete a una fuerza. Los materiales que poseen esta propiedad pueden ser monocristales intrínsecamente piezoeléctricos, tales como el cuarzo y la sal de Rochelle, o cerámicas ferroeléctricas polarizadas artificialmente, las cuales son mezclas de diferentes compuestos tales como titanato de bario, circonato de plomo y metaniobato de plomo.

Los elementos piezoeléctricos, en su estructura microscópica, están formados por dominios eléctricos tales que a temperaturas bajas están orientadas al azar, tienen comportamiento isótropo y el momento total del dipolo es nulo.

A una temperatura determinada, denominada temperatura de Curie, la estructura cristalina se modifica, de modo que pierde el carácter isótropo del cristal y se produce un elemento con marcado momento dipolar, a este tipo de materiales se les denomina ferroeléctricos, debido a la enorme similitud con los fenómenos del ferromagnetismo.

En la práctica para polarizar un cristal piezoeléctrico, o sea para orientar sus dominios, se lleva el cristal a una temperatura próxima al punto de Curie, al tiempo que se le aplica un campo eléctrico fuerte. En estas condiciones, se produce una orientación de los dominios en la dirección del campo exterior. Una vez enfriado el elemento y anulado el campo, el cristal quedará con una polarización permanente. En estas condiciones, aplicando esfuerzos de deformación en el elemento, se producen variaciones de la distribución de cargas, de tal modo que esto da lugar a una aparición de tensión eléctrica en las caras del mismo. Este es un fenómeno reversible, de modo que la aplicación de tensión eléctrica entre las caras de un cristal, da lugar a la deformación de éste.

3. REALIZACIÓN DEL ESTUDIO

Los modos más usuales de trabajo de estos cristales son el modo de compresión y el de cortadura, para transductores de fuerza, presión y aceleración. La respuesta de estos cristales a esfuerzos de tracción se consigue sometiéndole a una precompresión inicial en su montaje.

En el modo de compresión, la carga es proporcionada en la dirección de polarización. Esto tiene la desventaja de que entradas que no se desean medir, como las fluctuaciones de temperatura, producen carga en la dirección de polarización, por lo que la salida del transductor no sólo es debida a la entrada de la magnitud a medir.

Sin embargo, cuando se utiliza el modo de cortadura, la proporcionada en una dirección perpendicular a la de polarización, y la carga extra proporcionada por fluctuaciones de temperatura, no contribuye a la salida del transductor.

3.3.3 El estátor

El estátor es la unidad que permite la emisión y recepción de datos del sistema de medida; como su nombre indica, permanece fijo al cabezal de la fresadora, teniendo que mantener una distancia de separación con el dinamómetro de 1 ó 2 mm, para que la comunicación entre ellos sea correcta, en caso contrario el acondicionador de señal nos dará un mensaje de error por medio de un LED rojo.

Una precaución que hay que tomar con los cables del sistema de medida, es no acercarlos en exceso a cables de alta tensión, para evitar que interferencias electromagnéticas alteren las medidas, por ello debe evitarse en lo posible hacerlos pasar cerca de los motores de accionamiento o el cuadro eléctrico de la máquina, así como cualquier otra fuente que sospechemos que nos va a inducir error en nuestras medidas.

En ocasiones incluso el propio acondicionador de señal nos avisa del error, por medio del LED rojo del panel frontal; una vez que cambiemos de posición los cables debe encenderse el indicador verde.

3.3.4 El acondicionador de señal

La función del acondicionador es dar una señal de salida en tensión proporcional a la carga de entrada, que a su vez es proporcional a la fuerza aplicada al dinamómetro. La señal de tensión de salida está acondicionada para su entrada en la tarjeta de adquisición o en cualquier otro instrumento de medida. El amplificador de carga es de cinco canales, para las fuerzas, el momento y zoom.

La señal de salida del acondicionador es una señal en tensión de valor $\pm 10V$ como consecuencia de tratarla por una serie de multiplexores y un filtro pasa bajos, y es transportada al exterior para su posterior adquisición en la tarjeta (Wavebook).

3. REALIZACIÓN DEL ESTUDIO

El panel frontal del acondicionador tenemos los mandos que manejamos para las mediciones. Podemos verlo representado en la Figura 3.6:



Figura 3.6. Acondicionador de señal KISTLER

En el interruptor 1 podemos seleccionar el rango de medida. El rango I (Coarse Range) nos da el máximo rango de medida y la sensibilidad menor. Este rango será útil cuando pretendamos medir fuerzas de gran magnitud y sobre todo cada vez que vamos a hacer una nueva medida en la que desconocemos la magnitud de las fuerzas de corte, una vez que hemos hecho una medida de prueba en el rango 1 y hemos visto la magnitud de las fuerzas, podríamos decidir pasamos al rango II (Fine Range) si las fuerzas de corte son pequeñas, pues este rango es más apropiado en ese caso.

La diferencia que tenemos entre el rango I y el rango II, es que en el rango II tenemos una sensibilidad 10 veces mayor, y por lo tanto el rango de medida de fuerzas es 10 veces menor (Tabla 3.1). Por tanto el Rango II es útil para fuerzas menores puesto que nos proporciona una mayor resolución.

El interruptor número 2 tiene dos posiciones: Operate (activo) y Reset (puesta a cero). Antes de realizar cualquier medida habrá que accionar este último con el fin de eliminar cualquier corriente residual que permanezca en el sistema, de medidas anteriores. Este interruptor actúa sobre los canales de fuerza (las tres componentes) y del momento.

El interruptor número 3 tiene la misma función pero para el canal de zoom (canal 5), el cual nos permite medir en un rango 10 veces menor del que tendríamos sin activar el zoom, y es aplicable a los canales F_x , F_z y M_z (solamente a uno de ellos

3. REALIZACIÓN DEL ESTUDIO

por medida) mediante el interruptor 4. Como antes, si vamos a medir utilizando el canal de zoom, habrá resetearlo para eliminar corrientes residuales.

Los LED 5 y 6 nos indican cuando la comunicación entre el dinamómetro y el estátor es correcta o no lo es. En caso de que la emisión y recepción sea correcta, se enciende el LED verde, en caso contrario se enciende el rojo. En este último caso debemos revisar que la separación entre estátor y rotor no sea excesiva, la correcta es entre 1 y 2 mm; además habrá que procurar que la caja negra que hay al final del estátor, no se vea afectado por campos magnéticos grandes, provenientes del armario eléctrico de la máquina o de una instalación exterior.

Con el número 7, podemos ver un LED rojo que nos indica que tenemos una conexión remota controlada (ordenador) por medio de un interface RS-232.

En el panel trasero encontramos el interruptor, las entradas para la conexión de las señales, alimentación y canales de salida de datos.

3.3.5 Sistema de adquisición de datos

La tarjeta de adquisición de datos empleada es una tarjeta Wavebook/ 512 (Figura 3.7), que es una tarjeta de 12 bits que nos permite tomar hasta 1 millón de muestras por segundo, para el conjunto de los canales que tengamos seleccionados. Esta tarjeta permite tomar datos de 8 canales simultáneamente, de entrada unipolar o bipolar y está específicamente diseñada para aplicaciones que requieren de alta resolución y/o alta velocidad de muestreo como pueden ser ensayos acústicos con varios canales, medida de vibraciones de alta frecuencia, medida de emisión acústica, etc.

La tarjeta puede ampliarse, con módulos de expansión adicionales de 8 canales (WBK-10), hasta sumar un total de 72 canales (en nuestro caso tenemos un módulo de expansión, con un total de 16 canales como se observa en la Figura 3.7). Estos módulos de expansión, tienen 8 canales de entrada analógicos, cada uno de ellos equipado con un amplificador de ganancia programable mediante software, que controla además la frecuencia de corte y el tipo de filtro.

El control de los datos adquiridos se realiza por medio de ordenador, mediante el programa DasyLab, que a su vez se empleara para el tratamiento de datos. La conexión entre la tarjeta Wavebook y el ordenador se realiza a través de un puerto Fast EEP.

3. REALIZACIÓN DEL ESTUDIO

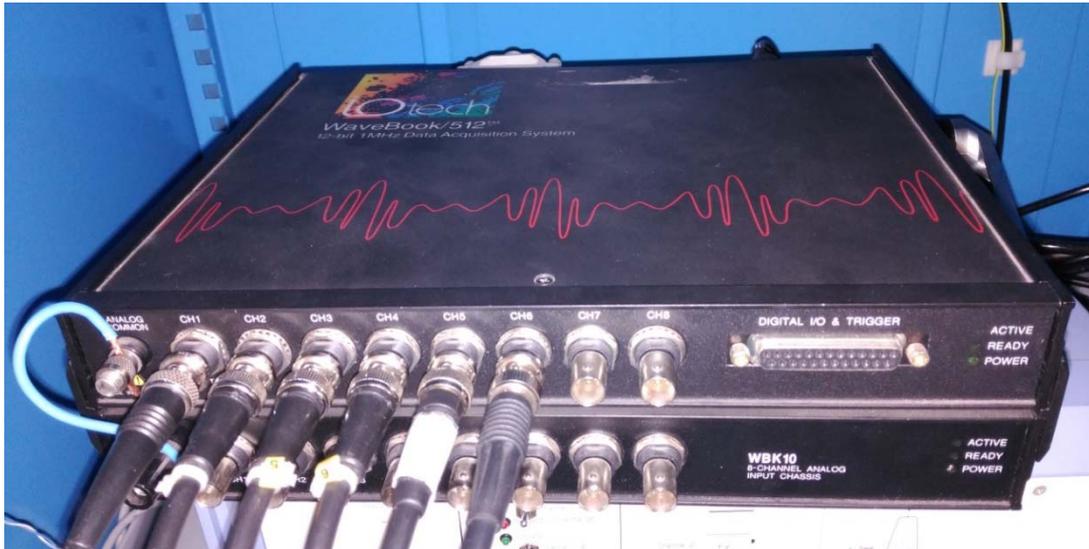


Figura 3.7. Tarjeta de adquisición de datos Wavebook/ 512 y módulo de expansión.

3.3.6 Tratamiento de datos mediante ordenador

Una vez obtenidos los datos finales, se analizan y relacionan entre sí y con otros parámetros mediante el software *DasyLab*. Este software es capaz de recopilar, procesar y guardar datos a alta velocidad para poder realizar una simulación de los mismos en cualquier momento para poder realizar un estudio más detallado. Así mismo, nos permite convertir dichos datos en otros formatos donde poder recopilarlos o estudiarlos más cómodamente como puede ser archivos Excel. Este programa posee diferentes módulos, de los cuales usaremos tan solo una pequeña parte.

En la pantalla principal se observan barras de tareas comunes en Windows, botones de arranque y pausa y comandos que nos muestran diferentes estructuras de las secuencias programadas, como son la ventana de diagrama de análisis (*Flowchart*) o la ventana de visualización de datos (*Layout*). Después vemos unas barras de iconos de acceso rápido, cada uno capaz de realizar diferentes funciones que nosotros ordenamos y programamos para obtener el procesamiento y análisis de datos deseado.

Las funciones de los comandos de acceso rápido abarcan desde la adquisición de datos desde la tarjeta Wavebook y su grabado y almacenamiento directo, hasta su posterior simulación, tratamiento (filtros, operaciones, correlaciones, etc.) y representación gráfica o numérica, facilitando su comparación y obtención de conclusiones. Todos estos comandos se pueden relacionar entre sí mediante sus entradas o salidas (cuyo número depende del comando empleado) gracias a lazos de unión que se pueden diversificar para enviar la misma señal a diferentes puntos de tratamiento, facilitando el análisis de los mismos en un mismo archivo.

3. REALIZACIÓN DEL ESTUDIO

3.3.7 Microscopio y procesamiento digital de imágenes

Disponemos de un equipo capaz de adquirir, procesar y analizar las imágenes digitales (Figura 3.8.). El primer paso es la toma de imágenes mediante el uso de una correcta técnica, ajustando la luz visible y el enfoque mediante un microscopio óptico (podríamos emplear otras como luz infrarroja, microondas o rayos X) garantizando así la calidad de los resultados finales obtenidos. En nuestro caso, disponemos de una mesa de controles con la cual ajustamos la luz, el zoom y la posición en los ejes XY por medio de un joystick como se observa en la Figura 3.8.

La mayoría de los equipos toman señales analógicas que mediante un convertidor se obtienen imágenes digitales, como es en nuestro caso, donde la imagen se procesa a través de ordenador. Previamente puede existir un pre-procesado con el objetivo principal de reducción de ruido, la restauración de imágenes, mejora de la imagen y la eliminación de datos incorrectos, siendo en la etapa posterior de procesamiento donde tiene lugar la segmentación de la imagen de entrada, que se divide en regiones de interés de acuerdo con sus propiedades. La calidad, y por tanto la precisión de medida, viene dada por las características de la segmentación de imágenes (resolución del pixelado), así como de los medios empleados para su determinación.



Figura 3.8. Equipo de obtención y procesamiento de imágenes digitales.

Una vez obtenida la imagen procesada, el siguiente paso es la medición, siendo principalmente de distancia, perímetro, área o textura. Dicha medición se realizará por ordenador mediante el software *Deltec Vision*, que nos permitirá obtener la medida del diámetro máximo de delaminación de una forma suficientemente precisa para determinar el factor de delaminación (F_d) mediante las ecuaciones mostradas en el apartado 2.4.2, de las que emplearemos únicamente la

3. REALIZACIÓN DEL ESTUDIO

desarrollada por Chen W.C., la cual es la más usada en los estudios de delaminación.

$$F_d = \frac{D_{max}}{D_0}$$

Existen otros métodos computarizados más avanzados basados en redes neuronales artificiales capaces de escanear la imagen o radiografía en busca de la zona exfoliada. En el caso de radiografía, mediante un tratamiento con líquidos de contraste, resaltándola, y dando una medición precisa de sus dimensiones.

Es importante mencionar que mediante la metodología de medida empleada, no es posible determinar la existencia de delaminación interlaminar, la cual es más inusual y tiene lugar cuando las fuerzas de empuje son muy grandes. En nuestro caso consideraremos que su relevancia es de menor importancia puesto que las fuerzas de empuje no son excesivas. En el caso de querer determinar dicho grado de delaminación, se deberían emplear otro tipo de técnicas de medida como radiografías o ultrasonidos.

3.4 Metodología del ensayo

3.4.1 Herramientas

Para los ensayos se emplearon 2 tipos de brocas diferentes del fabricante Gühring:

- **Broca de acero rápido recubierta (HSCO1261):** Los Aceros Rápidos son aceros especiales de alto rendimiento con buena indeformabilidad, elevada dureza hasta los 500 °C y elevada resistencia al desgaste gracias a elementos de aleación como el tungsteno, molibdeno, vanadio y cromo, capaces de formar carburos. Para aumentar la dureza en caliente se puede añadir cobalto, como es el caso de esta broca, la cual posee un recubrimiento superficial de Co.

Con esta broca se pueden taladrar materiales especialmente duros y variados (durezas máximas de 1000N/mm²), siendo una broca universal de gran uso y efectividad; sin embargo no es especialmente apropiada para soportar la abrasión que producirá el corte de las fibras de carbono, por lo que sus resultados en estos tipos de materiales es de esperar que no sean tan buenos como los obtenidos con el metal duro.

Precio: 10.40 €



Figura 3.9. Broca Gühring HSCO1261

- **Broca de acero rápido recubierta (HSCO5524):** Esta broca es del mismo material y propiedades idénticas a la broca HSCO1261, variando únicamente la geometría, la cual esta referenciada a otra norma, teniendo como diferencia más notable el ángulo de la punta (118°) y una menor alma.

Precio: 10.40 €



Figura 3.10. Broca Gühring HSCO5524

3. REALIZACIÓN DEL ESTUDIO

En la Figura 3.11 se muestran las comparativas geométricas entre las brocas:



Figura 3.11. Comparativas brocas Gühring HSC01261 (izquierda) y HSC05524 (derecha).

A continuación se muestran características específicas de cada broca:

	HSC01261	HSC05524
Norma	DIN 1897	DIN1897
Tipo de broca	VA	GU500DZ
Acabado	BRILLANTE	BRILLANTE
Dirección de corte	HORARIO	HORARIO
Material	HSS-CO	HSS-CO
Refrigeración interior	NO	NO
Mango	CILÍNDRICO	CILÍNDRICO
Ángulo de punta	130°	118°
Tolerancia	h8	h8

Tabla 3.3. Características técnicas de las brocas. Fuente: [www. Gühring.com](http://www.Gühring.com)

3.4.2 Material

Emplearemos una placa de FC empleada en la industria aeronáutica como refuerzos en la fabricación de las alas, ofreciendo consistencia y rigidez a las mismas.

La placa tiene forma rectangular con las esquinas chaflanadas, y unas dimensiones de 290x140mm con un espesor uniforme de 4mm. Está compuesta de 3 capas de tejido de FC continuo y de tipo tafetán (Figura 2.4), con una inclinación de la dirección de las fibras de 45° con respecto a la placa inmediatamente inferior.

Entre las capas de FC tenemos una matriz termoestable tipo epoxi, que como se mencionó anteriormente, presentan muy buenas prestaciones de resistencia a tracción (en caliente o húmedo) del material compuesto y de dureza. Además, en la

3. REALIZACIÓN DEL ESTUDIO

fabricación aeronáutica es de gran importancia la precisión de las piezas, y esta resina poseen una buena adherencia y baja contracción durante la polimerización, permitiendo moldeos de alta calidad con buena tolerancia dimensional.

3.4.3 Realización del ensayo

Para maximizar el número de taladros a realizar se dibuja previamente al taladrado una matriz en la placa para situar las posiciones a mecanizar que serán programadas por CNC. En la Figura 3.12 se muestra un dibujo realizado por CAD en el que se representa la placa y la matriz. Mencionar que ya existía un taladro en el material del que disponíamos y por tanto la distribución de taladros evita aproximarse al mismo.

La separación entre centros de taladros se realiza siguiendo la norma de fabricación aeronáutica que estipula una distancia mínima de dos veces el diámetro (12mm), evitando la influencia de las discontinuidades originadas en el material por los taladros previos adyacentes. También se debe dejar una distancia de 3/2 del diámetro entre borde cortado-centro de taladro.

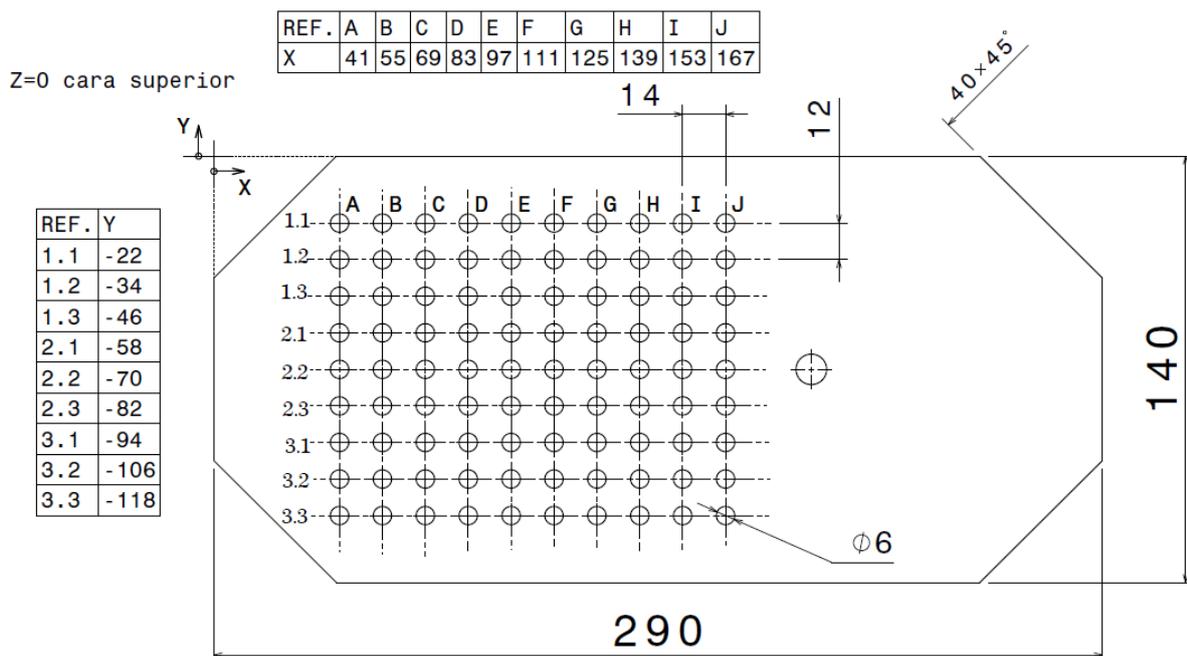


Figura 3.12. Distribución de los taladros en la placa.

Como se muestra en la Figura 3.12, realizaremos 3 filas de taladros (con un avance diferente cada una de ellas) para cada broca, es decir, existirán un total de 9 filas. Cada fila se dividirá en dos series de 5, realizando un total de 10 taladros para cada avance, tal y como se muestra en la Figura 3.13. De esta manera se podrá hacer un estudio comparativo (primera serie y segunda serie del avance V_{fi}) sobre

3. REALIZACIÓN DEL ESTUDIO

la influencia del desgaste de la herramienta y su influencia en el acabado y fuerzas de corte.

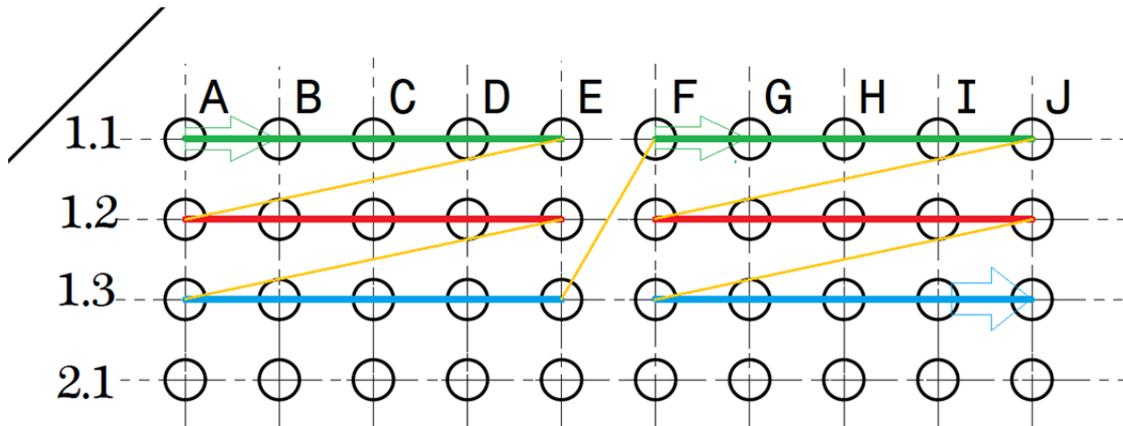


Figura 3.13. Recorrido de taladrado para cada broca.

Las líneas verdes se realizan con un avance intermedio o nominal (V_{fn}), las rojas con un incremento de +50% (V_{f+}) y las azules con un incremento del -50% respecto del nominal (V_{f-}).

Las brocas HSCO escogidas no tienen unas condiciones de corte específicas para nuestro material, por lo tanto nos apoyaremos en estudios anteriores con brocas de este tipo, los cuales demuestran que es apropiado emplear tanto velocidades de corte (10-20m/min) como avances reducidos (0.05-0.15mm/rev). En otros estudios consultados, el acabado superficial era considerado de mayor calidad para avances y velocidades de corte altas, por lo que se ensayara con una de las brocas en dichas condiciones.

A continuación se muestran las condiciones de corte escogidas:

		HSC05524	HSC01261 y HSC05524
Velocidad del husillo (rpm)		3240	865
Avance (mm/rev)	f_n	0.1	0.1
	f_+	0.15	0.15
	f_-	0.05	0.05
Velocidad de avance (mm/min)	V_{fn}	300	80
	V_{f+}	450	120
	V_{f-}	150	40
Velocidad de corte (m/min)		61	16
Diámetro (mm)		6	6

Tabla 3.4. Condiciones de corte.

3. REALIZACIÓN DEL ESTUDIO

3.4.4 Adquisición de datos

3.4.4.1 Software DasyLab:

Como ya se mencionó brevemente en el apartado 3.3.6, los datos son grabados y procesados mediante ordenador por medio del software DasyLab. El primer paso es su almacenamiento (para su posterior simulación y tratamiento) mediante el diagrama mostrado en la Figura .14, obtenidos los datos finales en sus unidades correspondientes.

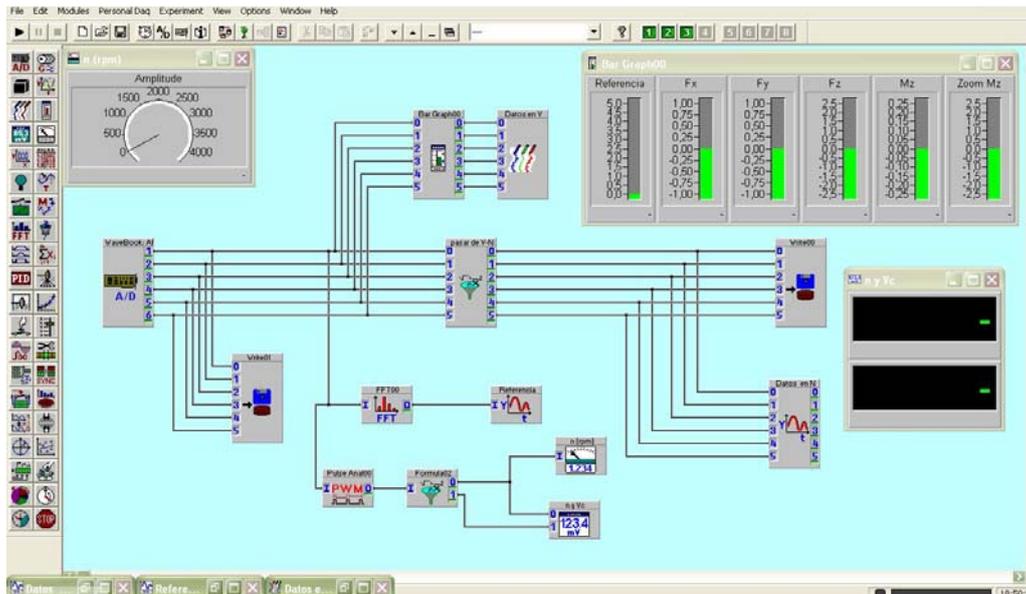


Figura 3.14. Configuración de módulos para adquisición de datos

A continuación se explican los módulos empleados en la toma de datos (Figura 3.15):

- **Módulo de adquisición de datos:** Permite la recepción de datos enviados de la tarjeta Wavebook/ 512, recogidos en los canales de entrada que sean necesarios. Las unidades de entrada son de tensión y su valor está contenido dentro un rango diferente para cada canal (Tabla 3.3), determinado previamente en ensayos de calibración, introduciendo en el programa los límites del rango en su canal correspondiente para controlar la saturación de los canales y evitar el deterioro del dinamómetro. En nuestro caso tendremos 6 canales:
 - 1. Referencia: Es un marcador del dinamómetro que envía una señal tipo pulso, con sus unidades en voltios, cada vez que el husillo da una vuelta completa. De esta manera se comprueba el correcto funcionamiento del sistema.
 - 2. F_x : Fuerza aplicada en el sentido X de nuestro S.R.
 - 3. F_y : Fuerza aplicada en el sentido Y de nuestro S.R.
 - 4. F_z : Fuerza aplicada en el sentido Z de nuestro S.R.

3. REALIZACIÓN DEL ESTUDIO

- 5. M_z : Momento generado en el sentido Z de nuestro S.R.
- 6. Zoom: Es un canal específico para ampliar la precisión de la señal de únicamente uno de los canales anteriores.

	ENTRADA	RANGO
Canal 1	Referencia	0 , -5 V
Canal 2	F_x	± 1 V
Canal 3	F_y	± 1 V
Canal 4	F_z	± 2.5 V
Canal 5	M_z	± 250 mV
Canal 6	Zoom	± 2.5 V

Tabla 3.5. Rangos seleccionados de las señales de entrada.

- **Módulo fórmula:** Puesto que la señal que llega es analógica con unidades de Voltios, es necesario transformar esos valores a las unidades reales de N y $N\cdot m$. Dicha transformación se realiza mediante correlaciones simples determinadas en la tabla de calibración del dinamómetro en la fila denominada “sensibilidad” (Tabla 3.1). Estos valores han sido calculados con exactitud en una calibración del dinamómetro previa e introducidos en ecuaciones independientes para cada canal, en un mismo módulo y con las unidades adecuadas en cada caso (ver ejemplo en Figura 3.15). Para el estudio se emplea siempre el rango de medida II, pues las fuerzas y momentos que aparecen son pequeños.

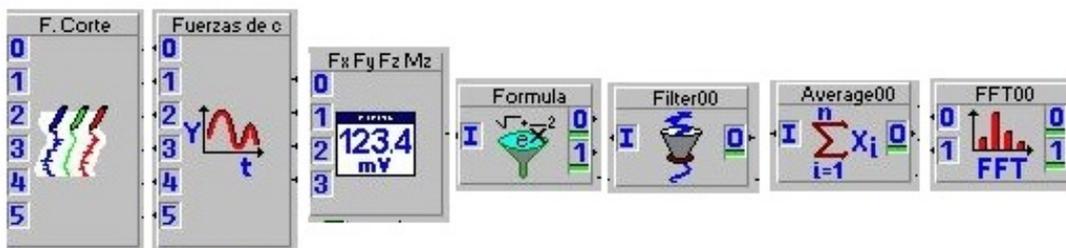


Figura 3.15. Algunos de los módulos empleados, por orden: Representación gráfica en función de la variable erguida, Representación gráfica $f(t)$, Visualización de valores numéricos, Fórmula, Filtro, Promedio, Transformada rápida de Fourier.

- **Módulo gráfica:** Mediante la entrada de uno o más canales, nos permite representar en una o diferentes gráficas los valores de entrada respecto del tiempo, permitiéndonos controlar y verificar la correcta evolución del proceso. Tenemos otro tipo de representación gráfica en la cual podemos optar por representar en función de la frecuencia o de otro tipo de variable.
- **Módulo barra:** Representación mediante valores numéricos exactos mostrados en una barra, permitiendo controlar la saturación de los canales más cómodamente (Figura 3.16).

3. REALIZACIÓN DEL ESTUDIO

- Módulo de grabación de datos:* Tas comprobar que todos los parámetros son normales, son grabados y almacenados en su canal correspondiente y en el mismo orden que transcurrieron en el tiempo para poderlos estudiar en el tratamiento de datos (los guardamos en formato “.AISII”). Recordamos que los datos guardados ya tienen sus unidades correspondientes, transformadas en el módulo fórmula.

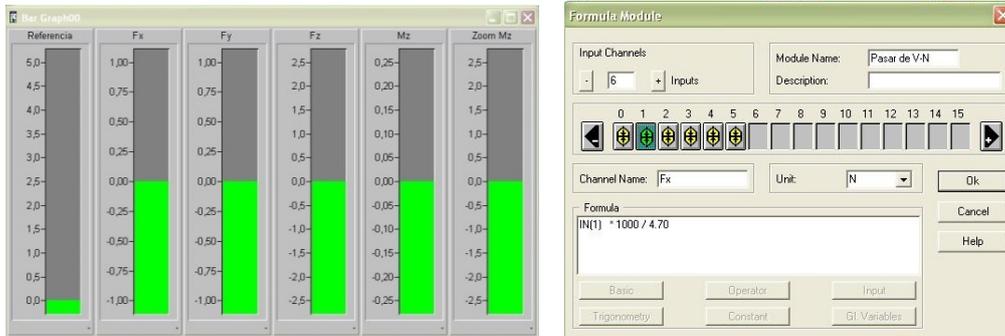


Figura 3.16. Visualización del módulo barra y configuración de F_x en el módulo fórmula.

Cabe mencionar que los módulos comienzan a numerar desde el 0, por lo que habrá que tener precaución a la hora de colocar los canales para tenerlos bien identificados.

3.4.4.2 Software Deltec Vision

La adquisición de las medidas de los diámetros de las zonas exfoliadas se realiza de forma sencilla sobre la imagen procesada. Este software computarizado dispone de diferentes comandos de medición, entre los cuales está el de circunferencia mediante la indicación de puntos de la misma. De tal manera que podemos marcar mediante un cursor un número X de puntos de la zona que delimita (escogimos 16 puntos bien distribuidos) y el programa nos dará los valores de su posición respecto el origen de coordenadas indicado (en nuestro caso carece de utilidad) y el valor de su diámetro mediante mínimos cuadrados, con un error correspondiente al punto más alejado del centro (Figura 3.17).

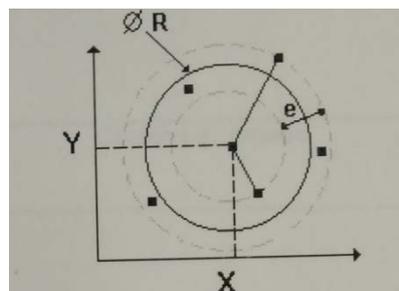


Figura 3.17. Error (e) y $D_{m\acute{a}x}$ (\emptyset) medido por Deltec Vision.

3. REALIZACIÓN DEL ESTUDIO

La visualización de los puntos marcados y las medidas se observan en pantallas diferentes como se muestra en la Figura 3.18.

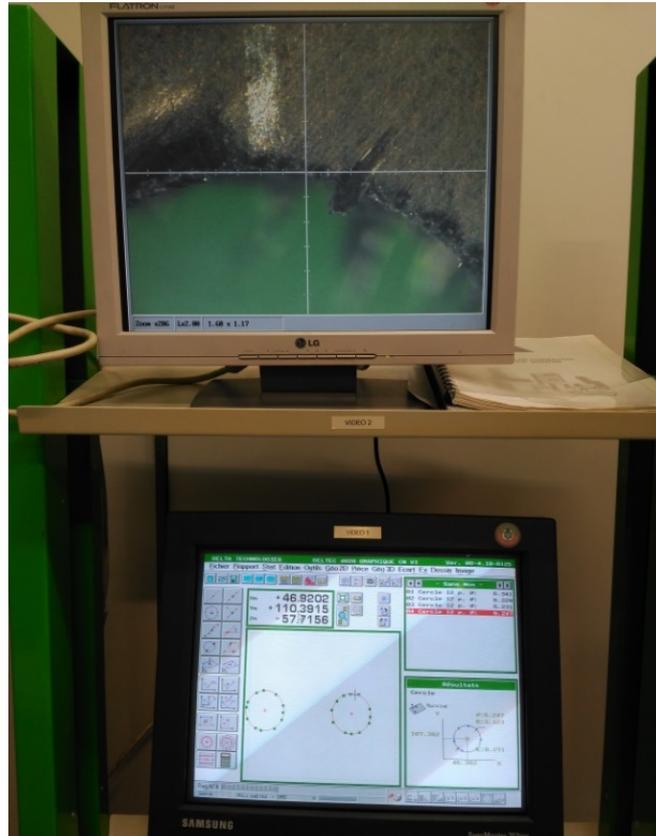


Figura 3.18. Realización de la medida.

Para el análisis se tomarán las medidas del diámetro nominal (el de la broca) y del diámetro de delaminación, para el cual se marcarán los puntos más alejados del centro del eje del taladro que presenten delaminación. Puesto que obtenemos directamente la medida final que buscábamos, estos datos no necesitan más procesamientos.

3.4.5 Tratamiento de datos

El siguiente paso es la creación de una nueva configuración en DasyLab en la que se añadirán los módulos necesarios que posibiliten un análisis correcto de los datos recogidos gracias a filtros, transformadas de Fourier y representaciones gráficas y numéricas (Figura 3.19).

3. REALIZACIÓN DEL ESTUDIO

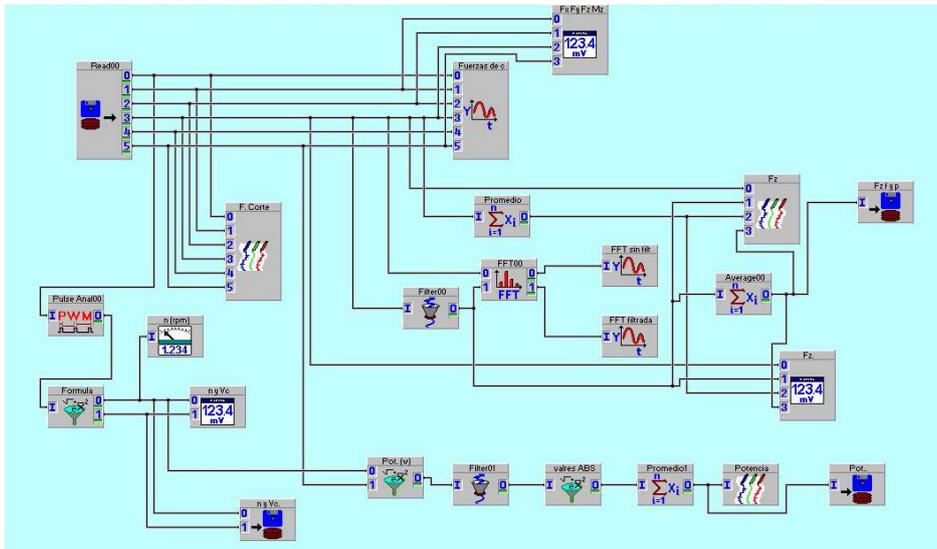


Figura 3.19. Configuración de módulos para el análisis de datos.

El primer módulo que colocamos es un lector de datos “Read” y seguidamente representaremos gráficamente las fuerzas de corte ya en Newton, haciendo hincapié en las fuerzas de empuje (F_z) pues son las de mayor interés en el taladrado, y por ello las procesaremos por un filtro pasa bajos y, por otro lado, por el módulo “average” que promedia todos los datos tomados, simplificando su análisis, pues se toman alrededor de 1000 datos por segundo en cada canal. Posteriormente se compararán los resultados de F_z obtenidos por cada camino.

Algunos de los módulos empleados ya se explicaron en la toma de datos, siendo los nuevos módulos los siguientes:

- **Módulo read:** Seleccionamos un archivo guardado con el esquema de tomad de datos y este módulo lo reproducirá tal cual ocurrió en el proceso real.
- **Módulo FFT:** Con este módulo podemos realizar la transformada rápida de Fourier, pasando del dominio del tiempo al de la frecuencia, simplificando los algoritmos de los datos y ofreciéndonos unos resultados más sencillos, libres de ruido y sin perder a penas información.
- **Módulo pulso:** La señal de referencia es un pulso generado con cada revolución del husillo. Cierta señal tiene cierto ruido que es eliminado e idealizado con este módulo, obteniendo una señal clara y repetitiva den el tiempo con la que determinar la velocidad de giro real del husillo.
- **Módulo filtro:** Nos permite procesar los datos mediante un filtro determinado con su debido número de orden. Nosotros emplearemos un filtro pasa bajos de orden 7, que elimina las altas frecuencias que distorsionan la señal (limitaremos a partir de 150Hz), ateniendo así unos resultados más claros para su lectura e interpretación.
- **Módulo average:** Los datos guardados en cada serie se cuentan por decenas de miles. Con este módulo podemos promediarlos y simplificarlos.

3. REALIZACIÓN DEL ESTUDIO

Para estudiar del proceso ensayado podemos visualizar de una manera más cómoda y ordenada todos los parámetros mediante una ventana Layout, la cual se configura para que muestre únicamente los datos y gráficas que nos interesen (Figura 3.20).

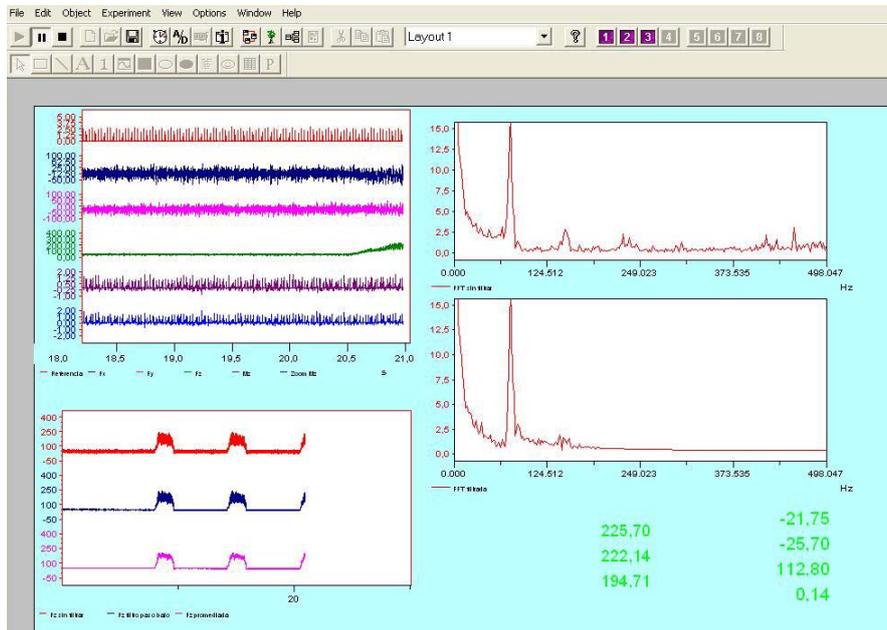


Figura 3.20. Visualización Layout.

Finalmente podemos guardar los datos en diferentes formatos. Nosotros hemos empleado el formato “.AISII”, que guarda los datos separados mediante “;” permitiendo posteriormente abrirlos en EXCEL para su estudio.

Finalmente en EXCEL, centraremos todas las gráficas en un origen común para poder comparar unas con otras debidamente. Así mismo se han ordenado las gráficas de cada serie siguiendo el orden en que se realizaron los taladros para facilitar su visualización. En la Figura 3.21 se muestran los datos de una misma serie antes, y tras su corrección.

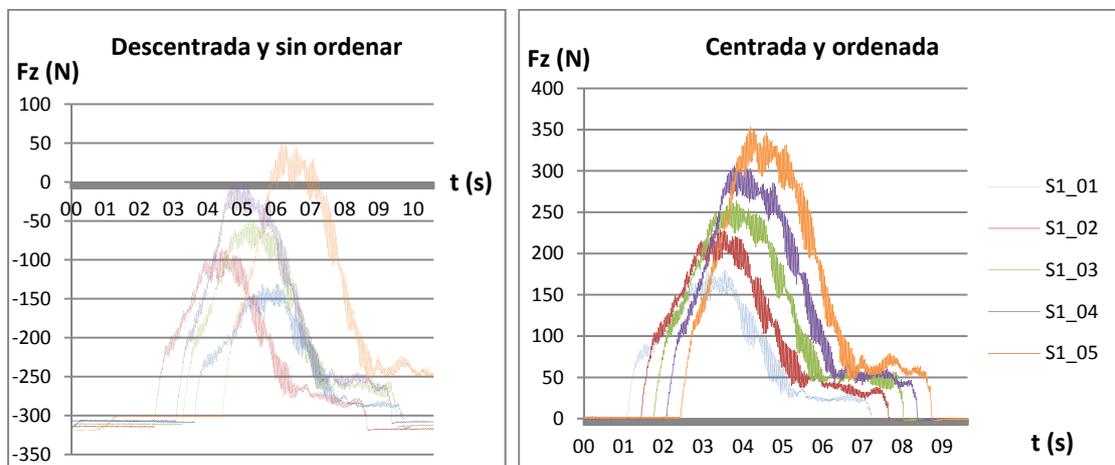


Figura 3.21. Datos obtenidos en una de las series de 5 taladros realizada.

3. REALIZACIÓN DEL ESTUDIO

3.4.5.1. Filtrado de señal

En la configuración de la fuerza F_z , se analizan los datos haciéndolos pasar a través de un filtro que elimina todas las señales por encima de 150 Hz, es decir, gran parte del ruido generado por el dinamómetro (genera ruido de frecuencias entorno a los 2400Hz) o vibraciones de la maquina es eliminado, obteniendo una señal más fiable y limpia.

Para comprobar la efectividad del filtro se visualizaran gráficas de la señal (F_z) sin filtrar y filtrada, haciéndolas previamente una transformada rápida de Fourier (FTT). De esta manera podemos ver como la señal en el dominio de la frecuencia sin pasar por el filtro, es inestable y presenta bastante ruido en frecuencias altas; sin embargo, la señal filtrada se es totalmente estable para frecuencias altas, destacando que existe cierto ruido que no ha sido eliminado y en concreto se puede ver como existe ciertos picos repetitivos, posiblemente generados por armónicos provenientes de la fresa, dinamómetro o broca. Estos picos en la señal sin filtrar se representan con más ruido aún, pues son intensificados por el ruido no eliminado (Figura 3.22).

De tal manera que podemos afirmar que la señal está correctamente filtrada y los valores de F_z que arroja son más cercanos a los reales que los de la señal sin filtrar.

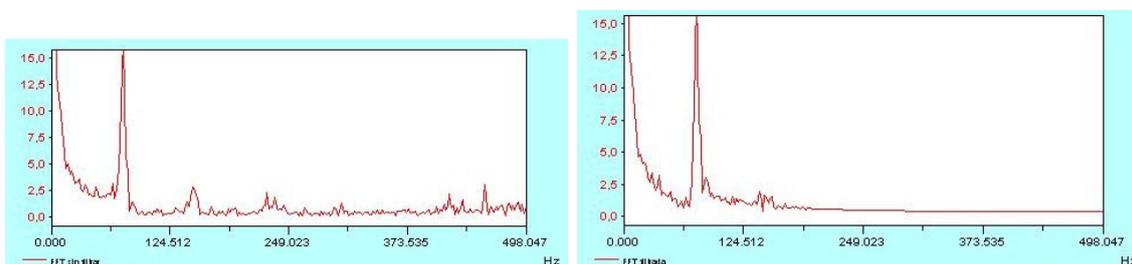


Figura 3.22. Comparación de la señal F_z en el dominio de la frecuencia (dcha. sin filtrar/izq. filtrada).

3.5 Ensayos previos

Antes de realizar los ensayos en la FC se probó a taladrar madera y duraluminio con una broca HSCO 1261 ya usada. En el ensayo de madera se verifico el programa de fresa y se tomaron datos para tantear la configuración de DasyLab.

Posteriormente se hicieron 5 taladros en duraluminio (Figura 3.23) y se tomaron datos para estimar los rangos de entrada en voltios, y de esta manera poder meterlos en el programa para la toma de datos en la fibra de carbono. Estos rangos deben ajustarse lo más posible a los valores máximos y mínimos (en voltios) que nos llega desde la tarjeta de adquisición de datos, pues si el rango es muy alto

3. REALIZACIÓN DEL ESTUDIO

tendremos poca precisión al visualizar los datos y si por el contrario se queda corto, existirán datos que se salen de la gráfica.



Figura 3.23. Ensayos en madera y duraluminio.

Para mayor seguridad, se analizaron los datos guardados de ensayos anteriores con las mismas brocas sobre FC y se estimaron los rangos tales que:

Referencia	F_x	F_y	F_z	M_z	M_z (zoom)
[0,5] V	$\pm 1V$	$\pm 1V$	$\pm 2.5V$	$\pm 250mV$	$\pm 2.5V$

Tabla 3.5. Rangos para toma de datos.

3.5.1. Problemas detectados

3.5.1.1 Ajuste del cero y variaciones en las medidas:

En ambas pruebas se detectaron irregularidades en la medición de fuerzas debido posiblemente al desgaste de los materiales piezoeléctricos del dinamómetro, generándose ciclos continuados de histéresis que provocaban el aumento progresivo de los valores tomados. Este aumento era notable cuando se reseteaban los canales y se acto seguido se tomaban medidas.

En la Figura 3.24 se observa dicho aumento en F_z durante el ensayo de duraluminio.

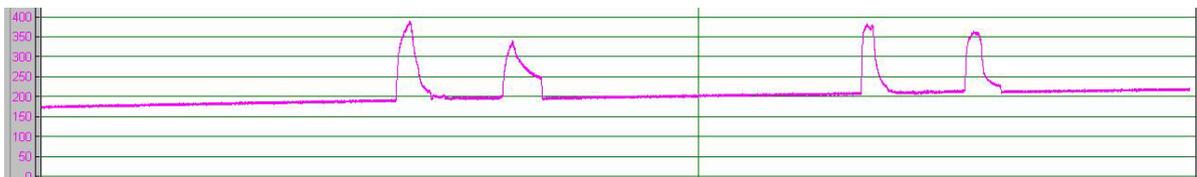


Figura 3.24. Incremento en F_z en ensayos de duraluminio.

Una vez realizadas varias muestras sin resetear los canales, los valores de las fuerzas obtenidas no eran nulos cuando el husillo giraba al vacío pero sus valores eran más estables al realizar sucesivos taladros. Para evitar en la medida de lo

3. REALIZACIÓN DEL ESTUDIO

posible las variaciones provocadas por el deterioro del dinamómetro, se optó por no resetear los canales después de cada medida. Ello supone que las fuerzas de corte no se situarán en 0 al iniciar la medición, pero no supone mayor problema ajustar el origen en 0 mediante EXCEL.

Aun reseteando con el husillo girando, siempre había problemas a la hora de ajustar el cero, seguramente debido a que los ciclos de histéresis aumentarían rápidamente para dar valores mayores a los correspondientes, desajustando el cero y obteniendo valores de unos 100N en F_z con el husillo girando al vacío (a 3000rpm, si son velocidades menores se alejara menos del cero), cosa que habría que corregir en EXCEL igualmente. En la Figura 3.25 se puede ver el origen en 100N (habiendo reseteado pocos segundos antes los canales con el husillo girando) y el incremento de unos 25N por taladro debido a los ciclos de histéresis del dinamómetro.



Figura 3.25. Origen en 100N al resetear con el husillo girando.

Cabe señalar que si el reset de canales se realiza con el husillo parado, una vez que comienza a girar al vacío se obtienen los valores para F_z aún mayores de los 100N.

3.5.1.2. Problemas con el programa TNC:

Durante el taladrado, se realizaba una parada entre taladros para tomar datos taladro a taladro y evitar problemas a la hora de analizar demasiada cantidad de datos del tirón. Al realizar la parada, se paraba el husillo y, al reanudarse para realizar el siguiente taladro, para las series en las que el avance era alto (HSC05524 a 3000rpm en V_{f+} y V_{fn}), no se dejó suficiente distancia de seguridad para que se alcanzara velocidad del husillo programada antes de comenzar a penetrar la FC. En la Figura 3.26 se observa como la fuerza F_z no alcanza un valor estable (en este ejemplo corresponde a unos 90N) antes de iniciarse el taladrado.

3. REALIZACIÓN DEL ESTUDIO

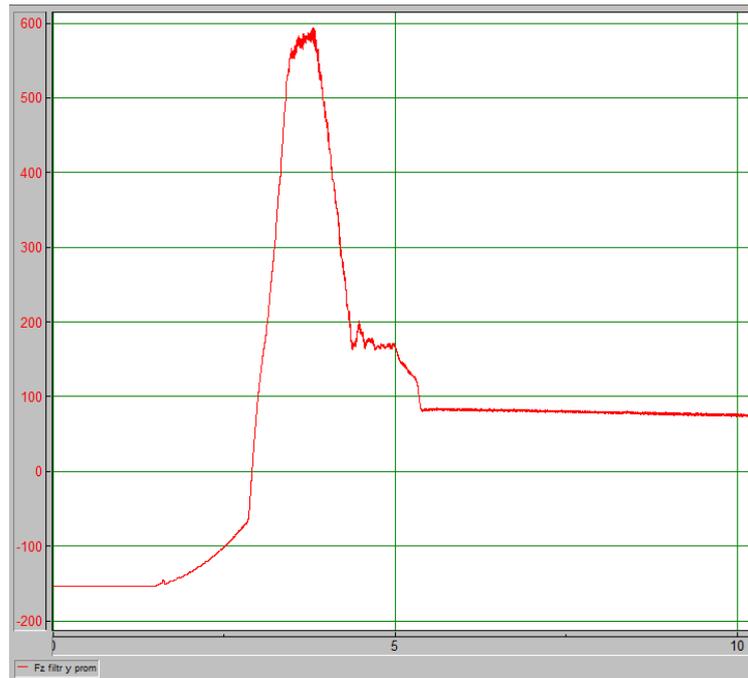


Figura 3.26. Taladro realizado antes de alcanzar la velocidad de giro.

Se detectó un cambio brusco en la fuerza en torno a -40N que corresponde al inicio de penetración de la punta de la broca. Si se hubiera operado de forma correcta, este cambio brusco se debería producir cuando el husillo alcanzara la velocidad programada (situándose en un valor estable de unos 90N).

Puesto que el tiempo más crítico necesario para haber alcanzado la velocidad programada es de 3 décimas de segundo (en V_{f+}), no lo consideraremos como un factor influyente en los resultados.

3.5.1.3. Elección de tratamiento de datos:

Después de la configuración del tratamiento de datos se extrajeron los valores de F_z , pues son los realmente útiles en este estudio. Inicialmente se compararon y analizaron de 3 maneras:

- F_z tal cual es tomada por la tarjea de adquisición de datos.
- F_z filtrada mediante un filtro pasa bajos de orden 7.
- F_z promediada aritméticamente. Dicho promedio consistía en tomar una medida y promediarla con las 80 medidas más próximas por arriba y por debajo de ésta, obteniendo el mismo número de medidas que teníamos inicialmente y una gráfica más legible y sin perder información.

Tras su estudio, se probaron varias configuraciones y finalmente se optó por filtrar las señales con el mismo filtro y posteriormente promediarla, usando esta vez solo 30 medidas para la media de cada medida. Una vez modificado en DasyLab,

3. REALIZACIÓN DEL ESTUDIO

obtenemos una gráfica clara y fiable, libre de gran parte de ruido del dinamómetro y sin perder información (Figura 3.27).

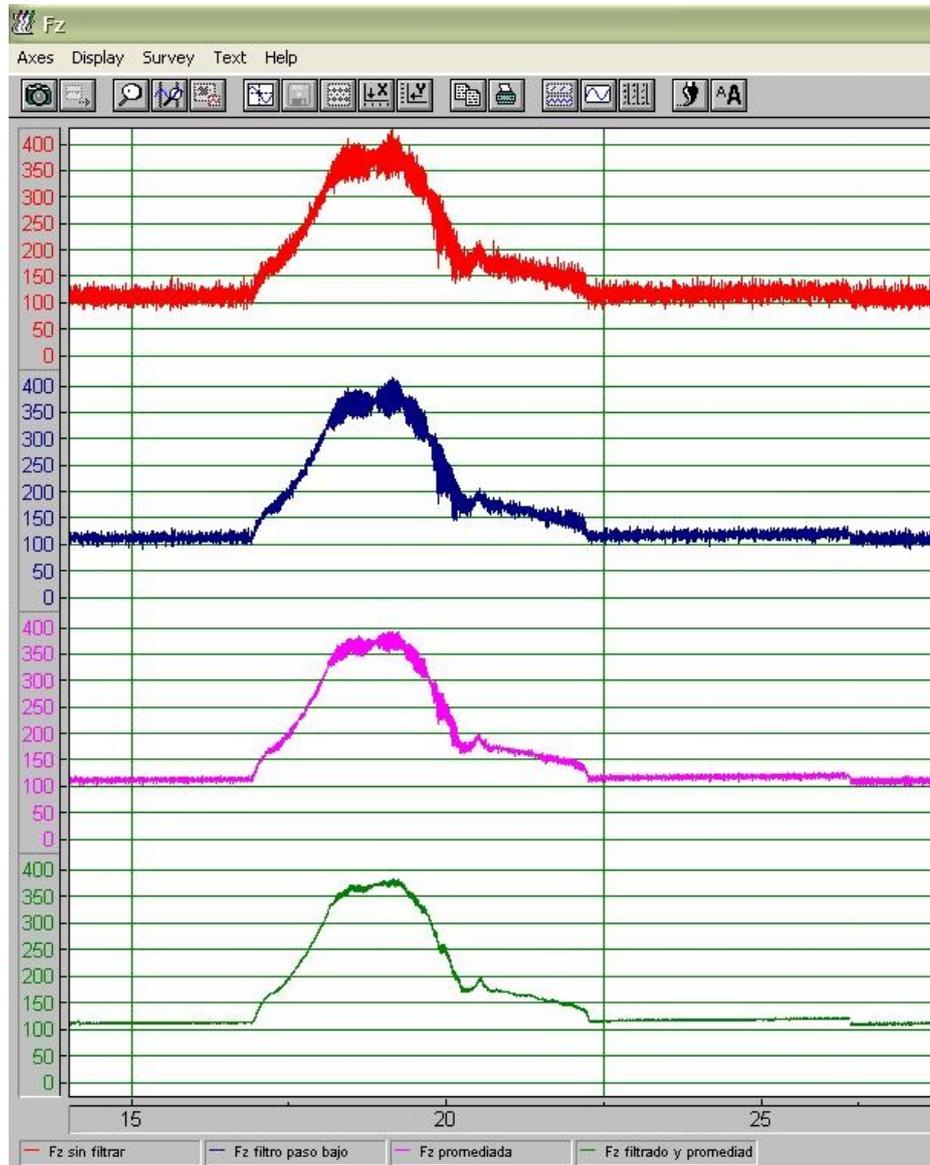


Figura 3.27. Comparación de Fz con diferentes tratamientos (Rojo: sin filtrar, Azul: Filtrada, Morado: Promediada, Verde: Filtrada y promediada).

3.5.1.4. Medida de potencia:

Puesto que las fuerzas de corte son relativamente pequeñas, el par generado también lo es y lo mismo ocurre con la potencia, resultando difícil de determinar puesto que tanto las fuerzas en los ejes X e Y como el momento medido son pequeños e irregulares. Finalmente se logró obtener un gráfico de potencia a partir del cálculo mediante el momento tras filtrar y promediar. Pese a todo, la señal seguía teniendo bastante ruido resultando difícil ofrecer un estudio fiable con dichos datos, por lo que fueron descartados.



3. REALIZACIÓN DEL ESTUDIO

3.5.1.5. Velocidad del husillo:

La velocidad de giro que mediamos a través del dinamómetro era del orden de 7-8% mayor a la introducida en el programa de la fresadora. Puesto que el proceso en el dinamómetro es de contar vueltas por segundo, y en principio no tiene por qué dar valores erróneos, daremos como válida dicha medida a la hora de exponer las velocidades de corte que se emplearon.

En la Tabla 3.4 muestra las condiciones de corte determinadas a partir de los datos medidos (reales).

También se detectó un fallo al medir la velocidad de giro del husillo, pues los datos tomados eran la mitad de la velocidad real, obteniendo una velocidad de avance también de la mitad, lo cual suponía que el tiempo de mecanizado era el doble del real ($V_f = n \cdot f$). Dicho error se corrigió en Excel.

El origen de este fallo de medición es desconocido pero seguramente fuera causado por un error en la configuración de DasyLab.

4. RESULTADOS

4.1. Introducción

A continuación se expondrán de forma ordenada e ilustrada los datos obtenidos, realizando anotaciones en aquellos detalles observables y relevantes, deducidos de las representaciones gráficas, análisis porcentuales, comparaciones entre series, etc.

La principal línea de exposición de resultados es el estudio de las fuerzas de corte para cada broca y avance y su comparación entre sí. Para las mismas condiciones de corte se compararán series alternas, determinando la influencia del desgaste: Primeramente entre 5 taladros consecutivos y posteriormente entre otros 5 taladros que se realizan alternativamente a los 5 anteriores, cuando la herramienta ya haya realizado un total de 15 taladros.

El segundo estudio se lleva a cabo con los datos obtenidos en el microscopio óptico (cadena de medida 2) con el fin de observar y cuantificar el daño producido para cada velocidad de corte y, al haber realizado taladros alternos con las mismas condiciones de corte, podremos definir las consecuencias del desgaste de la herramienta en el acabado. Puesto que obtendremos valores numéricos que cuantifiquen el daño, será posible comparar y determinar qué brocas y qué condiciones de corte son óptimas (entre las elegidas).

También se relacionará el daño por delaminación con las fuerzas de empuje, teniendo en cuenta las condiciones de corte y el desgaste de la herramienta.

Recordamos las condiciones de corte (mostradas anteriormente en la Tabla 3.4), a las cuales mencionaremos en adelante como 800 y 3000rpm, valor programado pero que no correspondía con el valor real medido:

		HSC05524 (3000rpm)	HSC05524 (800rpm) y HSC01261
Velocidad del husillo (rpm)		3240	865
Avance (mm/rev)	f_n	0.1	0.1
	f_+	0.15	0.15
	f_-	0.05	0.05
Velocidad de avance (mm/min)	V_{fn}	300	80
	V_{f+}	450	120
	V_{f-}	150	40
Velocidad de corte (m/min)		61	16
Diámetro (mm)		6	6

Tabla 3.4. Condiciones de corte.

4. RESULTADOS

4.2. Fuerzas de corte: Resultados

La fuerza de principal estudio es la de empuje o F_z , pues el valor de F_x y F_y son poco significativos y no resultan de gran interés en este estudio. Por lo tanto la señal recibida de F_z es tratada, como ya se desarrolló con anterioridad, obteniendo las gráficas descentradas (cuyo motivo se explica en el apartado 3.5.1. *Problemas detectados*) que serán centradas y ordenadas. Su representación se hace en función del tiempo en segundos (por cada segundo están recogidos 2000 datos en cada canal).

A continuación se mostrarán los resultados ordenados por brocas, velocidades de corte y series. Para la primera broca se desarrollarán y explicarán los resultados más detalladamente y en las posteriores sólo se mostrarán los resultados y menciones concretas de las series, pues a efectos generales las fuerzas de empuje de las tres brocas siguen un tendencia similar pero con diferentes valores.

❖ Representación gráfica de F_z

En todas las gráficas de F_z expuestas se observa un mismo patrón que se explicara a continuación: Sube desde el cero (husillo girando al vacío), llega a un pico máximo, desciende bruscamente, se mantiene a unos 50-150N por encima del cero y finalmente desciende hasta el cero.

En las primeras décimas de segundo, la subida tiene algo más de pendiente correspondiente a la penetración de la punta de la broca. Después sube progresivamente a medida que la broca penetra y se requiere más fuerza de empuje hasta llegar a un máximo en el cual se mantiene “estable” hasta que se ha atravesado prácticamente por completo la FC. Justo antes de atravesarla por completo, es necesaria una menor fuerza debido a que no existe continuidad en el material por debajo, y es en esa zona donde comienza a decrecer la gráfica. El descenso es progresivo hasta que se atraviesa por completo la FC y es entonces cuando la broca se topa con la madera que se situó debajo para evitar flexiones de la FC. Finalmente, la F_z se mantiene estable en torno a 50-150N (según desgaste de herramienta), correspondiente a la fuerza de empuje empleada para taladrar la madera hasta 4 mm, asegurando que la broca perfora por completo la FC.

Todas estas etapas son posibles de delimitar en la gráfica mediante cálculos sencillos de tiempo que se realizarán solamente en el gráfico de la Figura 4.1 como ejemplo.

Puesto que las gráficas no se han ajustado al cero en el eje X (para facilitar su visualización), los tiempos calculados en este apartado se contabilizarían en incrementos, justo desde el momento en el que la punta de la broca incide sobre el material (momento en el que la gráfica tiene valor no nulo en F_z):

4. RESULTADOS

- *Penetración de la punta:* En este caso (ángulo de 118°) la longitud vertical de la punta es de unos 1.8mm y el avance es de 80m/min, por lo tanto: $t=1.8/(80/60) = 1.3s$. El tiempo que tarda en penetrar únicamente la punta es de 1.35 segundos [2].
- *Momento en el que la punta de la broca toca la madera [4]:* Puesto que la profundidad de la lámina de FC es de 4mm, del mismo modo que antes, calculamos un tiempo total de 3 segundos. Podemos ver que para este instante de tiempo el descenso de F_z ya ha comenzado, y es debido a la no continuidad de material de FC justo antes de atravesar la punta.

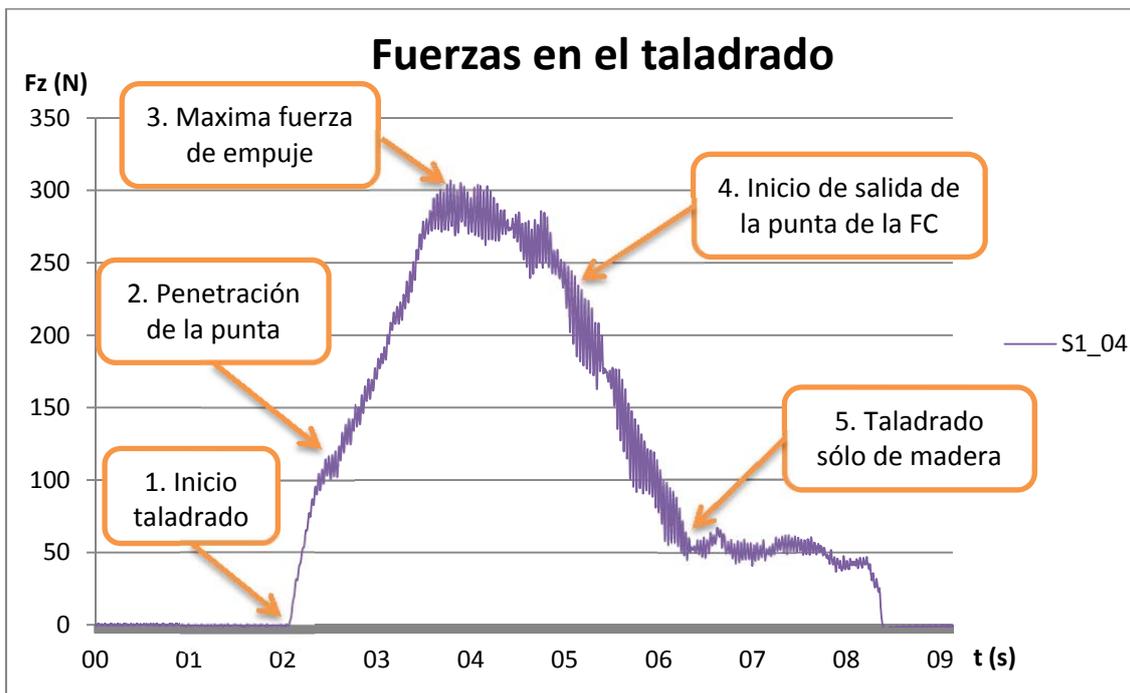


Figura 4.1. Fases del taladrado (Ejemplo serie 1, taladro 4)

- *Taladrado completo de la FC:* La profundidad que se debe alcanzar es de 4mm correspondientes al espesor, más 1.8mm de longitud de la punta, es decir que tendremos un tiempo de 4.35 segundos. Justo en este instante la fuerza de empuje toma un valor aproximadamente constante debido a que únicamente está mecanizado la madera [5].
- *Transición FC-Madera:* Corresponde a los intervalos de tiempo ya calculados de [3, 4.35]s, momento en el que desciende bruscamente el valor F_z a medida que se deja de taladrar la FC y se comienza a taladrar la madera.
- *Final de taladrado:* Por último, la profundidad programada total fue de 8mm, por lo que el tiempo de mecanizado total debe ser de aproximadamente 6s. Los resultados muestran algunas décimas de segundo de más debidas posiblemente a imprecisiones de la fresadora al

4. RESULTADOS

programar la velocidad de avance, al igual que ocurría con la velocidad del husillo.

A la vista de los cálculos realizados, se demuestra la coherencia de los datos tomados con las velocidades de avance programadas, pudiendo realizar este mismo procedimiento con las demás series.

4.2.1 Broca HSC05524 (800rpm)

En la Figura 4.2 se muestran las gráficas de la fuerza de empuje media de cada serie realizadas con esta broca. Para facilitar la visualización se diferencian las velocidades de avance por colores:

- V_{fn} : Azul.
- V_{f+} : Verde.
- V_{f-} : Marrón.

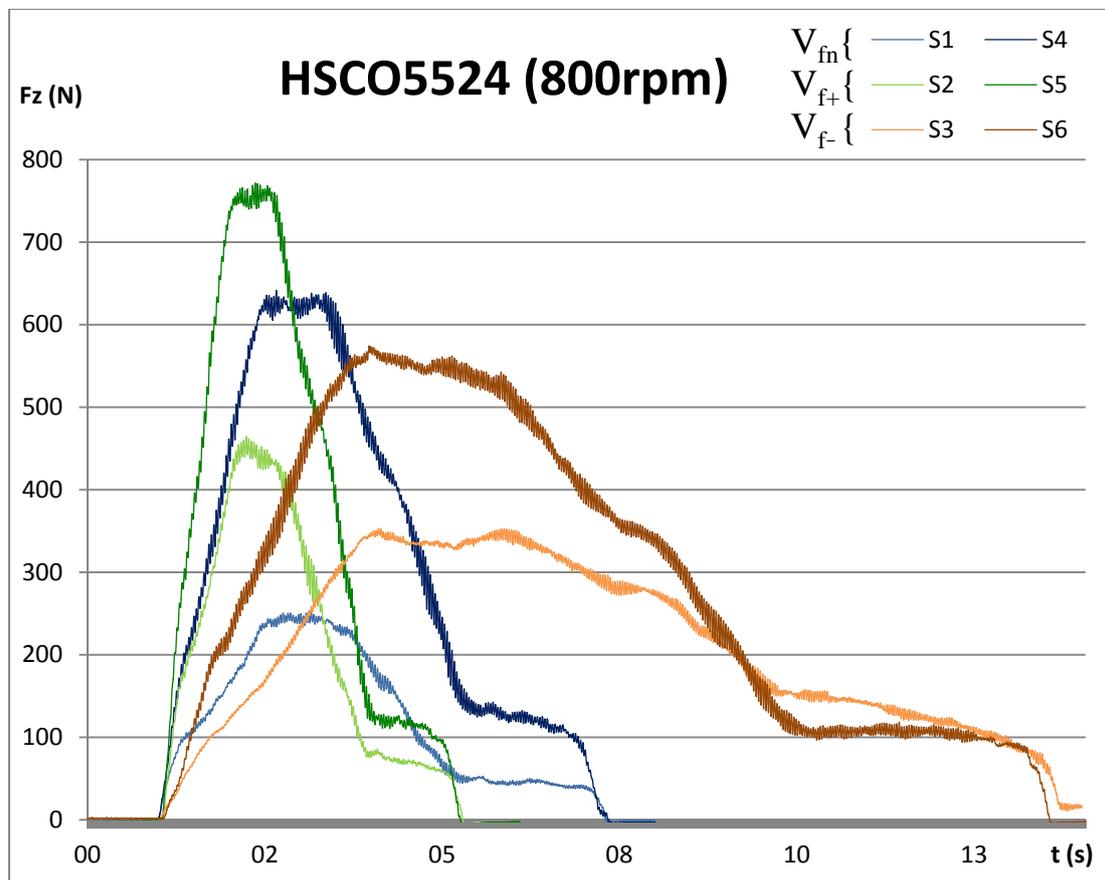


Figura 4.2. Promedios de las series con broca HSC05524 (800rpm).

De estos resultados podemos ya afirmar a primera vista que el desgaste de la herramienta es muy acusado debido a la gran diferencia de fuerzas existente entre las series con las mismas condiciones de corte (realizadas alternativamente).

4. RESULTADOS

El mayor incremento se puede intuir entre la primera y cuarta serie y el menor entre la tercera y sexta. Así mismo es destacable como la serie 1 (avance nominal) presenta menores fuerzas que la serie 3 (avance bajo), mientras que para las series 4 y 6, de iguales avances respectivamente, ocurre lo contrario. Esto únicamente es explicable de nuevo por el desgaste, pues si se ensayara con dichos avances con brocas independientes y nuevas, para avances bajos la fuerza de empuje sería en todo momento menor.

4.2.1.1 Velocidad de avance nominal " V_{fn} " (series 1 y 4)

Se mostrarán las series 1 y 4 (Figuras 4.3 y 4.4), con condiciones de corte idénticas pero realizando la cuarta serie con un desgaste de herramienta mayor. Posteriormente se mostrarán comparativas numéricas y porcentuales de ambas series respecto de la máxima fuerza de empuje de cada taladrado (Tabla 4.1). Las comparaciones porcentuales se realizaron respecto al taladro inmediatamente anterior y entre taladros realizados alternativamente (entre ambas series):

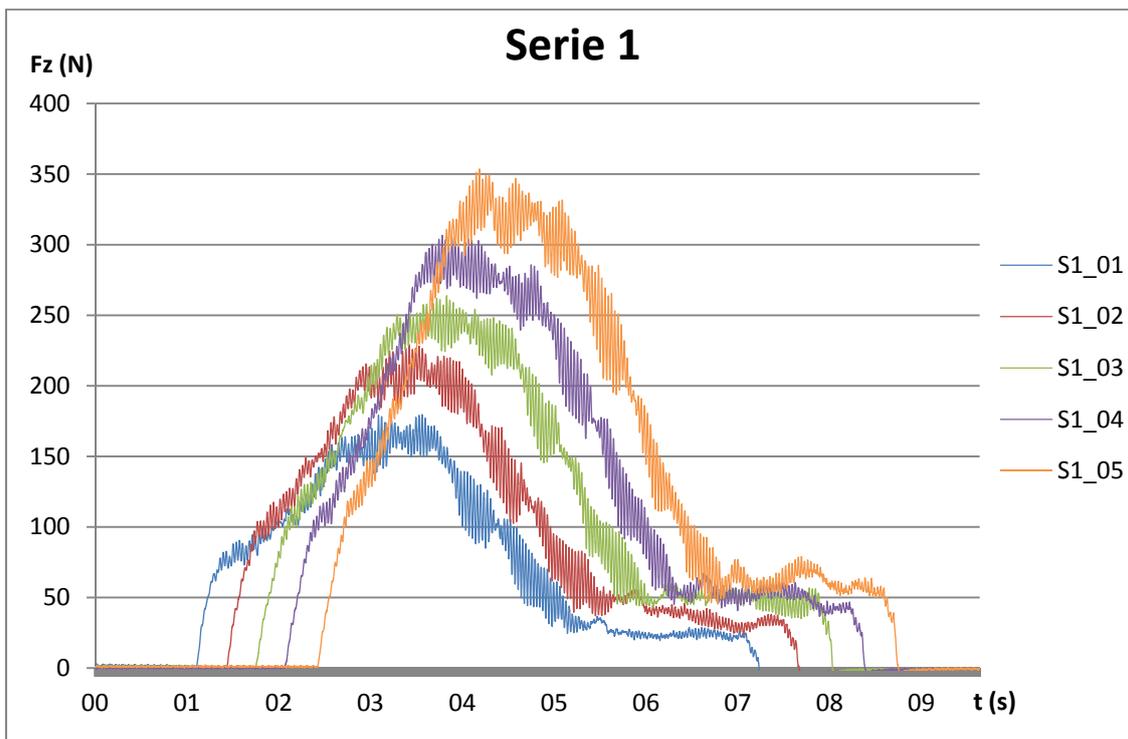


Figura 4.3. Serie 1 HSC05524 (800rpm).

4. RESULTADOS

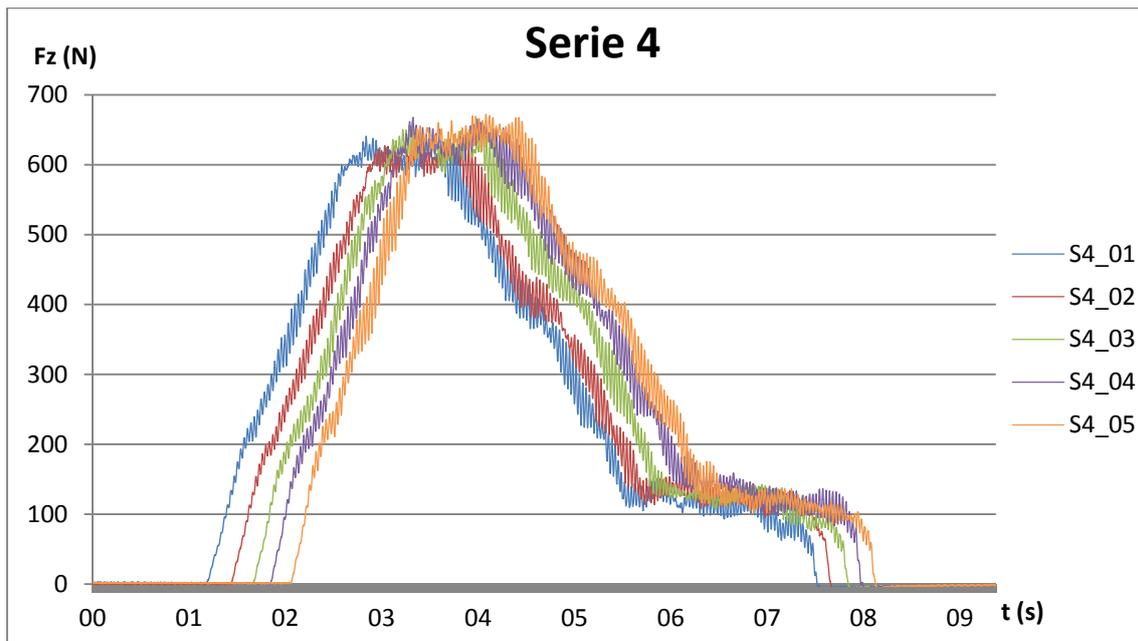


Figura 4.4. Serie 4 HSC05524 (800rpm).

Serie	S1_01	S1_02	S1_03	S1_04	S1_05	S4_01	S4_02	S4_03	S4_04	S4_05
Máximo	179,6	229,1	263,9	306,6	353,6	640,9	632,8	659,4	667,7	672,0
Incremento	-	27,55%	15,20%	16,19%	15,32%	-	-1,26%	4,20%	1,25%	0,65%
	Incremento respecto a S1_01					256,82%	176,22%	149,86%	117,73%	90,03%

Tabla 4.1. Comparativa $F_{Zmáx}$ series 1 y 4 HSC05524 (800rpm).

NOTA: Puesto que para cada serie de 5 taladros las condiciones de corte no varían, el único condicionante que produce variaciones importantes en las fuerzas de empuje es el desgaste de la herramienta. Por lo tanto, dichas variaciones porcentuales de la fuerza entre taladros se pueden considerar como incrementos del desgaste de la herramienta.

De estos datos podríamos anticipar que la delaminación originada en las series realizadas con un mayor desgaste, tendrán un índice de delaminación mucho mayor al tener las fuerzas de empuje del orden del doble o más. También sería de esperar que los incrementos de $F_{Zmáx}$ entre taladros guardaran una determinada correlación con la delaminación.

Podemos ver que en la serie 1 el desgaste de la herramienta genera grandes variaciones en la fuerza de empuje en los sucesivos taladros; sin embargo en la serie 4 dichas variaciones son mínimas e irregulares, pues a partir de ese momento el desgaste no juega un papel tan relevante en los incrementos porcentuales de la fuerza, pudiendo ser factores de igual influencia: la temperatura, irregularidades en el material o simplemente aleatoriedad en los resultados. Pese a todo se puede

4. RESULTADOS

apreciar dicho desgaste al comparar la fuerza generada en el primer y último taladro de la serie.

4.2.1.2 Velocidad de avance alta “ V_{f+} ” (series 2 y 5)

Representación gráfica de la fuerza de empuje frete al tiempo (Figura 4.5 y 4.6)

Para la serie 5 los incrementos entre taladros son pequeños e irregulares (al igual que en la 4), pero para la serie 2, los incrementos entre taladros son bastante menores que los detectados en la serie 1, pudiendo deducir que la herramienta sufre un fuerte desgaste en los primeros taladros, atenuándose a medida que se realizan, hasta llegar a un cierto punto en el cual el incremento de desgaste es mínimo, reduciendo su influencia en las fuerzas de corte.

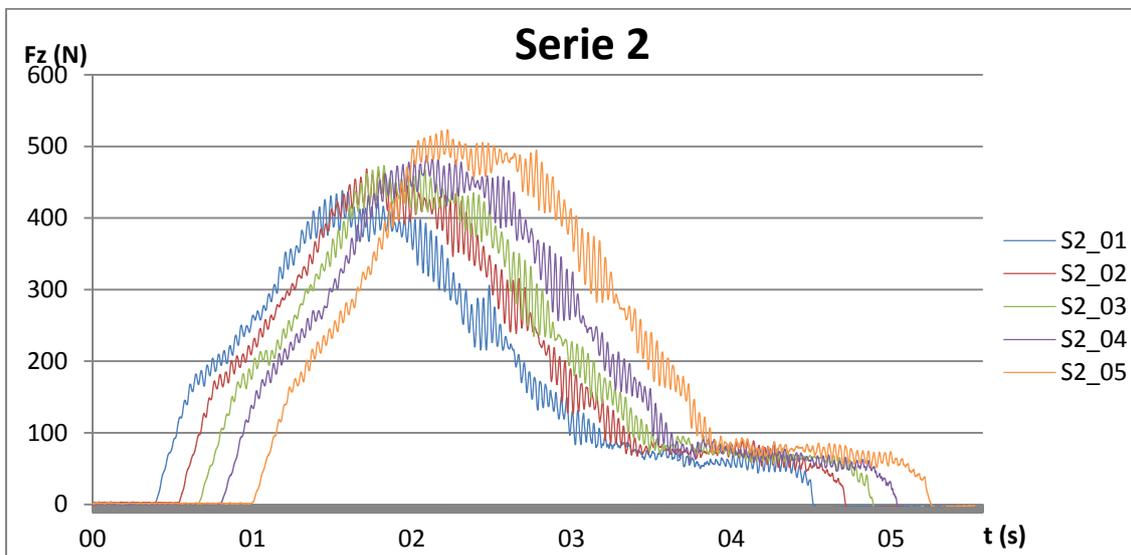


Figura 4.5. Serie 2 HSCO5524 (800rpm).

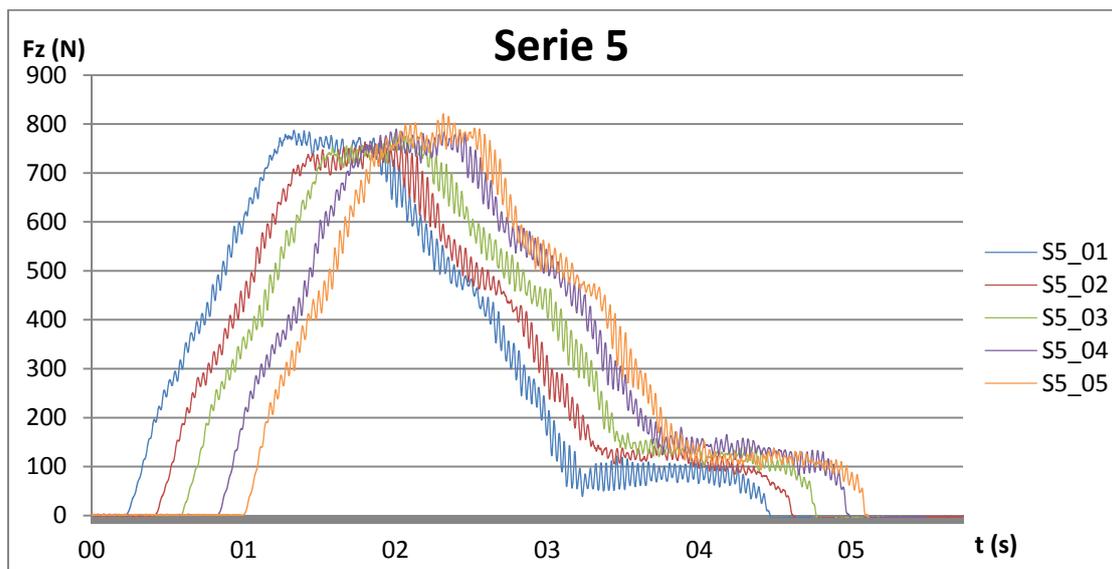


Figura 4.6. Serie 5 HSCO5524 (800rpm).

4. RESULTADOS

Serie	S2_01	S2_02	S2_03	S2_04	S2_05	S5_01	S5_02	S5_03	S5_04	S5_05
Máximo	438,3	468,5	473,2	487,0	523,1	787,4	765,1	785,3	790,1	820,9
Incremento	-	6,90%	1,00%	2,91%	7,42%	-	-2,83%	2,64%	0,61%	3,90%
	Incremento respecto a S2_01					79,65%	63,30%	65,96%	62,25%	56,93%

Tabla 4.2. Comparativa $F_{Zmáx}$ series 2 y 5 HSC05524 (800rpm).

4.2.1.3 Velocidad de avance baja “ V_f ” (series 3 y 6)

Representación gráfica de la fuerza de empuje frete al tiempo (Figura 4.7 y 4.8):

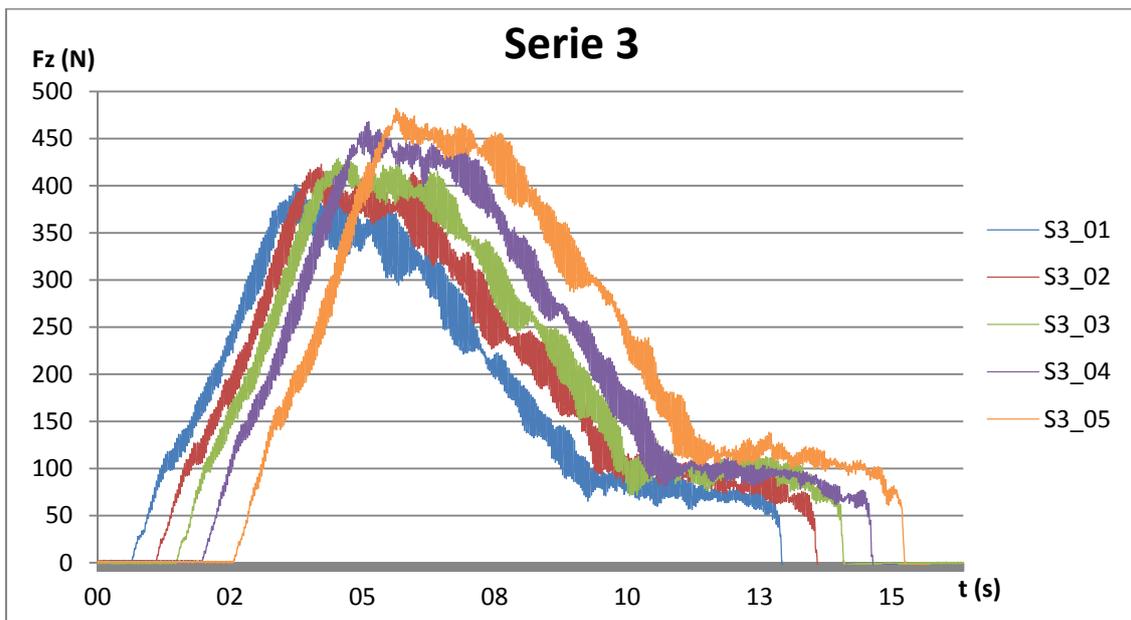


Figura 4.7. Serie 3 HSC05524 (800rpm).

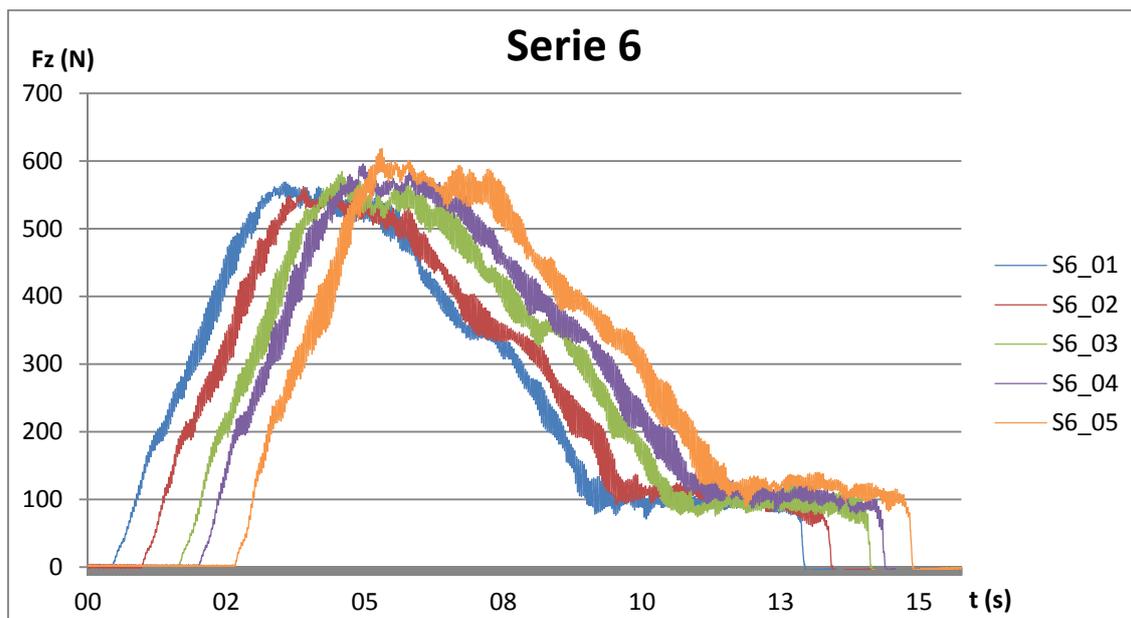


Figura 4.8. Serie 6 HSC05524 (800rpm).

4. RESULTADOS

Serie	S3_01	S3_02	S3_03	S3_04	S3_05	S6_01	S6_02	S6_03	S6_04	S6_05
Máximo	401,2	423,0	431,9	468,0	482,2	568,8	562,4	584,7	596,0	618,5
Incremento	-	5,42%	2,10%	8,36%	3,03%	-	-1,12%	3,97%	1,92%	3,78%
	Incremento respecto a S3_0i					41,76%	32,97%	35,39%	27,35%	28,28%

Tabla 4.3. Comparativa $F_{Zmáx}$ series 3 y 6 HSC05524 (800rpm).

Para la realización de las serie 3, la broca ya lleva un total de 10 taladros previos, siendo el desgaste ya bastante considerable. Podemos ver que los incrementos entre taladros de esta serie son pequeños pero siguen un orden incremental positivo, deduciendo que el desgaste de la herramienta aún juega un cierto papel apreciable en las variaciones de la fuerza de empuje entre taladros.

En la serie 6 podríamos afirmar que se aprecia una tendencia positiva en el aumento de la fuerza de empuje, lo cual supone que existe de nuevo un desgaste de la herramienta leve pero apreciable, cosa que no ocurría en las series 4 y 5. **Esto supone que para avances bajos el desgaste de la herramienta es más elevado que para avances altos.**

4.2.2 HSC05524 (3000rpm)

A continuación se mostrarán conjuntamente todas las series promediadas realizadas con esta broca (Figura 4.9):

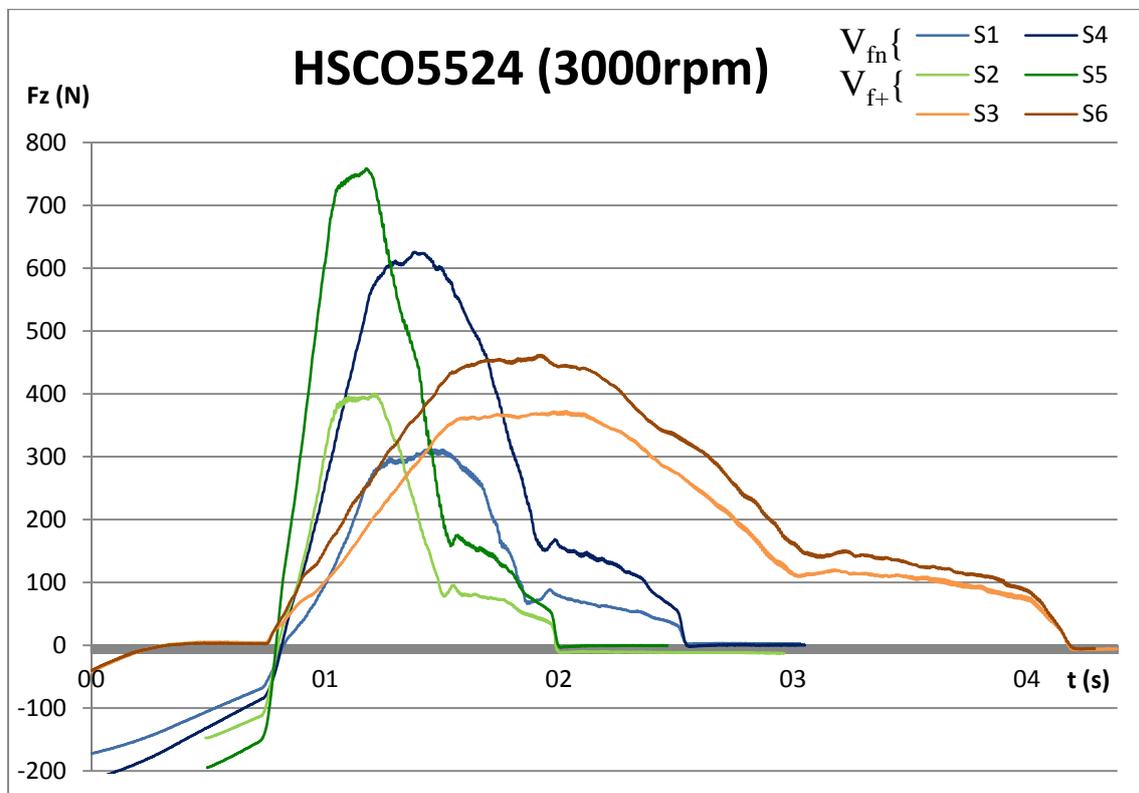


Figura 4.9. Promedios de las series con broca HSC05524 (3000rpm).

4. RESULTADOS

Antes de nada, cabe recordar el pequeño error ya mencionado en el apartado 3.5.1 *Problemas detectados* sobre la insuficiente distancia de seguridad entre broca y pieza, impidiendo que se alcanzara la velocidad del husillo programada antes de iniciarse el taladrado (no se alcanza por pocas décimas de segundo).

Las deducciones que podemos extraer de la Figura 4.9 son exactamente las mismas que en el apartado anterior.

4.2.2.1 Velocidad de avance nominal " V_{fn} " (series 1 y 4)

Representación gráfica de la fuerza de empuje frete al tiempo (Figura 4.10 y 4.11):

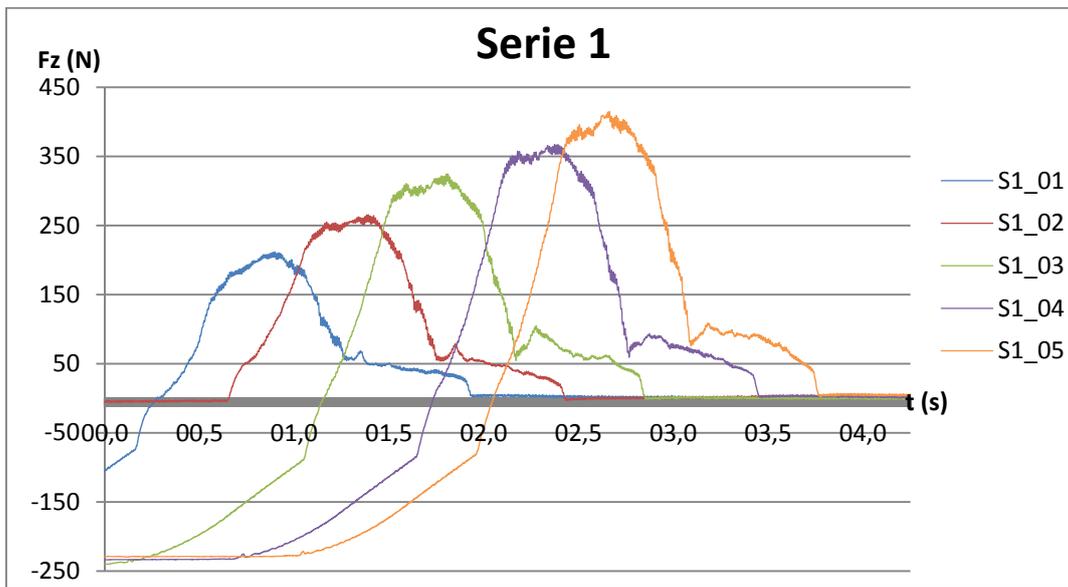


Figura 4.10. Serie 1 HSC05524 (3000rpm).

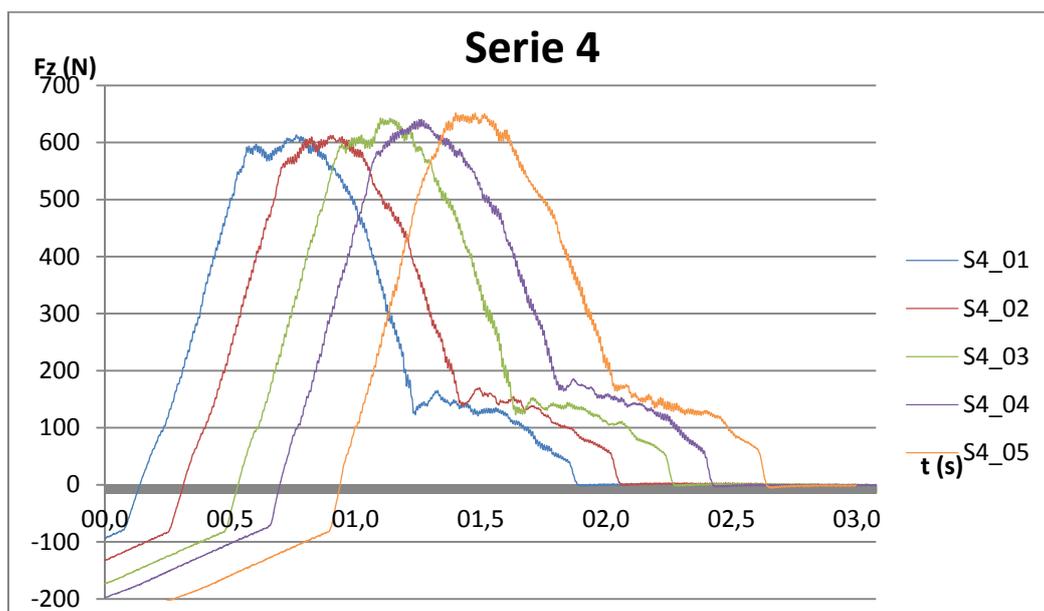


Figura 4.11. Serie 4 HSC05524 (3000rpm).

4. RESULTADOS

Serie	S1_01	S1_02	S1_03	S1_04	S1_05	S4_01	S4_02	S4_03	S4_04	S4_05
Máximo	211,8	265,5	324,7	367,4	415,1	613,2	612,5	642,7	640,3	651,9
Incremento	-	25,35%	22,30%	13,12%	12,99%	-	-0,12%	4,94%	-0,37%	1,80%
	Incremento respecto a S2_0i					189,47%	130,67%	97,92%	74,31%	57,04%

Tabla 4.4. Comparativa $F_{Zm\acute{a}x}$ series 1 y 4 HSC05524 (3000rpm).

Nuevamente sigue la tendencia de aumentar con gran rapidez el desgaste en la primera serie, especialmente en los tres primeros taladros.

Para la serie 5 los resultados respecto al desgaste son un poco confusos por su irregularidad; sin embargo, podemos concluir que realmente existe un mínimo desgaste al comparar las fuerzas del primer y último taladro de la serie.

4.2.2.2 Velocidad de avance alta “ V_{f+} ” (series 2 y 5)

Representación gráfica de la fuerza de empuje frente al tiempo (Figura 4.12 y 4.13):

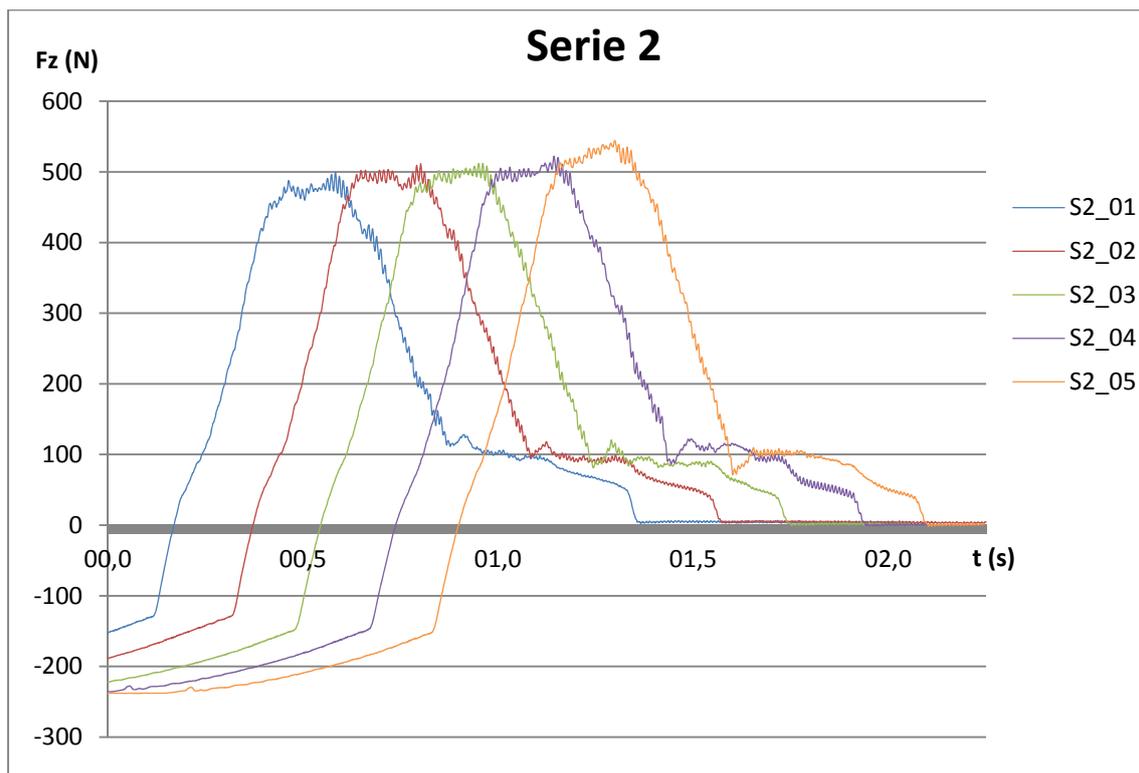


Figura 4.12. Serie 2 HSC05524 (3000rpm).

4. RESULTADOS

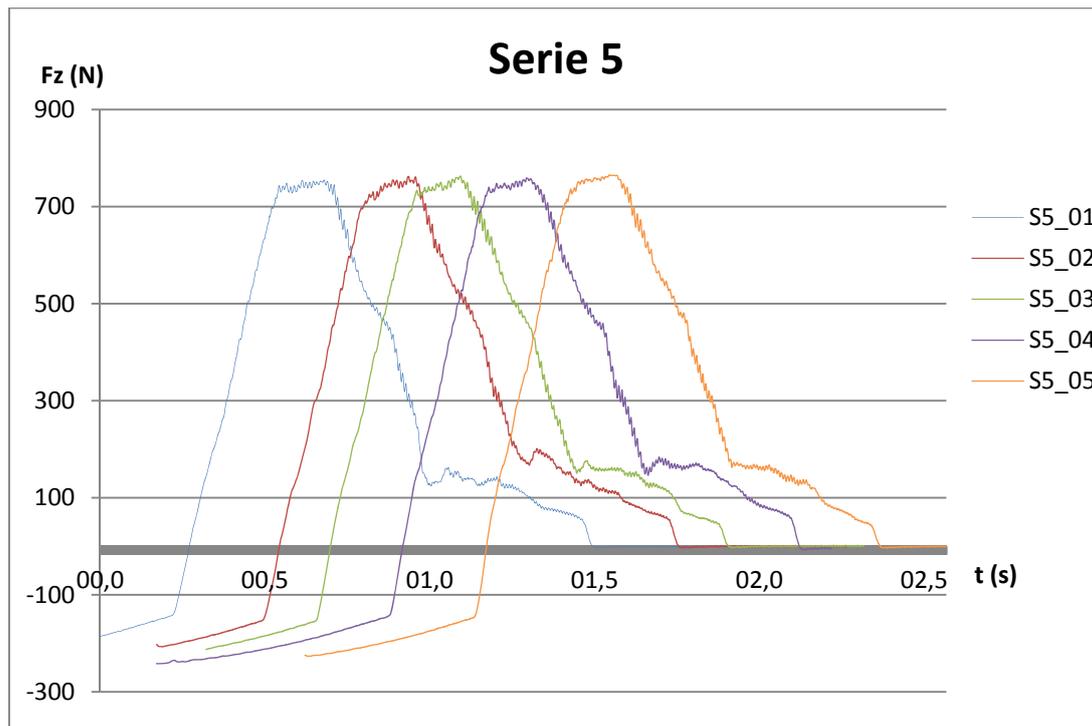


Figura 4.13. Serie 5 HSC05524 (3000rpm).

Serie	S2_01	S2_02	S2_03	S2_04	S2_05	S5_01	S5_02	S5_03	S5_04	S5_05
Máximo	499,2	511,5	512,2	522,2	544,4	755,0	762,3	762,9	759,1	765,1
Incremento	-	2,47%	0,13%	1,94%	4,26%	-	0,96%	0,08%	-0,50%	0,79%
	Incremento respecto a S2_0i					51,23%	49,01%	48,93%	45,37%	40,53%

Tabla 4.5. Comparativa $F_{Zm\acute{a}x}$ series 2 y 5 HSC05524 (3000rpm).

Es interesante ver como para la segunda serie el efecto del desgaste es bastante reducido comparado con el anterior ensayo (la misma broca), pudiendo ser un primer indicativo del menor desgaste sufrido con estas condiciones de corte.

Para la serie quinta los resultados tienen de nuevo un cierto carácter aleatorio pero existiendo un incremento pequeño, pero apreciable, entre el primer y último taladro.

4.2.2.3 Velocidad de avance baja “ V_f ” (series 3 y 6)

Representación gráfica de la fuerza de empuje frente al tiempo (Figura 4.14 y 4.15):

4. RESULTADOS

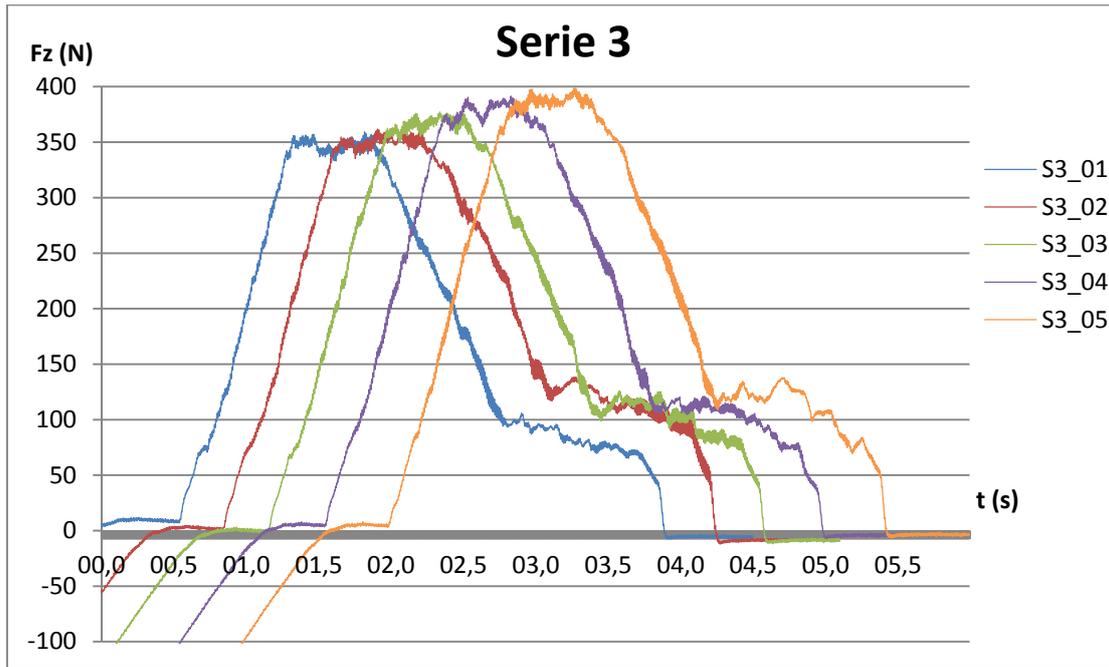


Figura 4.14. Serie 3 HSC05524 (3000rpm).

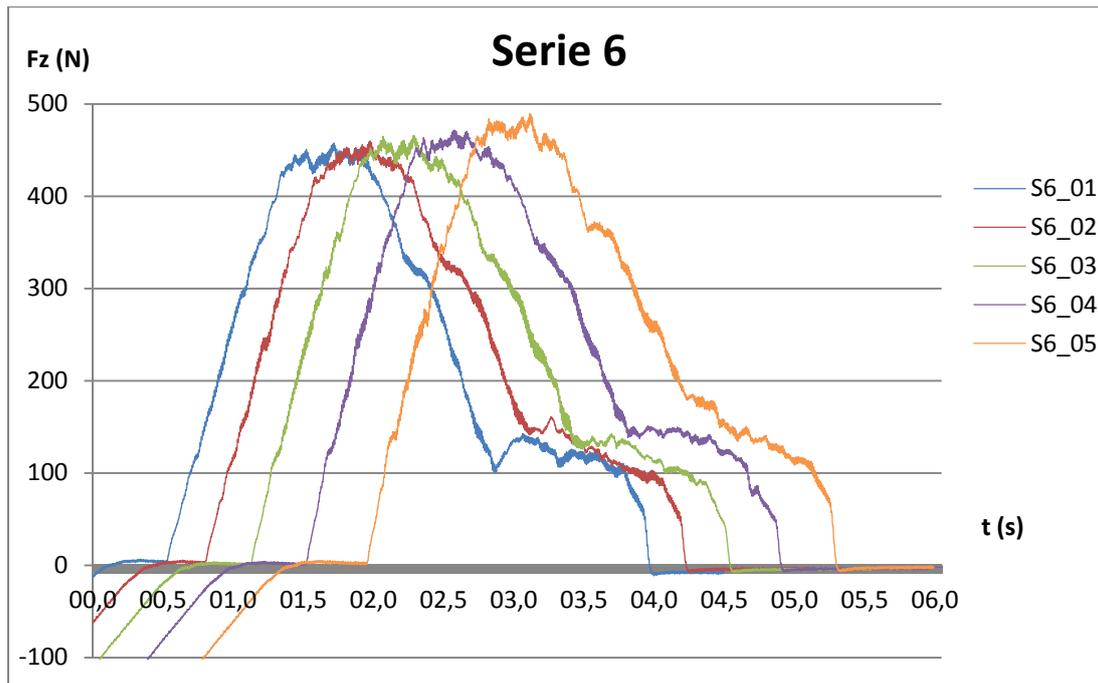


Figura 4.15. Serie 6 HSC05524 (3000rpm).

Serie	S3_01	S3_02	S3_03	S3_04	S3_05	S6_01	S6_02	S6_03	S6_04	S6_05
Máximo	359,2	361,6	377,0	391,4	398,7	457,8	460,0	465,9	471,6	489,6
Incremento	-	0,67%	4,25%	3,83%	1,85%	-	0,50%	1,27%	1,22%	3,82%
	Incremento respecto a S2_0i					27,44%	27,22%	23,58%	20,47%	22,80%

Tabla 4.6. Comparativa $F_{z\text{máx}}$ series 3 y 6 HSC05524 (3000rpm).

4. RESULTADOS

Las conclusiones para las series 2 y 5 son equiparables para ésta, matizando que en este caso el desgaste es mayor, pese a que estas series se realizaron con posterioridad, cuando la herramienta tenía un mayor desgaste y, por lo tanto, era menos propensa a incrementar en mayor medida el desgaste, pero lo hace. Por lo tanto podemos ya asegurar que ***para avances bajos es bastante apreciable que se produce un mayor desgaste*** (afirmación muy común en el mecanizado).

4.2.3 Broca HSCO1261

A continuación se mostrarán conjuntamente todas las series promediadas realizadas con esta broca (Figura 4.16):

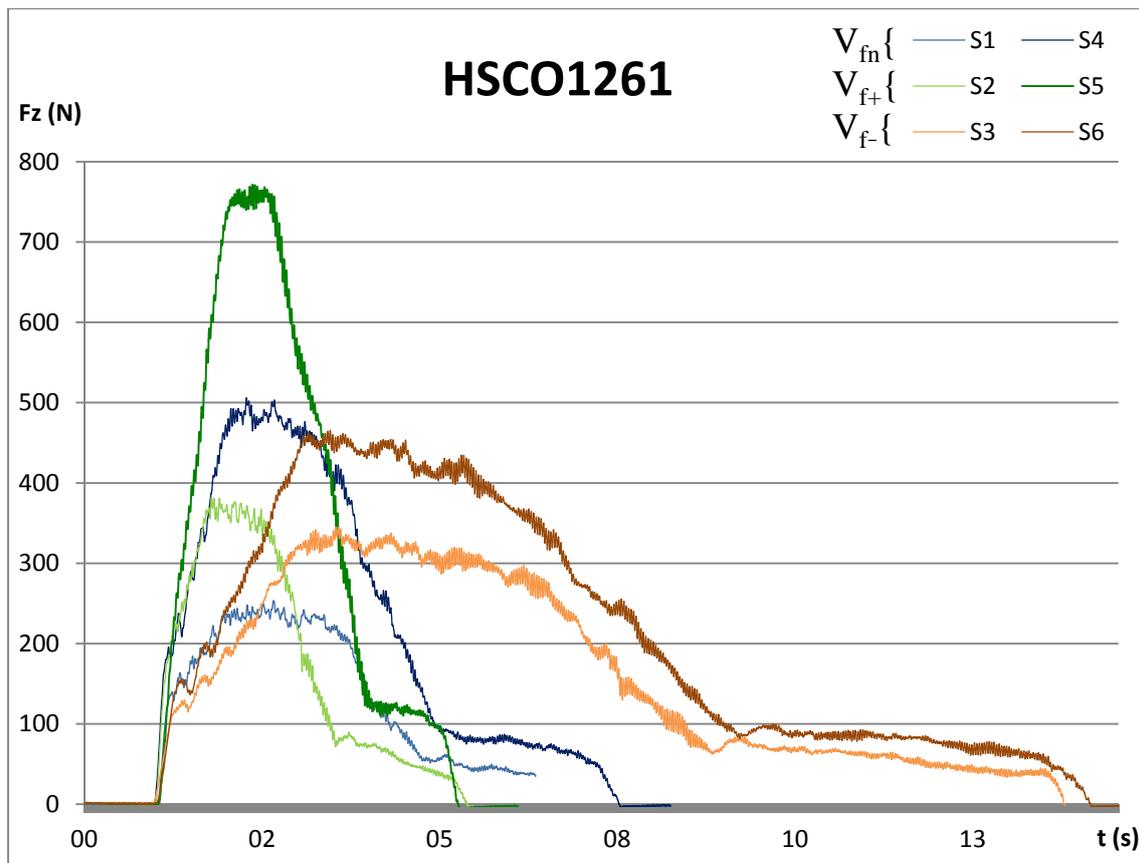


Figura 4.16. Promedios de las series con broca HSCO1261.

La tendencia se repite respecto a las comparativas globales entre series del as anteriores brocas

En la figura 4.17 se muestra la broca HSCO1261 después de los ensayos junto con una broca nueva. Es bastante apreciable el desgaste del filo (el cual resalta por el brillo al reflejar la luz) y la reducción del alma, así como su pérdida del acabado en arista viva.

4. RESULTADOS



Figura 4.17. Detalles del desgaste (izq. Broca desgastada / dcha. Broca nueva) HSCO1261.

4.2.3.1 Velocidad de avance nominal “ V_{fn} ” (series 1 y 4)

Representación gráfica de la fuerza de empuje frete al tiempo (Figura 4.18 y 4.19):

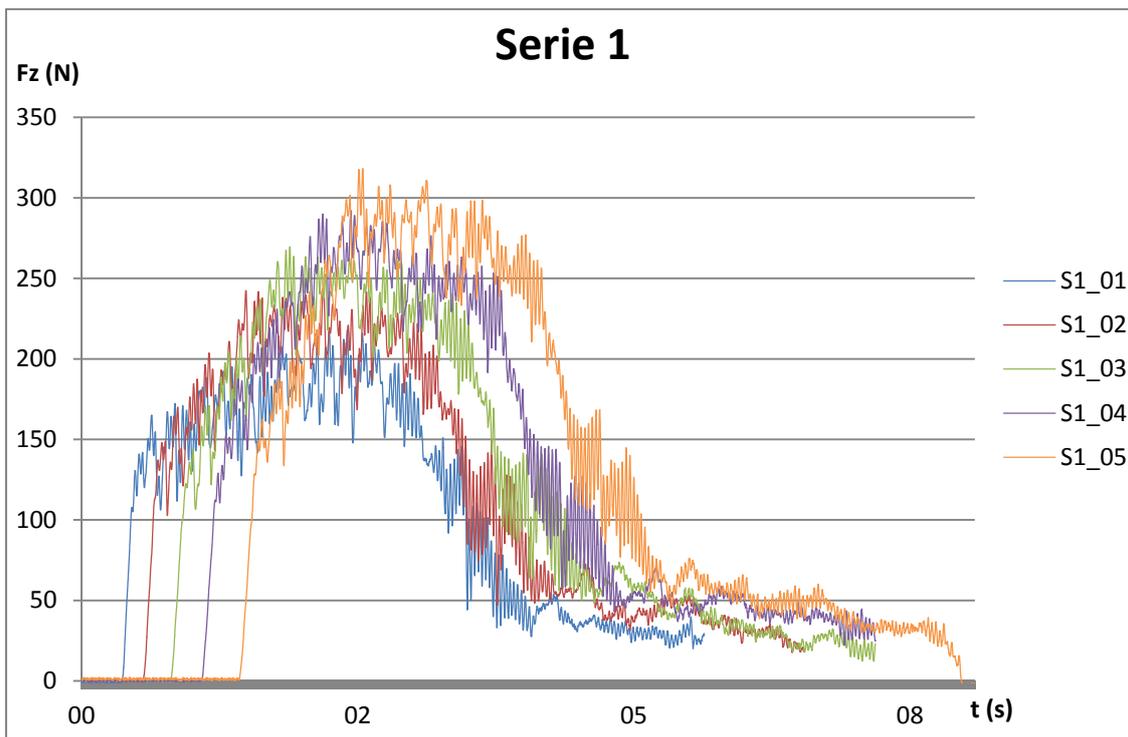


Figura 4.18. Serie 1 HSCO1261.

4. RESULTADOS

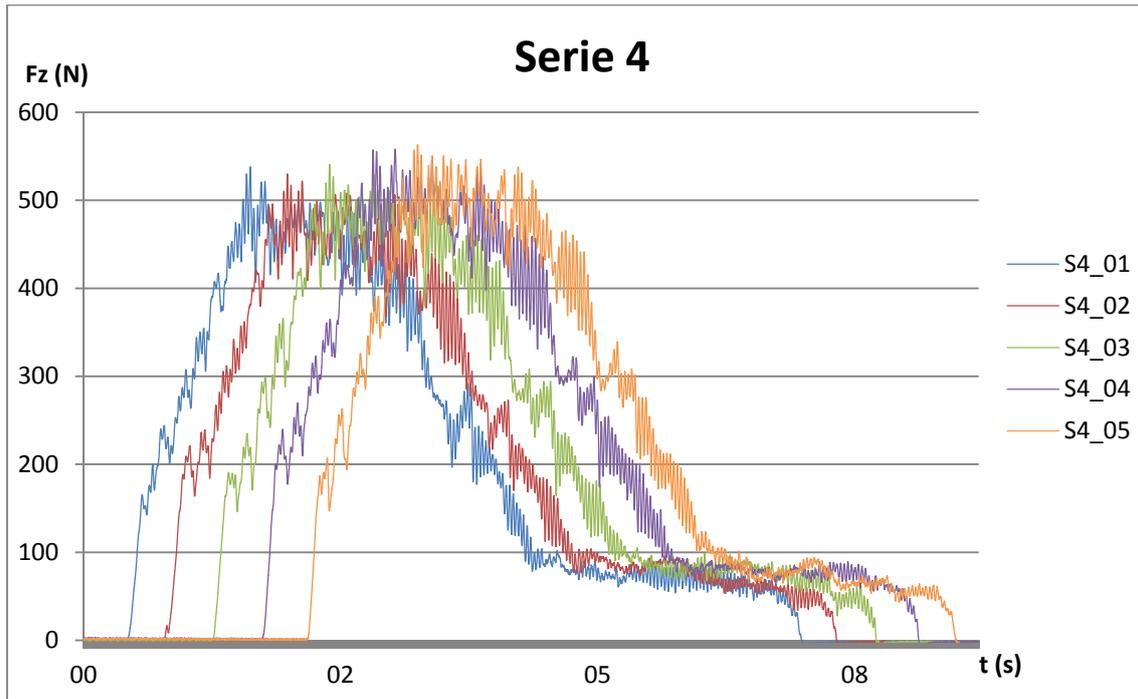


Figura 4.19. Serie 4 HSCO1261.

Serie	S1_01	S1_02	S1_03	S1_04	S1_05	S4_01	S4_02	S4_03	S4_04	S4_05
Máximo	217,9	242,4	269,6	292,1	318,2	538,0	530,0	540,5	558,2	563,3
Incremento	-	11,25%	11,22%	8,35%	8,93%	-	-1,48%	1,97%	3,27%	0,93%
	Incremento respecto a S1_0i					146,89%	118,64%	100,47%	91,08%	77,03%

Tabla 4.7. Comparativa $F_{Zm\acute{a}x}$ series 1 y 4 HSCO1261.

La tendencia de las fuerzas es similar a las ya mencionadas en las series 1 y 4 de HSCO5524 pero con diferentes valores que ya se comentaran conjuntamente con las otras brocas.

4.2.3.2 Velocidad de avance alta " V_{f+} " (series 2 y 5)

Representación gráfica de la fuerza de empuje frete al tiempo (Figura 4.20 y 4.21):

La tendencia de las fuerzas es similar a las ya mencionadas en las series 2 y 5 de HSCO5524.

4. RESULTADOS

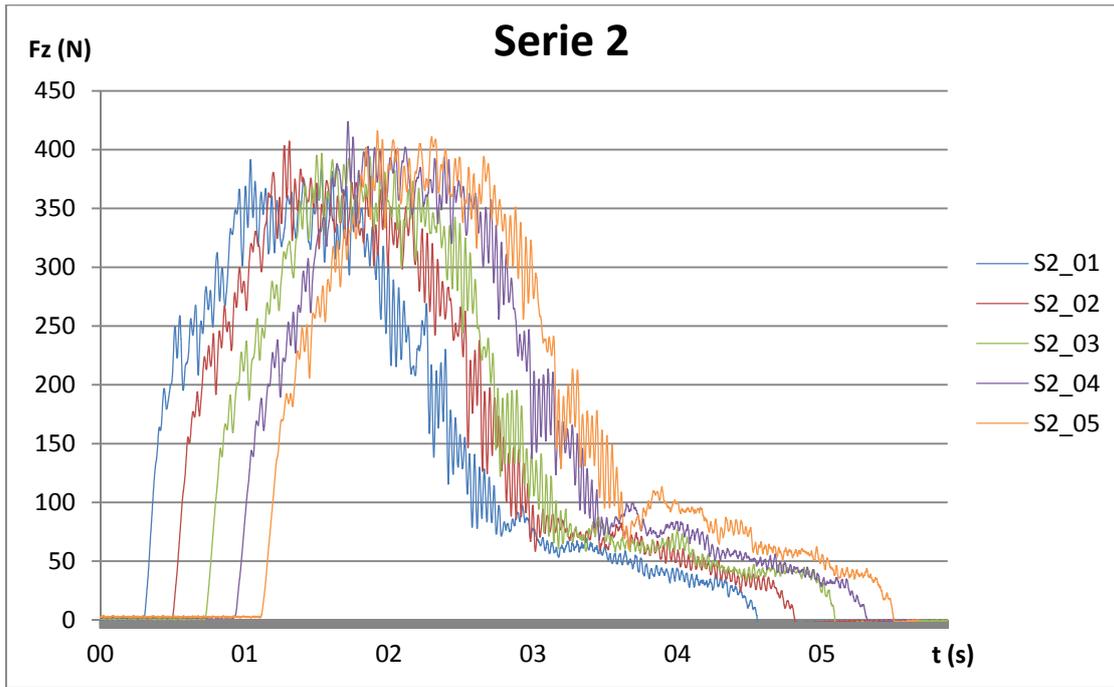


Figura 4.20. Serie 2 HSCO1261.

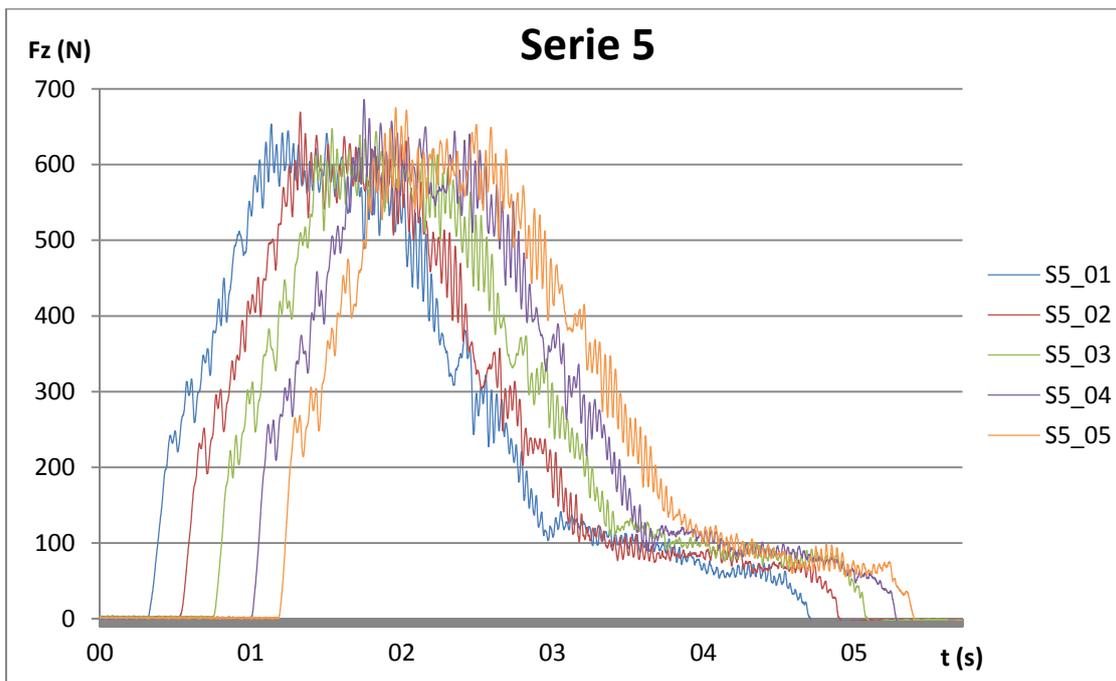


Figura 4.21. Serie 5 HSCO1261.

Serie	S2_01	S2_02	S2_03	S2_04	S2_05	S5_01	S5_02	S5_03	S5_04	S5_05
Máximo	391,6	407,3	396,9	423,9	416,2	653,6	669,5	647,5	686,2	675,1
Incremento	-	4,00%	-2,56%	6,80%	-1,81%	-	2,43%	-3,29%	5,98%	-1,62%
	Incremento respecto a S2_0i					66,89%	64,36%	63,14%	61,90%	62,22%

Tabla 4.8. Comparativa $F_{Zmáx}$ series 2 y 5 HSCO1261.

4. RESULTADOS

4.2.3.3 Velocidad de avance baja “V_{f-}” (series 3 y 6)

Representación gráfica de la fuerza de empuje frete al tiempo (Figura 4.22 y 4.23):

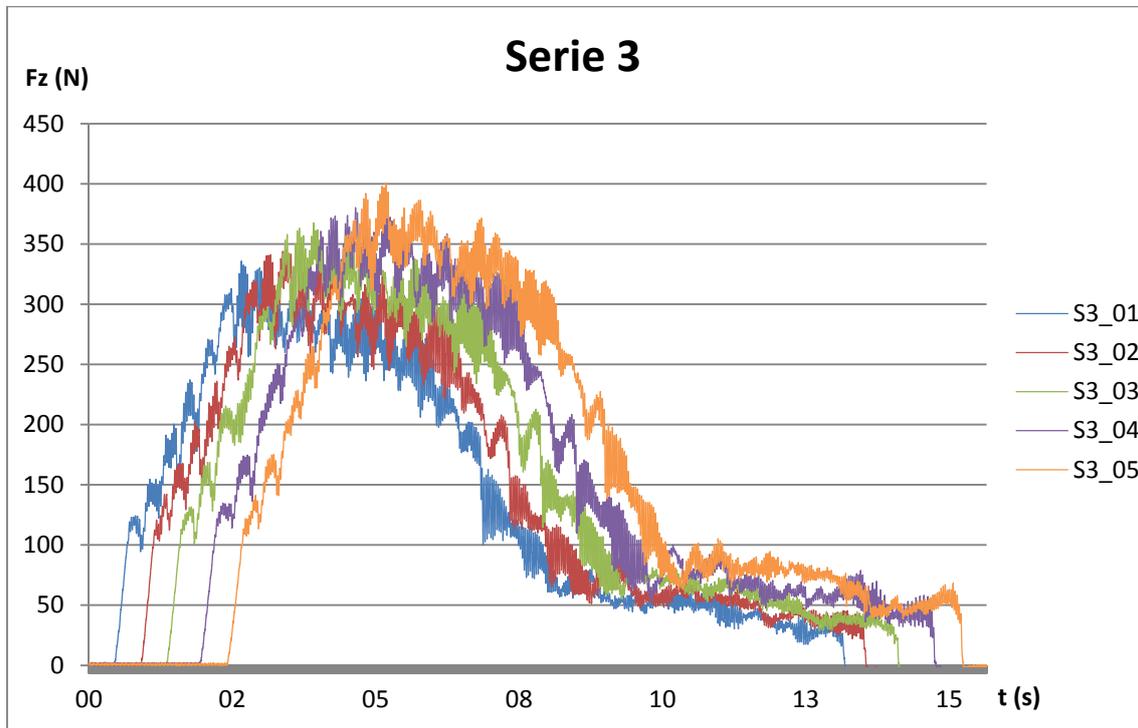


Figura 4.22. Serie 3 HSCO1261.

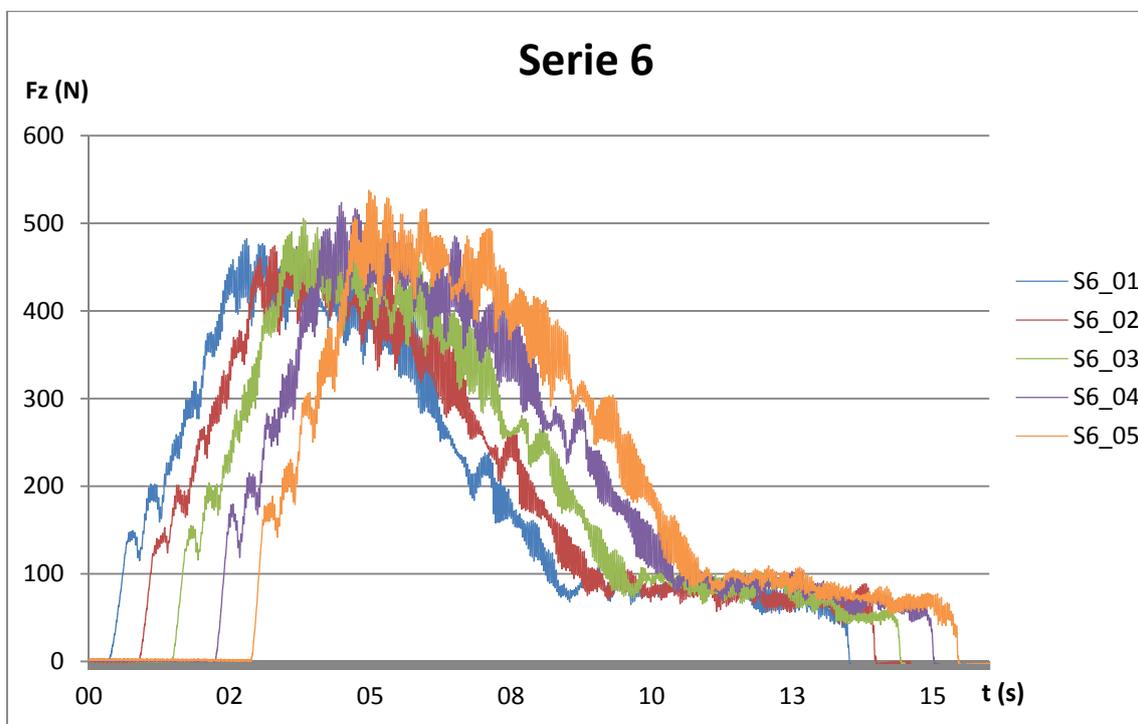


Figura 4.23. Serie 6 HSCO1261.



4. RESULTADOS

Serie	S3_01	S3_02	S3_03	S3_04	S3_05	S6_01	S6_02	S6_03	S6_04	S6_05
Máximo	335,8	345,6	367,5	380,2	400,8	482,6	475,0	505,7	524,0	537,8
Incremento	-	2,94%	6,32%	3,45%	5,43%	-	-1,58%	6,47%	3,61%	2,63%
	Incremento respecto a S3_0i					43,74%	37,42%	37,63%	37,84%	34,17%

Tabla 4.9. Comparativa $F_{Zmáx}$ series 3 y 6 HSC01261.

En esta broca, de diferente geometría que las anteriores, el mayor desgaste generado en avances bajos es aún más apreciable, pues los incrementos entre taladros son más notables que en las series de avances medios y altos.

4. RESULTADOS

4.3 Análisis de la fuerza de empuje

En este apartado se analizarán y compararán cuantitativamente los valores máximos de las fuerzas de empuje obtenidos en cada serie, para cada broca.

Para cada serie se ha calculado el incremento de fuerza de empuje entre el primer taladro y el último de la serie para poder estimar el desgaste en la serie (para las series 4, 5 y 6 no siempre coincidían con el valor mínimo y máximo de la serie pero era muy próximo).

No obstante, no siempre es comparable un incremento porcentual de una serie con otra en cuanto a incremento de desgaste producido, puesto que el desgaste con valores de F_z en torno a 600N no es el mismo que si los incrementos se dan en torno a 300N. Para poder compararlos, debemos asegurarnos de que dichos incrementos se dan entre rangos de fuerzas de corte similares y mismas condiciones de corte. Por este motivo será muy difícil comparar el desgaste sufrido con HSC05524 a 3000rpm con las otras dos brocas.

Se compararán los resultados en función de los 3 valores de avance dados, es decir, con la misma broca entre las series 1-4, 2-5 y 3-6 y al mismo tiempo entre las brocas, diferenciando la influencia del desgaste en las condiciones de corte realizadas y comparando entre series y brocas.

En la parte final del apartado se visualizarán conjuntamente y de forma gráfica los resultados finales promedios de cada serie y broca para poder compararlos entre ellos.

4.3.1 Comparativa entre series 1 Y 4 (V_{fn})

Para velocidades de avance medias y las brocas nuevas (series 1) las HSCO a 800rpm presentan menores fuerzas que HSC05524 a 3000rpm debido principalmente a que esta última tiene mayor velocidad de avance.

HSC05524 (3000rpm): V_{fn}	Serie 1	Serie 4
$F_{Zmáx}$ media (N)	316,91	632,12
Incremento primer-último taladro	95,95%	6,31%
Incremento medio entre series		109,88%

HSC05524 (800rpm): V_{fn}	Serie 1	Serie 4
$F_{Zmáx}$ media (N)	266,56	654,56
Incremento primer-último taladro	96,88%	4,85%
Incremento medio entre series		158,13%

4. RESULTADOS

HSC01261 (800rpm): V_{fm}	Serie 1	Serie 4
$F_{Zm\acute{a}x}$ media (N)	268,04	546
Incremento primer-último taladro	46,03%	4,70%
Incremento medio entre series	106,82%	

Tabla 4.10. Comparativas entre series 1 y 4.

En la serie 1 los rangos de las fuerzas de empuje entre las dos brocas que trabajan a 800rpm son muy parecidas (su media es prácticamente igual) y por lo tanto podemos aproximar el desgaste generado con la fuerza de empuje, concluyendo que **para estos primeros 5 taladros la broca HSC05524 a 800rpm se desgasta prácticamente el doble que HSC01261**, fijándonos en el incremento primer-último taladro.

En el caso de HSC05524 a 3000rpm su mayor o menor desgaste respecto a las otras brocas es difícil de comparar, pero la tendencia es similar, pues las fuerzas de corte aumentan notablemente en la cuarta serie.

Para la serie 4 es destacable el gran aumento de HSC05524 a 800rpm respecto a HSC01261, pues en la serie 1 las fuerzas de corte eran muy similares y, para ésta, existe una diferencia en torno a 110N, demostrando nuevamente el mayor desgaste que sufre la broca HSC05524 a 800rpm.

El incremento de fuerzas de empuje entre las series 1 y 4 para las tres brocas demuestra el gran peso que tiene el desgaste en dichas fuerzas, generándose incrementos superiores al 100%, especialmente alto en HSC05524 a 800rpm, indicativo de que **el desgaste es extremadamente alto independientemente de la broca y/o condiciones de corte al realizar tan sólo 20 taladros**.

4.3.2 Comparativa entre series 2 Y 5 (V_{ft})

Las comparaciones de la segunda serie (realizadas con un desgaste ya considerable) van en concordancia con las de la primera, salvo que las fuerzas medias son mayores y los incrementos van reduciéndose.

En la serie 2 ya se puede observar de nuevo el aumento rápido de las fuerzas de corte de HSC05524 a 800rpm respecto a las otras dos brocas.

HSC05524 (3000rpm): V_{ft}	Serie 2	Serie 5
$F_{Zm\acute{a}x}$ media	517,92	760,85
Incremento primer-último taladro	9,50%	1,34%
Incremento medio entre series	47,01%	

4. RESULTADOS

HSC05524 (800rpm): V_{f+}	Serie 2	Serie 5
$F_{Zm\acute{a}x}$ media (N)	478,02	789,76
Incremento primer-último taladro	19,35%	4,25%
Incremento medio entre series		65,62%

HSC01261(800rpm): V_{f+}	Serie 2	Serie 5
$F_{Zm\acute{a}x}$ media (N)	407,18	666,38
Incremento primer-último taladro	6,28%	3,29%
Incremento medio entre series		63,70%

Tabla 4.11. Comparativas entre series 2 y 5.

Los incrementos entre series 2 y 5 son menores que entre 1 y 4 (casi la mitad), lo que nos da a entender en líneas generales que el incremento de las fuerzas de empuje, y por lo tanto del desgaste, es menor cuanto mayor desgaste tenga la herramienta, pudiendo llegar un punto el cual la herramienta siga desgastándose pero no repercute tan notablemente en la fuerza de empuje.

4.3.3 Comparativa entre series 3 Y 6 (V_{f-})

Los altos incrementos de fuerza de cada broca, mayores que en las series de avance alto, nos dan a entender que el desgaste es mayor para estas series, especialmente notable en HSC01261, cuyos incrementos de fuerza superan a las demás brocas, cuando venía siendo habitual que presentara los valores más bajos.

HSC05524 (3000rpm): V_{f-}	Serie 3	Serie 6
$F_{zm\acute{a}x}$ media	377,58	468,96
Incremento primer-último taladro	10,99%	6,95%
Incremento medio entre series		24,30%

HSC05524 (800rpm): V_{f-}	Serie 3	Serie 6
$F_{Zm\acute{a}x}$ media (N)	441,26	586,08
Incremento primer-último taladro	20,19%	8,74%
Incremento medio entre series		33,15%

HSC01261(800rpm): V_{f-}	Serie 3	Serie 6
$F_{Zm\acute{a}x}$ media	365,98	505,02
Incremento primer-último taladro	19,36%	11,44%
Incremento medio entre series		38,16%

Tabla 4.12. Comparativas entre series 3 y 6.

4. RESULTADOS

Los incrementos porcentuales entre series (3 y 6) son bajos comparados con las anteriores series debido principalmente a que estas series se realizaron en último lugar, cuando el desgaste ya era elevado.

4.3.4 Comparativa global entre brocas y series

4.3.4.1 Análisis del desgaste

En la Tabla 4.13 se tienen datos numéricos para poder cuantificar el valor aproximado del desgaste para cada broca y condiciones de corte.

Aunque los incrementos entre series de HSC05524 a 3000rpm son menores que los de HSC01261, no podemos asegurar que esta primera sufra menor desgaste, pues las diferencias de fuerzas entre brocas (en las mismas series) oscilan entre 40 y 110N (Tabla 4.15), que equivalen a una media de fuerzas del 11% mayores entre HSC05524 a 3000rpm, valor no muy elevado pero que impide hacer una comparación fiable, sumándole además la variación en el desgaste que existe al emplear condiciones de corte distintas. Para comparar estas dos brocas sería necesario ensayar con HSC01261 a 3000rpm.

Incremento $F_{Zm\acute{a}x}$ entre series	HSC05524 (3000rpm)	HSC05524 (800rpm)	HSC01261 (800rpm)
S1 y S4	109,88%	158,13%	106,82%
S2 y S5	47,01%	65,618%	63,70%
S3 y S6	24,30%	33,15%	38,16%

Tabla 4.13. Incrementos de $F_{Zm\acute{a}x}$ entre series con las mismas condiciones de corte

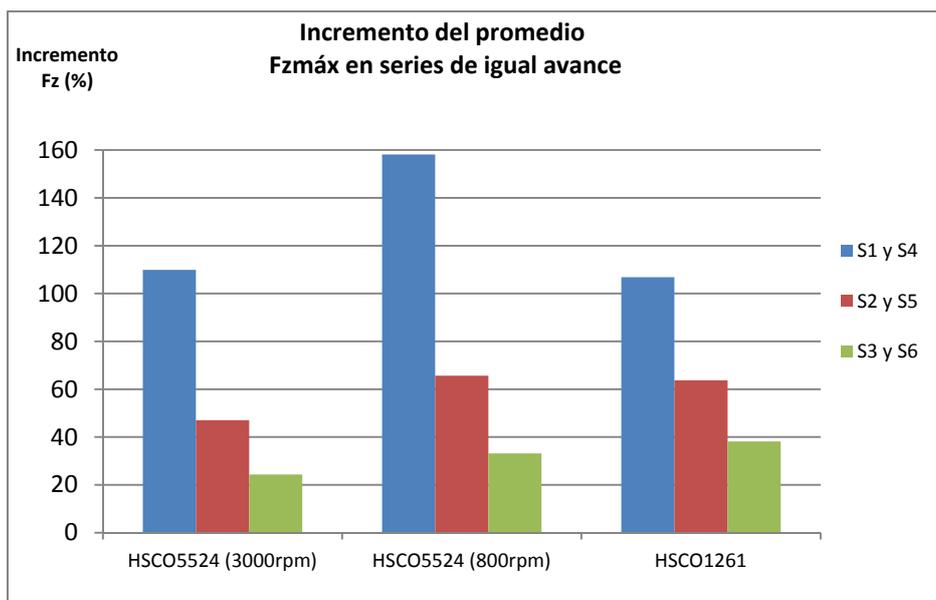


Figura4.24. Representación gráfica de la tabla 4.13.

4. RESULTADOS

No obstante, la fuerza de empuje en la primera serie para las brocas a 800rpm tienen valores taladro a taladro muy parecidos y una media de los mismos prácticamente igual (HSC05524 de 266,56N y HSC01261 de 268,04N), por lo que podemos asumir que los incrementos entre las series 1 y 4 (mismas condiciones de corte), arrojan un valor cuantificable del desgaste comparable entre ellas. Así pues, calculando el incremento de fuerza en la serie 4 entre estas dos brocas, se obtiene que **el desgaste es mayor en HSC05524 (800rpm) respecto a HSC0126 en aproximadamente un 19,9% (para 20 taladros)**.

Para las series 5 y 6, pese a que las comparaciones no son del todo correctas, las diferencias de incremento son menores (18,5% y 16,1% respectivamente), debido seguramente a que para estas series la broca a HSC01261 se desgasta con mayor rapidez que HSC05524 a 800rpm, pues esta última tiene menor tendencia a aumentar su desgaste al estar ya muy deteriorada.

En la tabla 4.14 se observa que los incrementos de HSC05524 (3000rpm) de $F_{Zm\acute{a}x}$ respecto HSC05524 (800rpm) son mayores sólo hasta la 2ª serie. Ello se debe de nuevo a que esta segunda sufre un desgaste más rápido, originando mayores fuerzas en las últimas series que superan las de HSC05524 a 3000rpm, cuyo desgaste es menor. De tal manera que podemos afirmar que **el desgaste generado en HSC05524 será mayor a 800rpm**. Podemos ver gráficamente este hecho con las líneas (rectas) calculadas por mínimos cuadrados de los puntos de las fuerzas de las diferentes series en la Figura 4.25.

	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Serie5	Serie6
HSC05524 (800rpm) $F_{Zm\acute{a}x}$ media (N)	266,56	478,02	441,26	654,56	789,76	586,08
HSC05524 (3000rpm) $F_{Zm\acute{a}x}$ media (N)	316,91	517,92	377,58	632,12	760,85	468,96
Incremento $F_{Zm\acute{a}x}$ respecto HSC05524 (800rpm)	18,89%	8,35%	-14,43%	-3,43%	-3,66%	-19,98%
HSC01261 $F_{Zm\acute{a}x}$ media (800rpm) (N)	268,04	407,18	365,98	546	666,38	505,02
Incremento $F_{Zm\acute{a}x}$ respecto HSC05524 (800rpm)	0,56%	-14,82%	-17,06%	-16,59%	-15,62%	-13,83%

Tabla 4.14. Incrementos de $F_{Zm\acute{a}x}$ respecto HSCO (800rpm) entre series con las mismas condiciones de corte

Además la pendiente de las rectas de la Figura 4.25 nos pueden dar una idea del desgaste, puesto que a mayor pendiente, mayores incrementos de fuerza (debidos al desgaste). De tal forma que *la broca con mayor desgaste es, como ya dedujimos, HSC05524 (800rpm), después HSC01261 y, la de menor desgaste, HSC05524 (3000rpm)*.

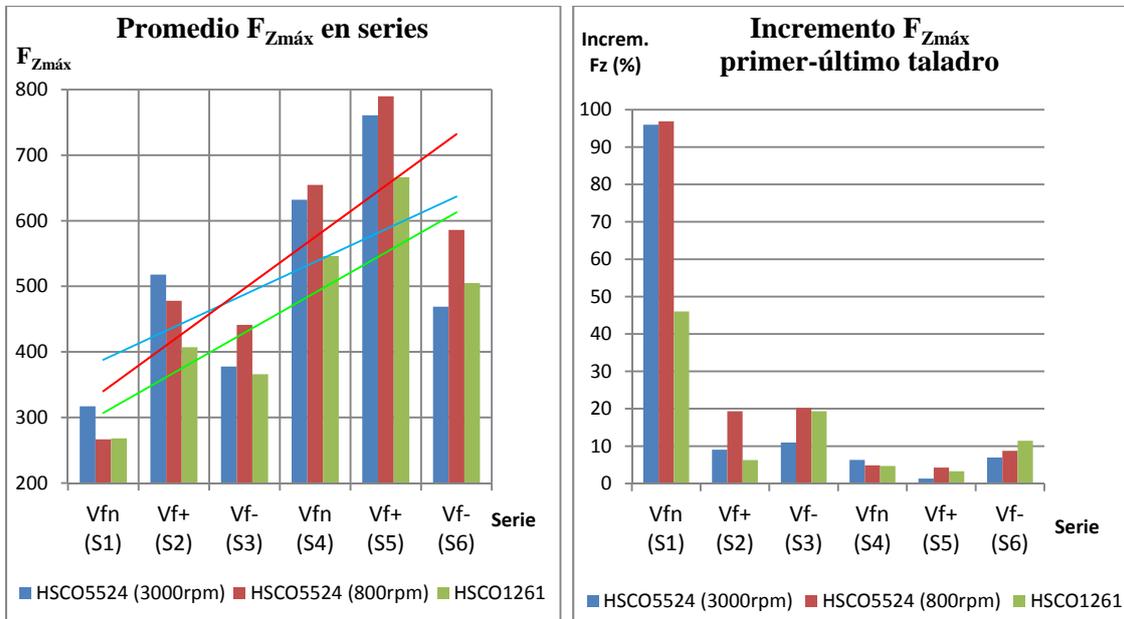
4. RESULTADOS

4.3.4.2 Análisis de la fuerza de empuje

En las Tablas 4.15 y 4.16 se muestran conjuntamente las fuerzas de empuje máximas y el incremento entre el primer y último taladro de la serie.

$F_{Zmáx}$ media (N)	HSC05524 (3000rpm)	HSC05524 (800rpm)	HSC01261 (800rpm)	Incremento medio entre taladros	HSC05524 (3000rpm)	HSC05524 (800rpm)	HSC01261 (800rpm)
S1	316,91	266,56	268,04	S1	95,95%	96,88	46,03%
S2	517,92	478,02	407,18	S2	9,05%	19,35%	6,28%
S3	377,58	441,26	365,98	S3	10,99%	20,19%	19,36%
S4	632,12	654,56	546,00	S4	6,31%	4,85%	4,70%
S5	760,85	789,76	666,38	S5	1,34%	4,25%	3,29%
S6	468,96	586,08	505,02	S6	6,95%	8,74%	11,44%

Tablas 4.15. y 4.16. Comparativas entre series y brocas



Figuras 4.25 y 4.26. Representación gráfica de las tablas 4.15 y 4.16.

Para finalizar, nos centraremos en la variación de la fuerza de empuje en función de las condiciones de corte, pese a que su estudio está dificultado y distorsionado por la variación del desgaste (son más fiables las series 4, 5 y 6 puesto que el desgaste en estas es menor que en las primeras). Pese a todo, se pueden apreciar ciertas características citadas a continuación:

- ✓ La primera serie debe descartarse por completo debido a la predominante influencia del desgaste.
- ✓ Es totalmente obvio que las V_{f+} generan mayores fuerzas de empuje que las V_{f-} , pues queda así reflejado en las gráficas (la series V_{f+} se realizaron con la herramienta menos desgastada que en las V_{f-} , lo que refuerza aún más esta afirmación)

4. RESULTADOS

- ✓ Las series realizadas con V_f - originan un mayor desgaste de herramienta.
- ✓ La broca HSC01261 sufre un menor desgaste porcentual entre taladros que las HSC0554 y genera claramente menores fuerzas que HSC05524 a 800rpm. Esto no asegura que el desgaste sea menor que HSC05524 (3000rpm).
- ✓ La broca HSC01261 presenta unos incrementos de fuerza muy considerable para las series V_f -.

4.3.5 Desgaste de la herramienta

Como bien se acaba de comentar, es predecible que la broca HSC05524 a 3000rpm presente menor desgaste que a 800rpm. A continuación se muestran imágenes y mediciones realizadas a microscopio en las que se corrobora dichas deducciones (Figura 4.27)

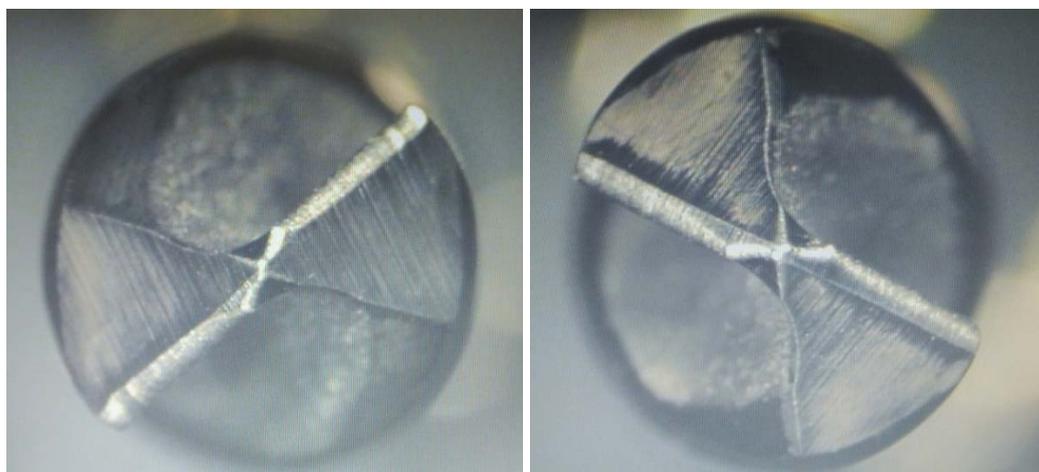


Figura 4.27. Detalle broca HSC05524 (3000rpm) izq. y HSC05524 (800rpm) dcha. tras los ensayos.

Puesto que no se disponía de un útil para la medición correcta del desgaste del filo, la medida se realizó con la broca en vertical, imposibilitando una correcta comparación de las brocas HSC05524 con HSC01261 (para esta broca la medida mostrada es la del extremo), pues el ángulo de la punta no es el mismo. No obstante sí podemos comparar la medición de ambas brocas HSC05524 (Tabla 4.17), midiendo la longitud transversal del filo desgastado de la imagen en diferentes zonas y promediando.

	HSC05524 (3000rpm)	HSC05524 (800rpm)	HSC01261
Long. filo (mm)	1,683	1,938	1,810

Tabla 4.17. Medida del desgaste.

4. RESULTADOS

De estos datos obtenemos que **la broca HSC05524 a 800rpm se desgasta un 15,2% más respecto a HSC05524 a 3000rpm.**



Figura 4.28. Detalle broca HSC01261

4. RESULTADOS

4.4 Análisis de delaminación

En la medida de la delaminación tenemos dos datos diferentes: El diámetro delaminado ($D_{m\acute{a}x}$) y el error (E) o desviación máxima del punto más alejado del centro.

Según la ecuación de Chen W.C [CHEN, 1997] calcularemos el **Factor de delaminación** (F_d), tomando como D_0 el diámetro nominal de la broca (6mm):

$$F_d = \frac{D_{m\acute{a}x}}{D_0}$$

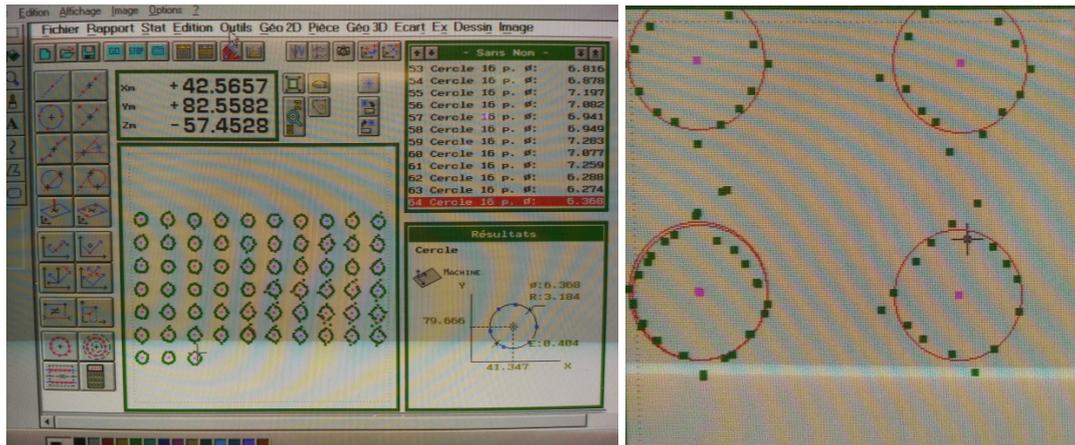
La medida estandarizada de la delaminación se realiza mediante el cálculo de $D_{m\acute{a}x}$ con algoritmos que procesan los puntos tomados (pese a su nomenclatura, no es el diámetro máximo que se mide). En este estudio se intentará ir más allá y aportar información adicional del daño producido empleando la medida de $D_{m\acute{a}x}$ (calculado mediante mínimos cuadrados) que obtenemos con nuestro software, añadiendo el dato del error (E). A este nuevo factor lo denominaremos F_d' :

$$F_d' = \frac{(D_{m\acute{a}x} + E)}{D_0}$$

Gracias a este factor podemos cuantificar de forma conjunta la zona periférica del diámetro dañada como la magnitud de las grietas generadas, aunque matizamos que el valor del error no es exactamente la diferencia entre el radio nominal y el punto más alejado del eje del taladro, pues su valor lo calcula con el centro de la circunferencia de mínimos cuadrados, pudiendo no coincidir justamente con el eje del taladro (3.4.4.2 Software Deltec Vision). Sin embargo, la diferencia que pudiera existir es mínima y nos es igualmente útil para de esta manera cuantificar con mayor daño a aquellos agujeros que presenten grandes grietas, cosa más que justificable y apropiada, pues en nuestro caso son de un tamaño considerable al no emplear herramientas específicas.

En la Figura 4.29 se pueden observar los puntos tomados en las mediciones y la circunferencia calculada por el programa.

4. RESULTADOS



Figuras 4.29. Medición de la delaminación.

En este apartado se tratará en un inicio la delaminación de cada taladro para una misma broca y su comparación entre series para obtener una primera idea de los resultados individuales.

Posteriormente se compararán los resultados medios de las series entre las tres brocas. Se incluyen las mediciones de delaminación, del error y de un factor que incluye a ambos (F_d').

Antes de continuar es importante resaltar que **este estudio se realizó únicamente con la delaminación originada en la entrada** (Figura 4.30), pues a la salida, la última lámina tenía un acabado diferente al resto (debido al proceso de curado en hornos) que evita la delaminación en esta lámina. Es por ello por lo que a la salida el daño por delaminación es muy pobre y apenas se apreciaron tendencias con las diferentes brocas y series, siendo los resultados muy aleatorios e inconcluyentes. Pese a todo, sí se pudo apreciar a simple vista que a la salida la cantidad de fibras no cortadas en HSC01261 era menor que para las brocas HSC05524.

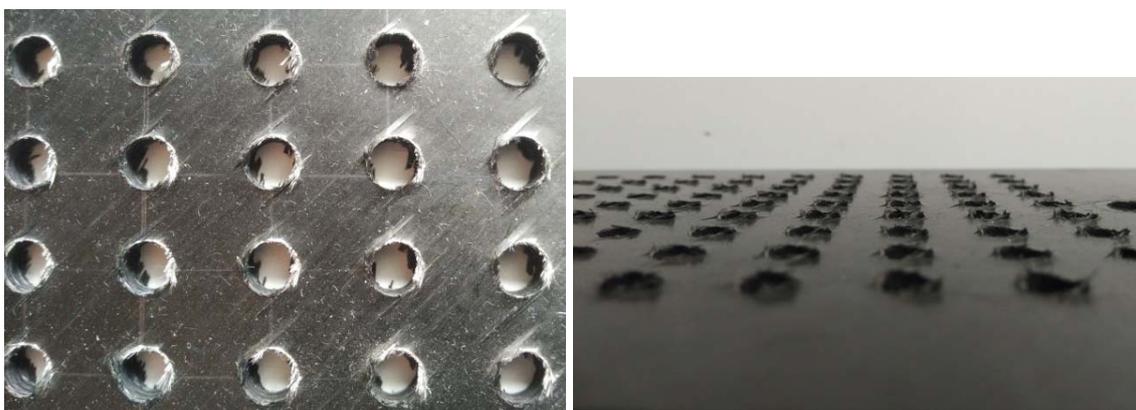


Figura 4.30. Daño por delaminación (izq.) y por astillamiento (dcha.) a la entrada.

4. RESULTADOS

Además, a la salida nos encontramos con un alto índice de astillamiento y fibras no cortadas (Figura 4.31), lo que dificultaba la medición de $D_{m\acute{a}x}$ para el cálculo del factor de delaminación.



Figura 4.31. Daño por astillamiento y fibras no cortadas a la salida.

En las Tablas 4.18, 4.19 y 4.20 se muestra el factor de delaminación (F_d) de cada taladro realizado.

HSC05524 (800rpm)	S1	S2	S3	S4	S5	S6
Taladro1	1,0252	1,1243	1,1213	1,2280	1,2490	1,2402
Taladro2	1,0318	1,1303	1,1405	1,2380	1,2383	1,2248
Taladro 3	1,0350	1,1222	1,1527	1,2227	1,2380	1,2305
Taladro 4	1,0517	1,1192	1,1463	1,2363	1,2523	1,2295
Taladro 5	1,0637	1,1672	1,1803	1,2403	1,2880	1,2432
MEDIA	1,0415	1,1326	1,1482	1,2331	1,2531	1,2336

Tabla 4.18. Factor de delaminación (F_d) broca HSC05524 (800rpm).

HSC05524 (3000rpm)	S1	S2	S3	S4	S5	S6
Taladro1	1,0237	1,0718	1,0602	1,1068	1,1173	1,0985
Taladro2	1,0377	1,0675	1,0465	1,0783	1,1563	1,1500
Taladro 3	1,0540	1,0618	1,0725	1,0833	1,1848	1,1250
Taladro 4	1,0510	1,1027	1,0767	1,1278	1,1495	1,1075
Taladro 5	1,0670	1,1170	1,0970	1,1447	1,1432	1,1293
MEDIA	1,0467	1,0842	1,0706	1,1082	1,1502	1,1221

Tabla 4.19. Factor de delaminación (F_d) broca HSC05524 (3000rpm).

4. RESULTADOS

HSC01261	S1	S2	S3	S4	S5	S6
Taladro1	1,0313	1,0615	1,0565	1,1387	1,1767	1,1592
Taladro2	1,0373	1,0617	1,0700	1,1463	1,1690	1,1638
Taladro 3	1,0347	1,0832	1,0858	1,1768	1,1880	1,1975
Taladro 4	1,0640	1,0762	1,1037	1,1673	1,2112	1,1868
Taladro 5	1,0445	1,0718	1,1303	1,1752	1,2297	1,1747
MEDIA	1,0424	1,0709	1,0893	1,1609	1,1949	1,1764

 Tabla 4.20. Factor de delaminación (F_d) broca HSC01261.

A continuación se muestran los errores medios medidos de cada serie para cada broca, donde podemos sacar claramente la conclusión, al comparar las series 4, 5 y 6 especialmente (menor influencia del desgaste), que **para avances altos (series 2 y 5) la generación de grietas se ve altamente favorecida**.

Promedio del error	HSC05524 (3000rpm)	HSC05524 (800rpm)	HSC01261
S1	0,4788	0,3402	0,4360
S2	1,1456	1,3348	0,6932
S3	0,7132	1,7412	0,7272
S4	0,9964	2,5744	1,6972
S5	1,5948	2,9656	2,6134
S6	1,4360	2,5480	1,7660

Tabla 4.21. Error de desviación medio de las series.

4.4.1 Factores de delaminación (F_d y F_d') en cada broca

En las gráficas mostradas en adelante, los colores están escogidos para diferenciar con claridad las condiciones de corte de cada serie, siendo:

- V_{fn} : Azules
- V_{f+} : Rojos
- V_{f-} : Verdes

Además, las series que se repiten con las mismas condiciones de corte (4, 5 y 6) se representan en discontinuo.

Se representarán para cada broca los valores de la delaminación en cada taladro para las diferentes series. Para ello se calculará mediante los métodos clásicos el valor de F_d y mediante nuestro método, F_d' . Se representarán en diferentes gráficos para poder valorar la diferente información que ofrecen.

4. RESULTADOS

4.4.1.1 HSC05524 (800rpm)

En ambos factores es apreciable un aumento progresivo de la delaminación en las 3 primeras series independientemente de las condiciones de corte, por lo que podemos asegurar que el condicionante principal en este caso es el desgaste de la herramienta.

En las siguientes series (en discontinuo) se aprecia como en avance nominal (serie 4) la delaminación es similar que en avance bajo (serie 6), pese a que esta última se realiza en último lugar (tenía mayor desgaste). En estas dos series los incrementos entre taladros son más reducidos e irregulares debido al menor desgaste sufrido (no tienen una tendencia tan clara a crecer como las tres primeras).

Al comparar ambos factores, las tendencias son similares, pudiendo apreciar como en F_d' existen algunos taladros con mayores separaciones respecto al resto, dando a entender que presentan grietas considerables, daño importante que no se contempla en F_d .

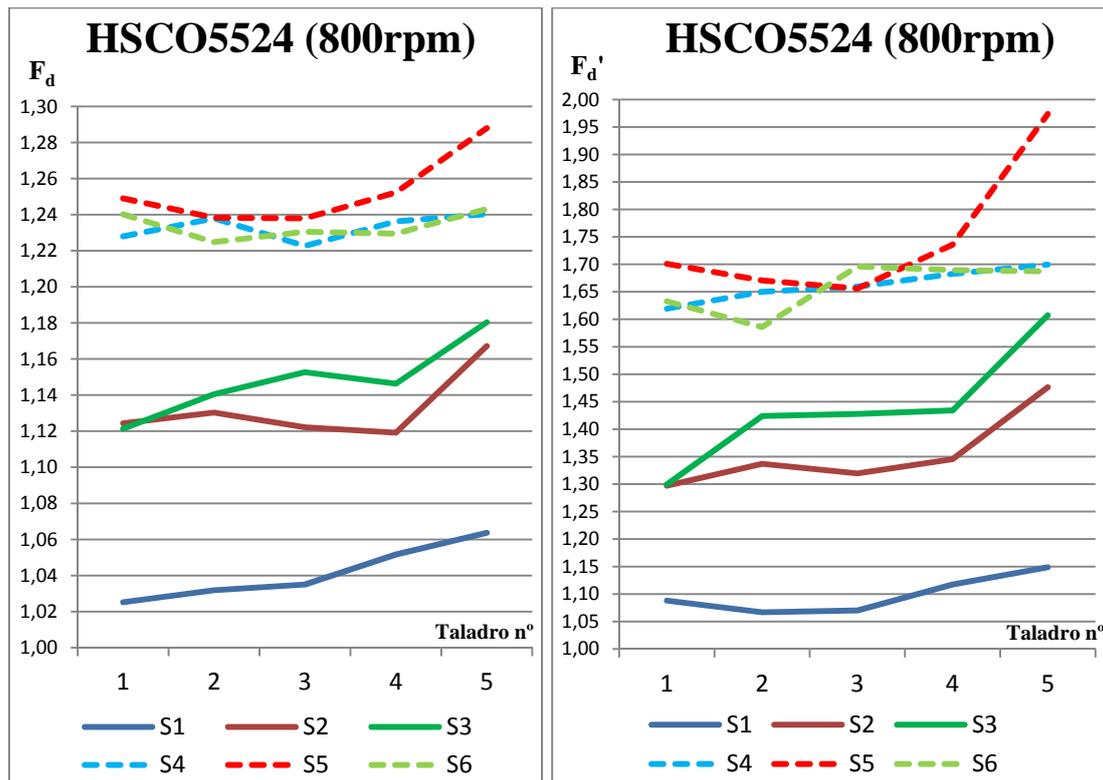


Figura 4.32. Daño por delaminación HSC05524 (800rpm).

4.4.1.2 HSC05524 (3000rpm)

Para estas condiciones de corte se detecta más aleatoriedad en los resultados pero sin embargo, sigue la línea de lo ya comentado anteriormente, pues en casi todas

4. RESULTADOS

las series el último taladro presenta mayor delaminación que el primero de la misma.

Es interesante resaltar como en las tres primeras series los resultados de éstas no son tan distantes entre ellos como ocurría para la anterior broca, dándonos a entender que el desgaste de la herramienta es menos influyente o menor que en el anterior apartado, siendo más probable esta segunda opción.

Además las diferencias entre las últimas series son grandes (y dispares) respecto a las otras dos brocas, en las cuevas los valores de estas series son bastante próximos.

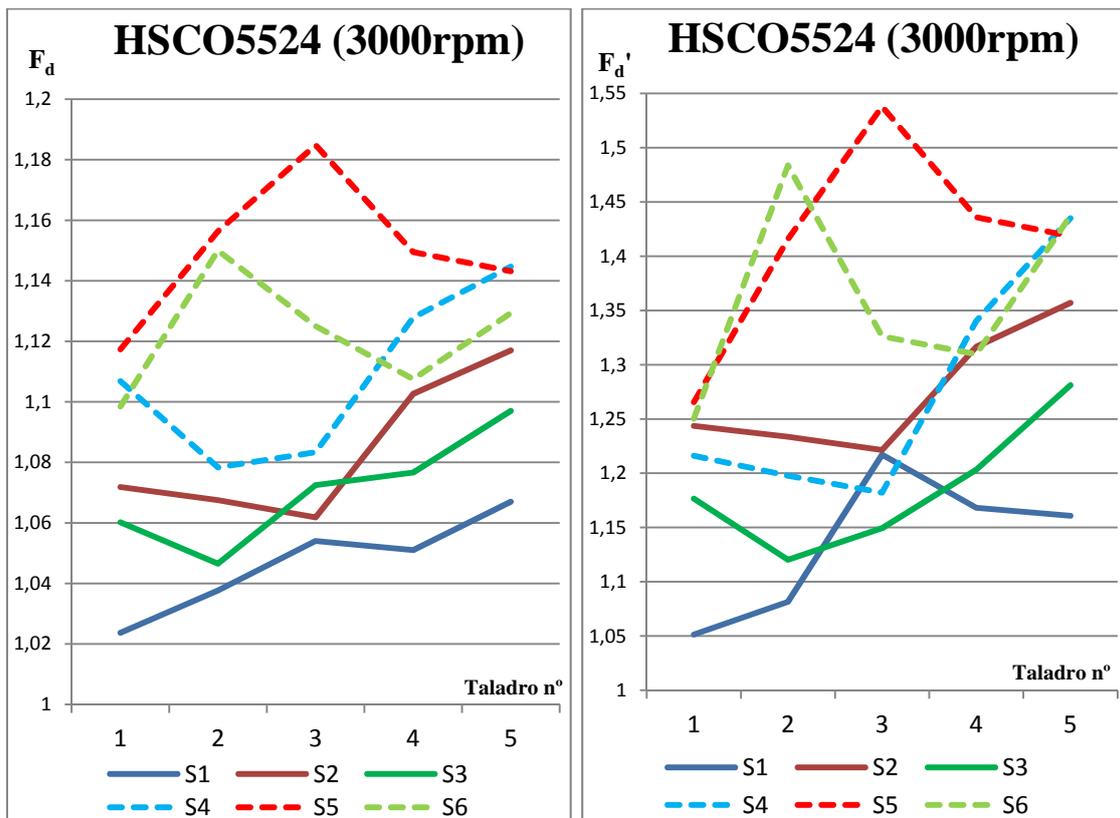


Figura 4.33. Daño por delaminación HSC05524 (3000rpm).

4.4.1.3 HSC01261

Nuevamente podemos extrapolar las conclusiones obtenidas en HSC05524 (800rpm) pero matizando algunos aspectos.

Para esta broca se detecta de nuevo que las diferencias entre las tres primeras series son reducidas, indicativo de un menor desgaste.

La menor delaminación a bajos avances se puede apreciar de nuevo y con mayor claridad, pues la delaminación que presenta es similar o inferior al avance nominal,

4. RESULTADOS

pese a haberse realizado con un mayor desgaste. De tal manera que podríamos asegurar que **para avances bajos la delaminación es menor.**

Para esta broca es más notable que en las anteriores el hecho de que a *altas velocidades de avance se ve favorecida la aparición de grietas de grandes dimensiones* (serie 5) y como a bajas velocidades, dicha aparición se reduce (serie 3).

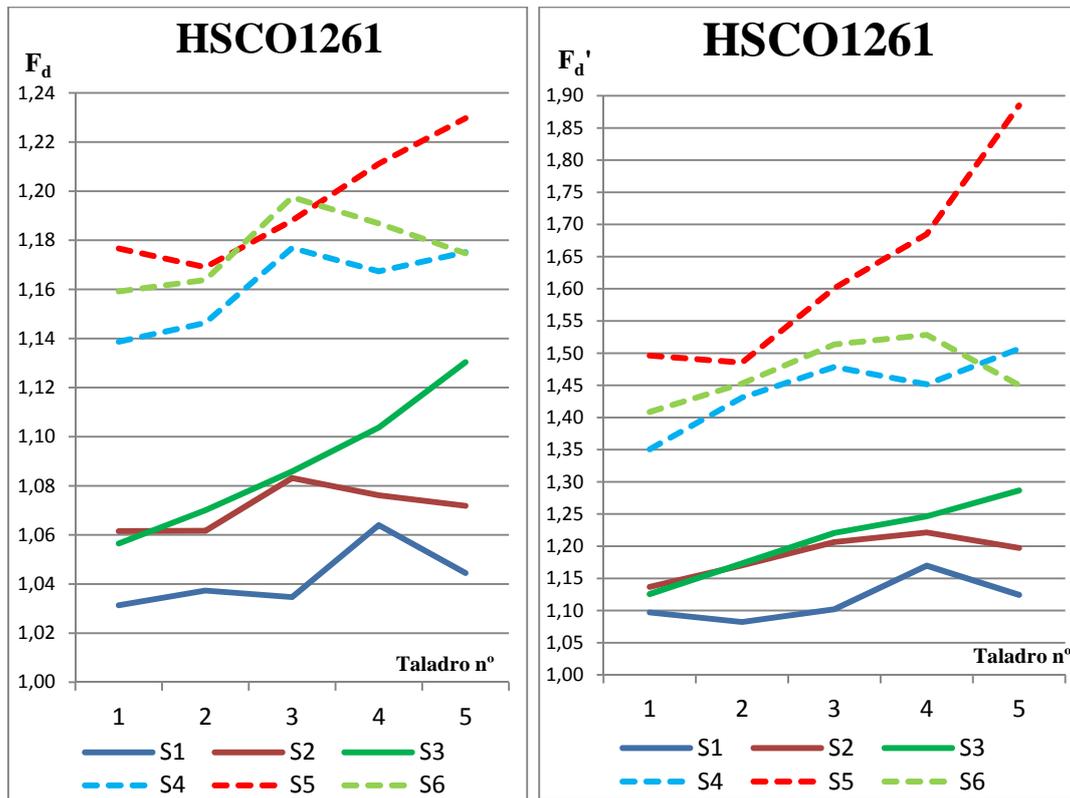


Figura 4.34. Daño por delaminación HSCO1261.

4.4.2 Delaminación media entre brocas y series

Mediante las Figuras 4.35 y 4.36 podemos realizar un estudio comparativo de la delaminación entre las diferentes brocas:

Promedio F_d'	S1	S2	S3	S4	S5	S6
HSC05524 (800rpm)	1,1358	1,2744	1,1861	1,2743	1,4147	1,3614
HSC05524 (3000rpm)	1,0982	1,3551	1,4384	1,6621	1,7474	1,6583
HSC01261	1,1150	1,1864	1,2105	1,4437	1,6305	1,4707

Tabla 4.22. Valores medios de F_d' de las series

4. RESULTADOS

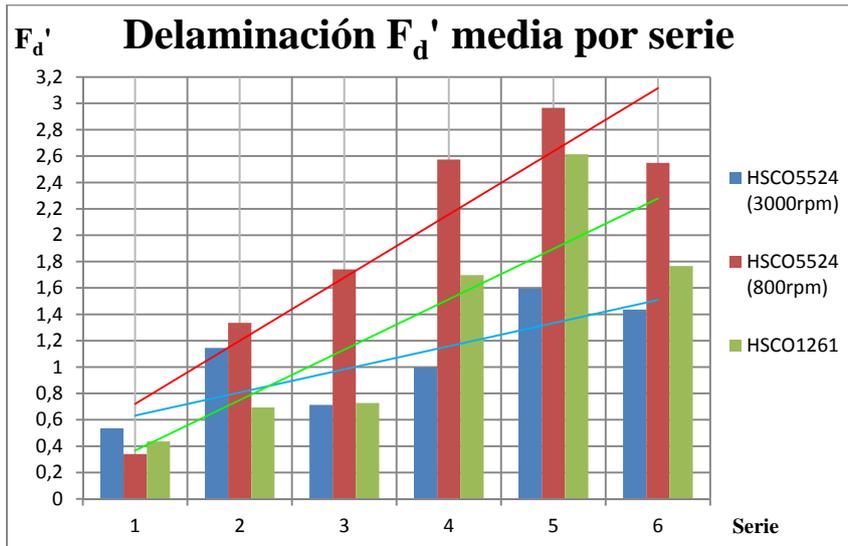


Figura 4.35. Daño por delaminación (F_d').

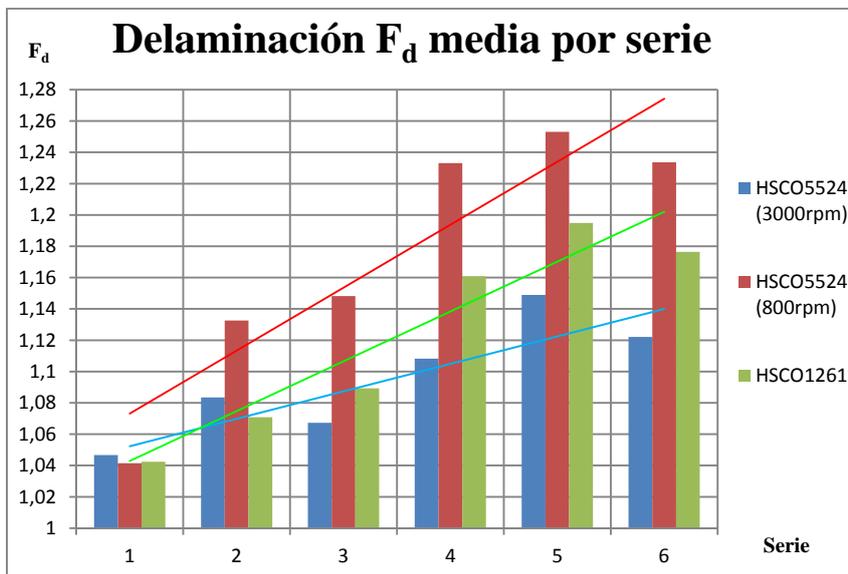


Figura 4.36. Daño por delaminación (F_d).

El primer rasgo que sacamos en claro es la menor delaminación obtenida con HSCO5524 (3000rpm), seguida de HSCO1261 y finalmente HSCO5524 (800rpm).

La ligera menor delaminación en HSCO1261 en los primeros taladros en comparación con HSCO5524 a 3000rpm se debe muy probablemente a que esta primera se desgaste más rápidamente como ya se demostró, originando a posteriori mayores daños por delaminación. Sería de esperar que si se ensaya con la broca HSCO1261 a 3000rpm (menores desgastes) se obtuvieran menores daños por delaminación que con HSCO5524.

En la tabla 4.23 Se muestra la media del factor F_d' de todos los taladros realizados para cada broca junto con el incremento porcentual respecto a HSCO5524

4. RESULTADOS

(800rpm) de cada factor correspondiente. Para el factor F_d' estos incrementos son mayores, lo que demuestra que se le está dando un peso importante a la aparición de grietas, las cuales genera unos mayores incrementos entre las series.

	Factor F_d' medio	Factor F_d medio
HSC05524 (800rpm)	1,4933	1,1737
HSC05524 (3000rpm)	1,2729 (-14,76%)	1,0970 (-6,534%)
HSC01261	1,3428 (-10,08%)	1,1224 (-4,37%)

Tabla 4.23. Delaminación media de cada broca.

Cabe mencionar que estas grietas es muy posible que penetren más allá del primer laminado (Figura 4.37). Para determinar con exactitud este daño sería conveniente un estudio con otras técnicas que lo permitan (ultrasonidos, infrarrojos, simulación...).



Figura 4.37. Detalle de grietas (levantamiento de fibras longitudinalmente).

En las siguientes imágenes se puede ver el daño producido en el taladrado. La placa está orientada en la misma posición en la que se siguió el orden de realización de ensayos (Figura 4.38), como ya se explicó en el apartado 3.3.3 *Realización del ensayo*.

4. RESULTADOS

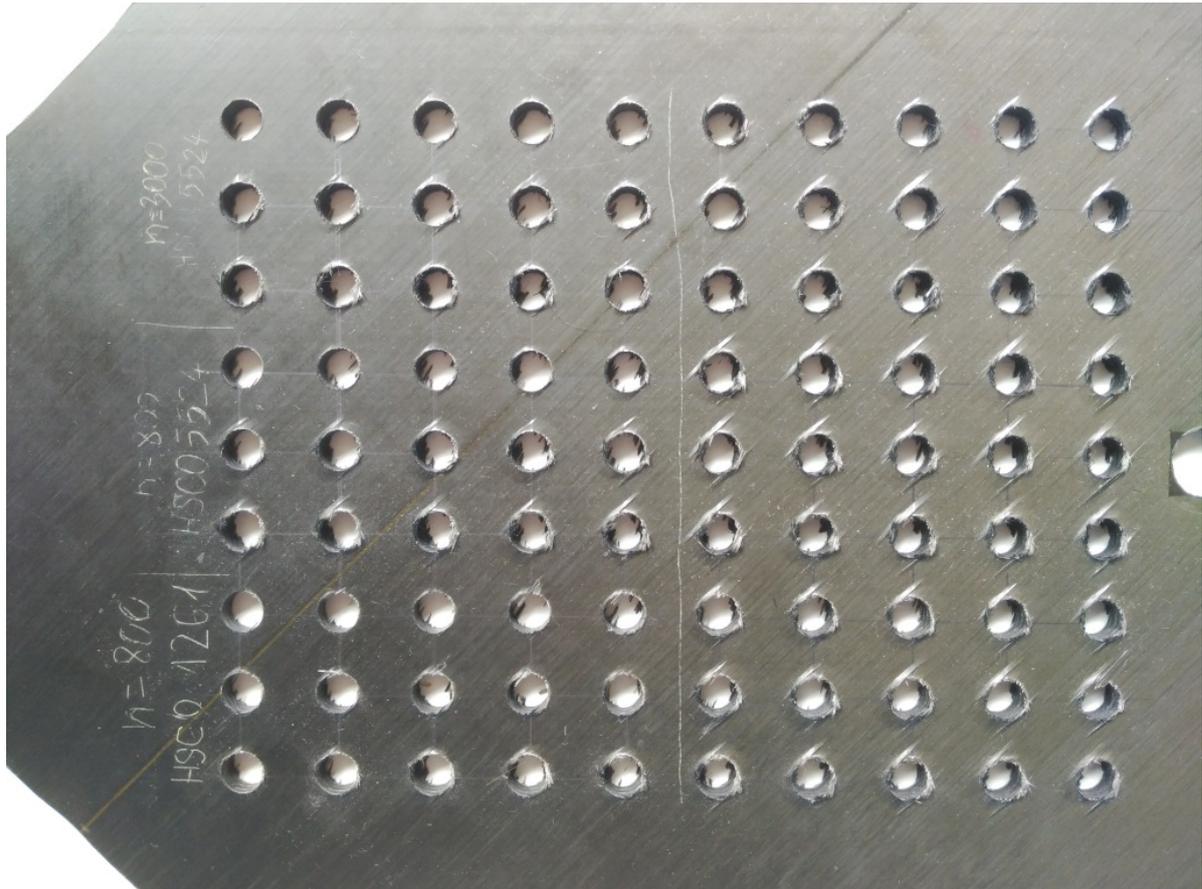


Figura 4.38. Daño por delaminación de todos los taladros realizados (entrada).

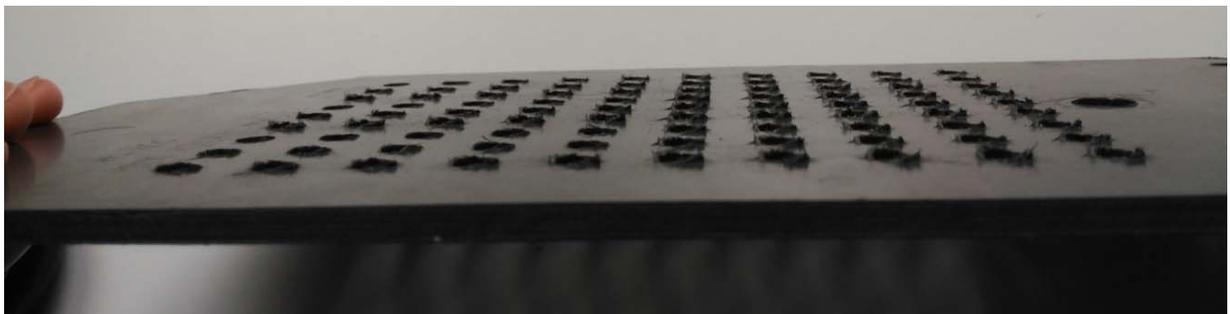


Figura 4.39. Daño por astillamiento de todos los taladros realizados (entrada).

4. RESULTADOS

4.5 Análisis Fuerza de empuje - Delaminación

En este apartado se relacionará la fuerza de empuje y la delaminación F_d' , pues ofrece una información más próxima al daño real. Para tal fin se representará gráficamente el factor de delaminación frente a la fuerza de empuje para cada taladro. Dicha representación se hará conjuntamente de todas las series para una misma broca para poder observar tendencias.

Nuevamente tenemos representado los avances por colores:

- V_{fn} : Azules
- V_{f+} : Rojos
- V_{f-} : Verdes

4.5.1 HSC05524 (800rpm)

Tanto en esta como en las posteriores gráficas, al unir las líneas obtenidas de los diferentes puntos de los taladros de la misma serie, dan lugar a algunas gráficas irregulares en su crecimiento (tendencia natural que esperábamos) causada principalmente por factores aleatorios en las fuerzas de corte y en la delaminación, siendo estos últimos de mayor notoriedad.

La existencia de irregularidades en la delaminación se traduce gráficamente en máximos o mínimos. Por el contrario, las irregularidades en las fuerzas de corte se reflejan cuando la gráfica se desplaza hacia la izquierda, originando una función en forma de “S” o similar.

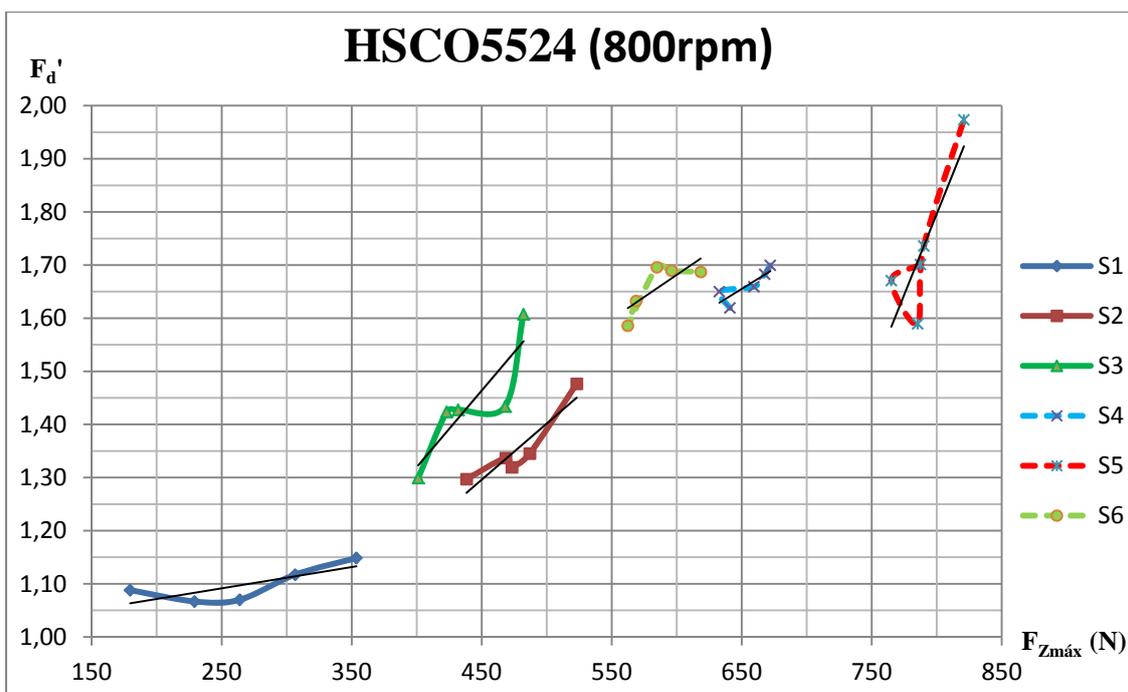


Figura 4.40. Gráfica F_d' frente Fuerza de empuje para HSC05524 (800rpm).

4. RESULTADOS

En definitiva, estas irregularidades tienen lugar cuando un taladro presenta menores valores de F_z y/o de F_d' que su inmediatamente anterior de la misma serie; sin embargo, el dato realmente interesante es el progresivo crecimiento de ambas variables con los sucesivos taladros al trazar la tendencia media de cada serie de forma lineal (aplicación de mínimos cuadrados con los puntos de cada serie).

De tal manera que es posible asegurar que **la fuerza de empuje es un factor altamente influyente en el daño por delaminación.**

4.5.2 HSC05524 (3000rpm)

Para estas condiciones de corte los resultados en algunas series son bastante más dispersos que en los otros ensayos. No obstante la tendencia de todas las series sigue siendo la de aumentar la delaminación con la fuerza de empuje.

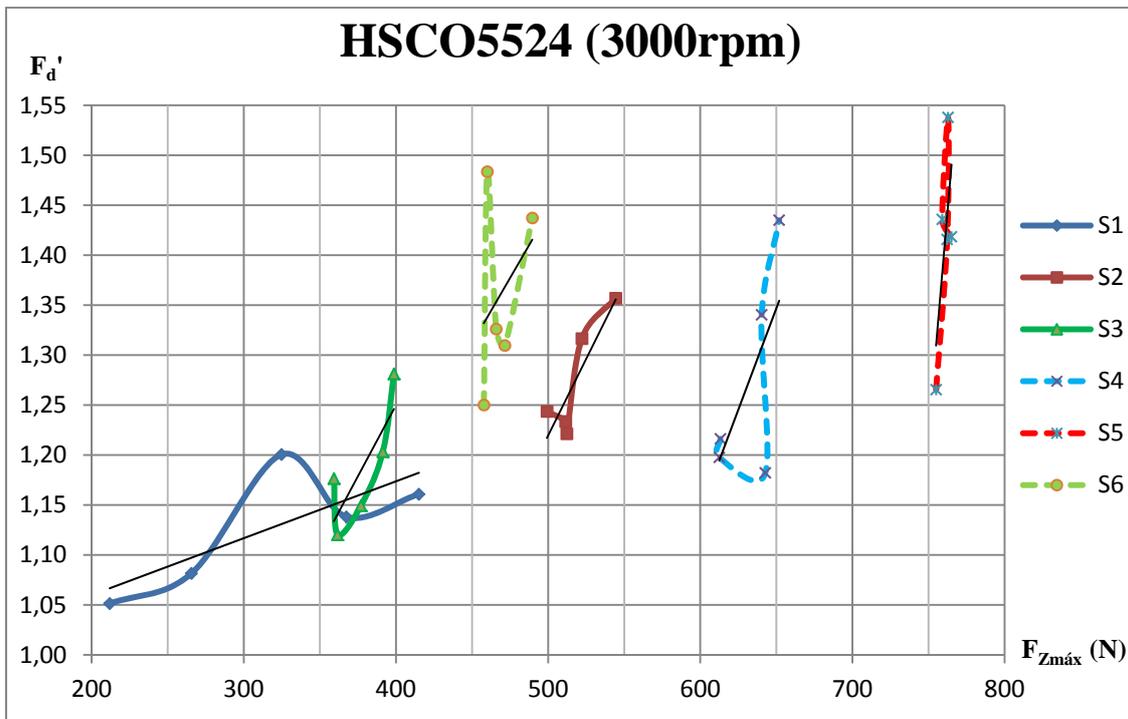


Figura 4.41. Gráfica F_d' frente Fuerza de empuje para HSC05524 (3000rpm).

4.5.3 HSC01261

Las conclusiones son equiparables a las obtenidas anteriormente.

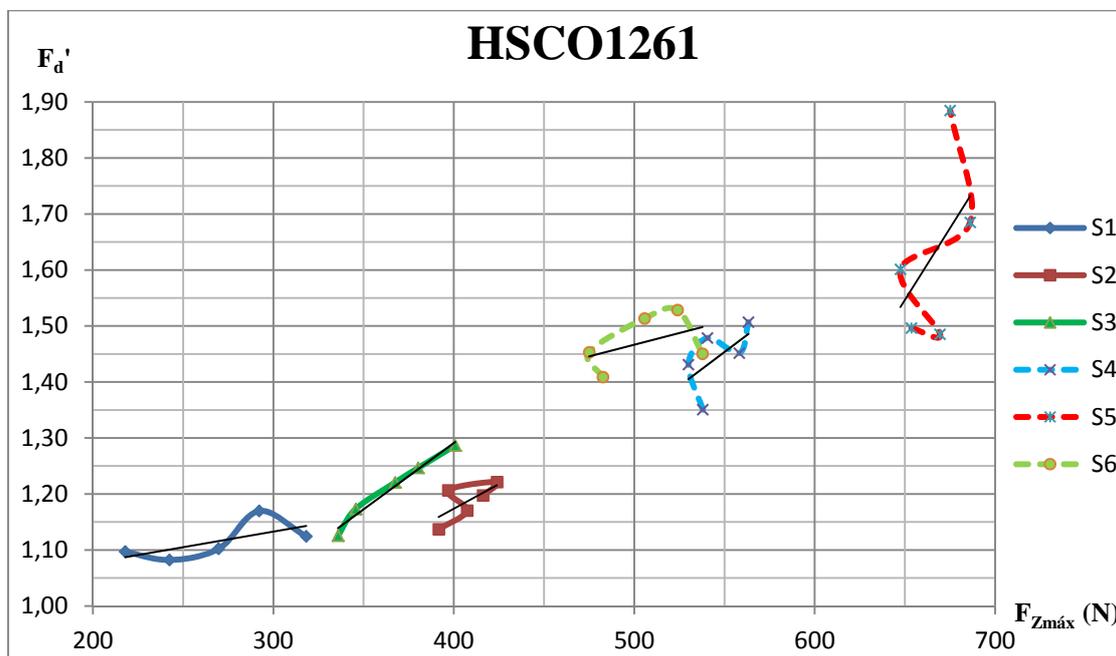


Figura 4.42. Gráfica F_d' frente Fuerza de empuje para HSC01261.

4.5.4 Comparaciones entre brocas

La pendiente de estas líneas nos da una primera idea de la velocidad de variación de ambos factores:

Pendientes pequeñas indican pequeños aumentos de la delaminación en dicha serie, con un aumento de mayor importancia de las fuerzas de empuje.

Pendientes grandes indican grandes aumentos de la delaminación con pequeños incrementos en las fuerzas de empuje.

Un rasgo visible al comparar las tres brocas es la cierta diferencia entre las pendientes de sus series:

- ✓ Pendiente HSC05524 (800rpm) $\approx \geq 1$
- ✓ Pendiente HSC05524 (3000rpm) $\approx > 1$
- ✓ Pendiente HSC01261 $\approx \leq 1$

De tal manera que podríamos decir en líneas generales que en la broca HSC05524 (3000rpm) la delaminación aumenta en gran medida en comparación con la fuerza de empuje, teniendo ésta una mayor influencia sobre la delaminación al variar en pequeñas cantidades. Pese a esta posible conclusión, en las últimas series es más probable que predomine un factor aleatorio en el origen de daños por delaminación

4. RESULTADOS

puesto que los resultados en cada serie son muy dispares y especialmente en la serie 5, apenas existe incremento de F_z .

Para las brocas HSC05524 (800rpm) y HSC01261 el aumento de la delaminación guarda una relación bastante más clara con el aumento de las fuerzas de empuje, especialmente en HSC01261, presentando tendencias de aumento de ambos factores más progresivas.

4.4.4.1 Comparativa de valores medios

Para finalizar, se representaron todos los puntos medios de cada serie y se relacionaron mediante una función polinómica de orden 2, obteniendo unas funciones totalmente coherentes con los resultados expuestos (Figura 4.43)

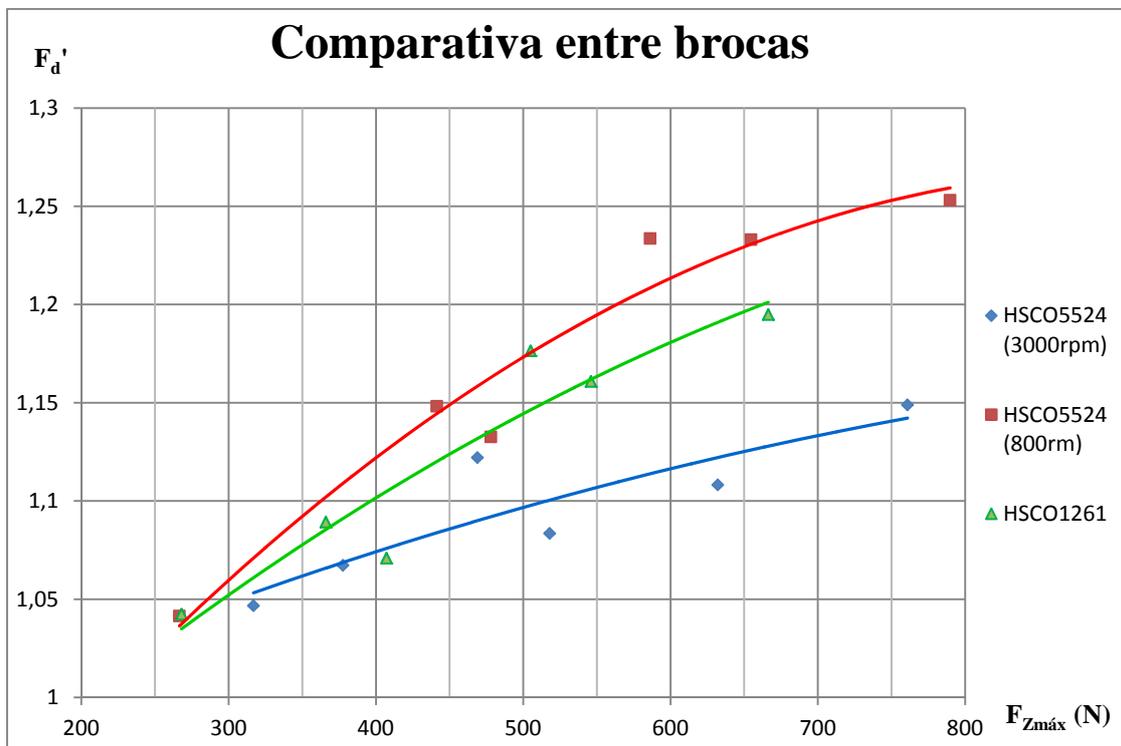


Figura 4.43. F_d' frente Fuerza de empuje para la media de cada serie.

De nuevo podemos hacernos una idea de la diferencia entre la delaminación entre brocas, de cómo va creciendo la diferencia entre éstas a medida que aumentan las fuerzas de empuje. También es apreciable la similitud de tendencias que siguen las brocas que giran a 800rpm en comparación con la que gira a 3000.

5. CONCLUSIONES

El objetivo de este estudio fue el de reducir el riesgo de delaminación, considerada como el defecto más frecuente y crítico en este tipo de mecanizado. Con el fin de comparar y escoger las herramientas y condiciones de corte, se estudiaron las fuerzas de corte y el daño por delaminación individualmente y posteriormente se correlacionaron para obtener estas conclusiones.

5.1 Fuerzas de corte

Puesto que para cada serie de 5 taladros las condiciones de corte no varían, el único condicionante que produce variaciones importantes en las fuerzas de empuje es el desgaste de la herramienta. Por lo tanto, dichas variaciones porcentuales de la fuerza entre taladros se pueden considerar como incrementos del desgaste de la herramienta.

El desgaste de las herramientas empeladas tiene una gran influencia (decreciente) en las fuerzas de empuje en los primeros 15 taladros, principalmente en los 5 primeros. Una vez que la herramienta tiene un gran desgaste (a partir del 15°), su influencia en la variación de la fuerza de empuje entre los taladros posteriores es muy reducida, especialmente a avances altos. Es de esperar que empelando otras geometrías de brocas HSCO el desgaste en el 15° taladro sea muy alto.

Se pudo demostrar que **para avances bajos se obtenían menores fuerzas de empuje** pero, sin embargo, en el análisis de las variaciones de fuerza en las series 3 y 6 (V_f), se detectaron mayores incrementos de fuerza entre taladros, significando que **el desgaste con estos avances se produce con mayor rapidez**, siendo especialmente notable en la broca HSCO1261.

La equivalencia entre Fuerza de empuje–Desgaste no siempre será posible, pues nos encontramos con dificultades a la hora de compararlos entre brocas con diferentes condiciones de corte. Es por ello que solamente se pudieron comparar desgastes entre brocas con las mismas condiciones de corte y rangos de variación entre taladros de F_z similares (no fue posible dar un valor concreto de incremento del desgaste entre las dos brocas HSCO5524).

Según lo mencionado, fue posible realizar un cálculo aproximado del desgaste final en las brocas HSCO5524 (800rpm) y HSCO1261 (mismas condiciones de corte) gracias a las variaciones de las fuerzas de corte. Se obtuvo en los taladros de la primera serie un incremento de la fuerza casi del doble para HSCO5524 (800rpm). Posteriormente se realizaron comparaciones de incrementos respecto de la broca menos desgastada, obteniendo que para 20 taladros, HSCO5524 (800rpm) estaba desgastada aproximadamente un 20% más respecto a HSCO1261; para 25 taladros, aproximadamente un 18,5% y para 30 (desgaste final), un 16,1%.

5. CONCLUSIONES

De lo expuesto anteriormente, se saca la conclusión de que **HSC05524 (800rpm) tiene un desgaste altísimo en la primera serie, mientras que el de HSC01261 es más progresivo**, llegando a sufrir mayores incrementos de fuerza (y desgaste) que HSC05524 (800rpm) en las últimas series.

Gracias a la comparativa entre fuerzas de corte entre brocas, pudimos deducir que **la broca HSC05524 (800rpm) tendría un desgaste superior a HSC05524 (3000rpm)**, pues esta última presentaba un incremento de fuerza respecto a la primera de +18,89% en la primera serie, mientras que para la cuarta, el incremento esta vez era de -3,43%, lo que supone que HSC05524 (800rpm) incrementa más rápidamente las fuerzas de empuje debido a un desgaste más acusado. Dicha diferencia incremental también se ve reflejada al comparar las series 2-5 y 3-6.

La deducción anterior pudo ser corroborada al realizar una medición aproximada del desgaste mediante microscopio, obteniendo que la broca HSC05524 a 800rpm se desgastaba un 15,2% más respecto a HSC05524 a 3000rpm.

Como última conclusión respecto al desgaste, se puede comprobar que **para altas velocidades de avance como de giro, el desgaste de estas brocas es bastante menor**, aunque se produce igualmente de forma rápida en comparación con el taladrado de otros materiales apropiados para las mismas.

5.2 Delaminación

La gran tendencia de las tres primeras series a aumentar la delaminación en sus sucesivos taladros de una manera clara ya nos hace intuir el peso que tiene el incremento de las fuerzas de corte, especialmente elevado en estas primeras series.

El menor desgaste deducido y comprobado de la broca HSC05524 (3000rpm) respecto a HSC05524 (800rpm) se ve reflejado en los factores de delaminación, pues a 3000rpm se aprecian menores incrementos de F_d' entre series, debido a su desgaste menos acusado y más progresivo que el de HSC05524 (800rpm), en el cual los incrementos de daño son altísimos en las primeras series y reducidos en las últimas. Así mismo, se observó como para la broca HSC01261, el factor de delaminación se encontraba entre medias de ambas.

Se pudo concluir en que **para altas velocidades, la broca, una vez alcanzado un cierto grado de desgaste, presenta resultados muy aleatorios** (de valores altos de F_d') y sin apenas incrementar las fuerzas de corte, al igual que el desgaste.

Para avances altos, manteniendo la velocidad de giro, se midieron mayores longitudes de las gritas generadas. Así mismo, también se detectaron mayores

5. CONCLUSIONES

grados de delaminación para dichos avances, siendo menor el daño a mitad que se reducía el avance.

La menor delaminación producida para altas velocidades de corte puede deberse en parte a un aumento de la temperatura del material, reduciendo su resistencia al cizallamiento y, sin embargo, pudiendo originar daños internos entre laminados de FC, los cuales podrían despegarse a causa de la mayor temperatura. Estos daños deberían ser estudiados con otras técnicas como radiografía, ultrasonido o simulación, pudiendo dar lugar a daños más críticos que los obtenidos en este estudio.

5.3 Comparaciones globales

Uno de los resultados de mayor importancia fue la demostración de que **el ángulo de la punta en brocas convencionales tiene bastante relevancia a la hora de mecanizar FC**. Para nuestro caso, analizando la **delaminación peel-up** (entrada), con un ángulo de 130° (HSC01261) se obtuvieron menores desgaste de herramienta (en las mismas condiciones de corte) y por consiguiente, menores fuerzas de corte y menor daño por delaminación en comparación con una broca del mismo material pero con un ángulo de punta de 118° y una menor arista de corte transversal (HSC05524), cosa que en un principio es preferible al mecanizar estos materiales, pues reduce el fenómeno de indentación (reduce la fuerza de empuje). No obstante, dicha reducción de delaminación sería apreciable principalmente a la salida (push-out) o entre laminados, cosa que no fue posible medir y determinar con los medios disponibles, pudiendo obtener resultados diferentes a los expuestos.

Por otro lado, **para brocas HSCO con un ángulo de 118° a avances y velocidades de corte elevadas, se obtuvieron altas fuerzas de corte y, sin embargo, los menores daños por delaminación**. Esto se explica debido principalmente a un menor desgaste para estas velocidades, originando menores incrementos de las fuerzas de empuje y delaminaciones menos críticas en las últimas series que con velocidades bajas. Pese a todo, sería conveniente un análisis interno de los laminados para descartar daños producidos por las altas temperaturas generadas (reducen la fuerza crítica de delaminación).

Quedó demostrado que, de forma general, **avances bajos generan menores fuerzas de corte y menor delaminación**, tanto periférica al agujero como en forma de grietas. Como contraposición, el desgaste de la herramienta en estas condiciones de corte es mayor.

Si las tendencias de fuerzas entre estos dos tipos de brocas son similares, sería de esperar que la broca HSC01261 (130°) presentara menores desgastes, fuerzas de



5. CONCLUSIONES

corte y delaminación que HSC05524 (118°) al trabajar con ella a altas velocidades de corte y avance.

No obstante, y pese a las diferencias considerables entre brocas que hemos obtenido, el desgaste sufrido por este tipo de herramienta es excesivamente elevado para poder llegar a ser rentable en mecanizados que exijan un cierto grado de calidad y por ello, su uso estará muy limitado en este ámbito.

6. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

La principal continuación de este estudio podría estar orientada a determinar el daño por delaminación mediante otros métodos que aportan mayor información y fiabilidad, como son ultrasonidos o radiografías para comparar resultados con los obtenidos mediante imágenes procesadas y medidas por ordenador. Mediante este estudio descartaríamos daños graves que pueden tener lugar al mecanizar con altas velocidades de corte.

Otro estudio interesante sería el mecanizado con la broca HSCO1261 a altas velocidades de corte y avance para poder verificar que supera de nuevo el acabado obtenido con HSCO5524, pudiendo ser ésta la mejor opción para trabajar con brocas HSCO en FC. De ser así, el siguiente paso sería el determinar y afinar las condiciones de corte óptimas para esta broca, pudiendo combinar avances bajos y velocidades de corte altas o viceversa.

Para complementar este estudio o realizarlo en otro similar, sería de gran interés la determinación del desgaste de la herramienta de una forma fiable para compararlo con el incremento porcentual de desgaste calculado a través de las variaciones de las fuerzas de corte. Para ello se debería medir el desgaste después de cada taladrado para posteriormente poder hacer comparativas desgaste-fuerza de corte-delaminación.

En el análisis de datos, se intentó procesar el par medido para relacionarlo posteriormente con la delaminación y fuerzas de empuje. El inconveniente encontrado fue que dichos valores eran muy pequeños (en torno a 1Nm o menores) y su medida era altamente irregular. No obstante se logró obtener unos gráficos del par donde se apreciaba su tendencia pero, sin embargo, el ruido que poseían era excesivamente alto y las diferencias entre taladros eran difícilmente comparables debido a ello. Sería necesario tratar de obtener una adecuada configuración en DasyLab medir correctamente el par, ya sea mediante el momento o las fuerzas en F_x y F_y , pudiendo hacer estimaciones de potencia y de influencia del par en la delaminación.

Pese a centrar el estudio en brocas HSCO, este proyecto puede servir de pauta para desarrollar otros estudios centrados en brocas de diferentes geometrías o materiales (más apropiadas para la FC), pues las cadenas de medida ya están completadas y la metodología a seguir sería muy similar. Además, se dispone del factor F_d' , que se presenta como una alternativa al factor de delaminación estandarizado con el que se ha comparado y se ha llegado a la conclusión de que sus similitudes son parecidas, pero acentuando el daño para grietas considerables.

Por último, un posible punto a estudiar es el origen de los picos obtenido en el análisis de la frecuencia de las señales en DasyLab, los cuales son probablemente



6. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

originados por vibraciones del dinamómetro o fresadora al entrar en resonancia a ciertas velocidades.

7. BIBLIOGRAFÍA

Libros consultados:

BOOTHROYD, Geoffrey. *Fundamentals of Metal Machining and Machine Tools*. Crc Press, 1988.

GUISÁNCHEZ, José L. C. *Problemas Resueltos De Tecnología De Fabricación*. Editorial Paraninfo, 2005.

KALPAKJIAN, Serope, et al. *Manufactura, Ingeniería y Tecnología*. Pearson Educación México;, 2002.

MICHELETTI, Gian F.; and DOMÉNECH, Tomas L. *Mecanizado Por Arranque De Viruta: Tecnología Mecánica*. Blume, 1980.

MIRAVETE, Antonio. *Materiales Compuestos 03*. Reverté, 2003.

SANDVIK, Coromant. *El Mecanizado Moderno, Manual Práctico*. , 1994.

Artículos y tesis consultadas:

ÁLVAREZ, M., et al. Influencia De La Relación Velocidad De Corte-Avance En La Calidad Superficial De Muestras Taladradas De Fibra De Carbono. *Revista De Metalurgia*, 2005, vol. 41, no. Extra, pp. 361-364.

CARRASCO, Juan Carlos López. Determinación De Los Factores Que Influyen En El Desempeño De Los Insertos De La Serie 4000 De Sandvik En Un Proceso De Torneado En Seco Para Acero Inoxidable Tipo 304 y Acero Aleado AISI 4140 Con La Creación De Soluciones Que Puedan Corregir Dichos Factores De Influencia, 2004.

CASTILLO, García; and KALAMIS, Shirley. Análisis De Laminados De Materiales Compuestos Con Precarga En Su Plano y Sometidos a Impacto, 2007.

CHEN, Wen-Chou. Some experimental investigations in the drilling of carbon fiber-reinforced plastic (CFRP) composite laminates. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1997, vol. 37, no 8, p. 1097-1108.

CUESTA, M., et al. Heat Transferred to the Workpiece Based on Temperature Measurements by IR Technique in Dry and Lubricated Drilling of Inconel 718. *Applied Thermal Engineering*, 2016, vol. 104, pp. 309-318.

DAVIM, J. Paulo; RUBIO, J. Campos; ABRAO, A. M. A novel approach based on digital image analysis to evaluate the delamination factor after drilling composite laminates. *Composites Science and Technology*, 2007, vol. 67, no 9, p. 1939-1945.

7. BIBLIOGRAFÍA

DE ALBUQUERQUE, Victor Hugo C.; TAVARES, João M. R. and DURÃO, Luís M. *Evaluation of Delamination Damages on Composite Plates using Techniques of Image Processing and Analysis and a Backpropagation Artificial Neural Network.* , 2008.

GODOY, Juan, et al. Medición De Las Fuerzas De Corte Con Un Dinamómetro Piezoeléctrico Durante El Taladrado Térmico Por Fluencia. *Revista Facultad De Ingeniería-Universidad De Tarapacá*, 2003, vol. 11, no. 1, pp. 65-69.

HERBERT, Mervin A., et al. Evaluation of Drilling Induced Delamination of Carbon Fiber Reinforced Polymer Composite using Solid Carbide Drills. *European Scientific Journal*, 2014, vol. 10, no. 15.

HOCHENG, H.; and TSAO, CC. The Path Towards Delamination-Free Drilling of Composite Materials. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, vol. 167, no. 2, pp. 251-264.

KOBOEVIĆ, Nikša; JURJEVIĆ, Mateo and KOBOEVIĆ, Žarko. Influence of Cutting Parameters on Thrust Force, Drilling Torque and Delamination during Drilling of Carbon Fibre Reinforced Composites. *Tehnički Vjesnik*, 2012, vol. 19, no. 2, pp. 391-398.

MARQUES, António T., et al. *Delamination Analysis of Carbon Fibre Reinforced Laminates.* , 2007.

MIŠKOVIĆ, Ante; KOBOEVIĆ, Nikša and CARIĆA, Ćira. *The Effect of Cutting tool Geometry on Thrust Force and Delamination when Drilling Carbon Fibre Reinforced Composite Materials.* Citeseer, 2011.

RATHOD, Chetan; and CHUDASAMA, Mr Mahesh. An Investigation of Hole Size, Circularity and Delamination during Drilling Operation of Carbon Fiber Reinforced Polymer-A Review. *International Journal for Innovative Research in Science and Technology*, 2015, vol. 1, no. 10, pp. 3-7.

RODRÍGUEZ-MOLINER, Tania, et al. Influencia de los parámetros de corte en el espesor de la zona de deformación plástica secundaria. *Ingeniería Mecánica*, 2010, vol. 13, no 3, p. 56-63.

ROMMEL, J. y Contretas G. La mecha para taladrar: La geometría de la punta de la broca helicoidal, 2014.

ROSELLÓ, Jaime Planas. *Introducción a la instrumentación*, 2000.

SEDLACEK, J.; and SLANY, M. Analysis of Delamination in Drilling of Composite Materials. *MM Science Journal*, 2010.

TSAO, C. C.; HOCHENG, H. Effects of exit back-up on delamination in drilling composite materials using a saw drill and a core drill. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2005, vol. 45, no 11, p. 1261-1270.



7. BIBLIOGRAFÍA

VIJAYARAGHAVAN, Athulan. Drilling of Fiber-Reinforced plastics—tool Modeling and Defect Prediction. *Masters Report, University of California, Berkeley*, 2005.

Páginas web de consulta

www.autonocion.com (última consulta 21/03/2016)

www.hexcel.com (última consulta (28/03/2016)

<http://www.sites.upiicsa.ipn.mx> (2/04/2016)

www.sandvik.coromant.com/es-es/knowledge/drilling (última consulta 5/04/2016)

www.guhring.com (última consulta 2/05/2016)

<http://www.mfg.mtu.edu/cyberman> (última consulta 20/05/2016)