



TRABAJO FIN DE MASTER

Determinación de leyes de corte y de desgaste en materiales compuestos CFRP y en macizados Nomex/resina epoxy para la posterior monitorización de operaciones de recantado.

Iván Provedo Presencio

Master Universitario en Ingeniería Industrial

Director: Franck Girot Mata

Curso: 2018/2019



RESUMEN TRILINGUE

RESUMEN

Hoy en día el uso de materiales compuestos para la fabricación de aeronaves en el sector aeronáutico es indispensable. A su vez, debido a que es un campo inexplorado, los avances tecnológicos en esta área están a la orden del día en todas las compañías punteras. Este trabajo tiene como objetivo la automatización del proceso de mecanizado de estos materiales. Es primordial elegir las herramientas que mejor comportamiento tienen con los composites. Para ello se diseñan y se realizan una serie de ensayos cuyos resultados se analizan con el fin de poder obtener las leyes de corte y desgaste de dichas herramientas. Estas ecuaciones se introducirán en el algoritmo diseñado para introducirlo al robot que será encargado de completar la automatización.

ABSTRACT

Nowadays the use of composites for the manufacturing of airplanes in the aerospace sector is essential. Moreover, due to it is an unexplored field, the technological advances are the order of the day in the leading companies. This project has the automation of the machining process of composites as primordial objective. It is important to choose the best tools which have the best behavior faced with composites. In order to complete that aim, there are some tests which must be done for obtaining the results which will be used to design the cut and wear equations. Those equations will be introduced in the algorithm of the robot that will complete the automation of the machining.

LABURPENA

Gaur egun, sektore aeronautikoan, ezinbestekoa da material konposatuen erabilpena aireontzien fabrikaziorako. Era beran, behatu gabeko eremua denez, arlo honetako aurrerapen teknologikoak eguneko agindura daude puntako elkarte guztietan. Lan honen helburua material hauen mekanizazio prozesuaren automatizazioa da. Ezinbestekoa da konpositeekin portaera onena duten erramintak aukeratzea. Horretarako, zenbait entsegu diseinatu eta burutzen dira, hauekin lortutako emaitzak aztertzen direlarik erraminten ebaketa eta higadura legeak lortzeko asmoz. Ekuazio hauek, automatizazioa burutuko duen errobotari barneratu zaion algoritmoan gehituko dira



INDICE

RESUMEN TRILINGUE	2
RESUMEN	2
ABSTRACT	2
LABURPENA	2
1. INTRODUCCIÓN	8
2. CONTEXTO	10
2.1 Localización del proyecto	10
2.2 Sector aeronáutico.....	12
3. ESTADO DEL ARTE	14
3.1 Los composites en el sector aeronáutico.....	14
3.2 La operación de mecanizado de composites en el sector aeronáutico.	15
3.3 La automatización de la operación de mecanizado de composites en el sector aeronáutico.....	17
3.4 Composites comunes y formas de mecanizado.....	17
3.4.1 Fibra de carbono (CFRP)	18
3.4.2 Panal de nido de abeja “Honeycomb”	20
3.4.3 Macizado	24
3.5 Modelos de fuerzas.	25
4. ALCANCE/OBJETIVOS	27
5. BENEFICIOS DEL PROYECTO	29
5.1 Beneficios técnicos	29
5.2 Beneficios secundarios/económicos	30
6. ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS	31
6.1 Materiales	31
6.1.1 Macizado	31
6.1.2 CFRP	33
6.1.3 Núcleo Honeycomb.....	34
6.2 Herramientas	36
6.2.1 Alternativa 1	38
6.2.2 Alternativa 2	38
6.2.3 Alternativa 3	39
6.2.4 Comparación de alternativas.....	40
7. METODOLOGÍA	42
7.1 Diseño de experimentos y montaje de probetas	44
7.1.1 Macizado	45
7.1.2 CFRP	48
7.1.3 Núcleo Honeycomb.....	51



7.2 Sistemas de medición de fuerzas	53
7.2.1 Sistema Spyke	54
7.2.2 Sistema Kistler	55
7.2.3 Calibración de los sistemas	56
7.3 Método de análisis del desgaste	58
7.3.1 Instalación	58
7.3.2 Análisis del desgaste	60
7.4 Método de análisis de los esfuerzos	63
7.5 Método de modelización de leyes de corte y desgaste	64
7.5.1 Leyes de corte y desgaste.....	64
7.5.2 Cálculo de los coeficientes	67
7.5.3 Validez de los modelos	67
7.5.4 Análisis de los resultados.....	68
7.5.5 Ensayo de calibración.....	68
7.5.6 Ensayo de mecanizado.....	69
8. DESCRIPCIÓN DE TAREAS Y GANTT	82
8.1 Descripción de tareas	82
8.2 Diagrama Gantt	85
9. ASPECTOS ECONÓMICOS. PRESUPUESTO	87
9.1 Horas internas	87
9.2 Amortizaciones	88
9.3 Gastos	89
9.4 Resumen del presupuesto	90
10. CONCLUSIONES	91
10.1 Ensayo de calibración.....	91
10.2 Ensayo de mecanizado	92
10.2.1 Material Honeycomb.....	93
10.2.2 Material Macizado.....	94
10.2.2 Material Carbono CFRP.....	98
Fuentes de información	103
ANEXO I: Ensayo Calibración	104
ANEXO II: Ensayo de mecanizado	107
ANEXO III: Imágenes distribución normal de los modelos	112
ANEXO IV: Interfaz de Lumiere	116
ANEXO V: Alternativas para fresado de Honeycomb	118



LISTA DE TABLAS E ILUSTRACIONES

Lista de Tablas

Tabla 1: Propiedades mecánicas resina	32
Tabla 2: Propiedades Carbono CFRP	33
Tabla 3: Propiedades mecánicas	34
Tabla 4: Propiedades Honeycomb	35
Tabla 5: Comparación de alternativas	40
Tabla 6: Resumen características herramientas	41
Tabla 7: Ensayos de Macizado	45
Tabla 8: Parámetros de corte	46
Tabla 9: Diseño de las pasadas	48
Tabla 10: Parámetros de corte de las pasadas	49
Tabla 11: Diseño de experimentos Honeycomb	51
Tabla 12: Parámetros de corte	52
Tabla 13: Coeficientes Macizado Tivoly	70
Tabla 14: Coeficientes Carbono Tivoly	72
Tabla 15: Coeficientes macizado WNT	74
Tabla 16: Coeficientes carbono WNT	76
Tabla 17: Coeficientes macizado Kendu	78
Tabla 18: Coeficientes carbono Kendu	80
Tabla 19: Presupuesto horas internas	88
Tabla 20: Presupuesto amortizaciones	88
Tabla 21: Presupuesto gasto	89
Tabla 22: Resumen presupuesto	90
Tabla 23: Comparación herramientas macizado	94
Tabla 24: Resumen leyes de corte para macizado	96
Tabla 25: Comparación herramientas ante Carbono	98
Tabla 26: Resumen leyes de corte carbono	100

Lista de ilustraciones

Ilustración 1: Logo grupo de Fabricación de Alto Rendimiento	10
Ilustración 2: Logo Aernnova	11
Ilustración 3: Logo Tecnalia	12
Ilustración 4: Logo CTA	12
Ilustración 5: Componentes de fibra de carbono en aeronáutica	14
Ilustración 6: Propiedades a tener en cuenta en el mecanizado de materiales compuestos	16
Ilustración 7: Fibra de carbono CFRP	18
Ilustración 8: Fresas multidiente para mecanizado de CFRP	19
Ilustración 9: Fresa multidiente recanteando CFRP	19
Ilustración 10: Estructura panal de abeja	20
Ilustración 11: Fresas para Honeycomb	21
Ilustración 12: Herramientas tipo Corecut	22



Ilustración 13: Herramientas tipo Pocket Cut	22
Ilustración 14: Herramientas tipo Valve Type Cutter.....	23
Ilustración 15: Probeta de Macizado.....	24
Ilustración 16: Probeta e Macizado	33
Ilustración 17: Probeta CFRP.....	34
Ilustración 18: Probeta Honeycomb.....	35
Ilustración 19: Herramienta Tivoly	36
Ilustración 20: Herramienta WNT	37
Ilustración 21: Alternativa 1	38
Ilustración 22: Alternativa 2	39
Ilustración 23: Alternativa 3	39
Ilustración 24: Diseño de barridas (vista lateral)	47
Ilustración 25: Diseño de las barridas (vista superior).....	47
Ilustración 26: Amarre de probeta de macizado	48
Ilustración 27: Probeta CFRP.....	50
Ilustración 28: Amarre de la probeta CFRP	50
Ilustración 29: Montaje real de la probeta CFRP.....	51
Ilustración 30: Probeta Honeycomb.....	52
Ilustración 31: Amarre probeta Honeycomb	53
Ilustración 32: Esquema de esfuerzos	55
Ilustración 33: Proceso recepción de datos.....	55
Ilustración 34: Plano mesa dinamométrica Kistler.....	56
Ilustración 35: Sistema montado real de ensayo	57
Ilustración 36: Microscopio Jiusion.....	58
Ilustración 37: Sistema portaherramientas rotativo	59
Ilustración 38: Instalación completa de análisis de desgaste	60
Ilustración 39: Ejemplo de captura de diente	61
Ilustración 40: Sistema de ecuaciones.....	62
Ilustración 41: Cálculo volumen diente piramidal punta de arista	62
Ilustración 42; Tareas y fechas	85
Ilustración 43: Diagrama Gantt	86
Ilustración 44: Honeycomb comparado con fresa	93
Ilustración 45: Comparación gráfica del desgaste de las herramientas.....	95
Ilustración 46: Comparación gráfica de las fuerzas.....	95
Ilustración 47: Comparativa gráfica desgaste herramientas.....	99
Ilustración 48: Comparativa gráfica fuerza herramientas	99
Ilustración 49: Probeta con ranurados realizados.....	104
Ilustración 50: Sistema completo. Probeta carbono, portaherramientas Spyke y mesa Kistler	105
Ilustración 51: Probeta tras el mecanizado.	106
Ilustración 52: Herramienta Tivoly	107
Ilustración 53: Herramienta WNT	107
Ilustración 54: Herramienta Kendu.....	108
Ilustración 55: Probeta carbono previo mecanizado.....	108
Ilustración 56: Probeta de carbono posterior al mecanizado	108
Ilustración 57: Probetas de Honeycomb previo al mecanizado	109
Ilustración 58: Probeta de honeycomb posterior al mecanizado	109
Ilustración 59: Probeta macizado durante el mecanizado	110



Ilustración 60: Probeta de macizado usada para KENDU en la que se observa la mala infiltración de la resina	110
Ilustración 61: Herramienta Kendu rota en la prueba de macizado.....	111
Ilustración 62: Distribución normal herramienta Kendu material Carbono.....	112
Ilustración 63: Distribución normal herramienta Kendu material macizado	113
Ilustración 64: Distribución normal herramienta Tivoly material Carbono	113
Ilustración 65: Distribución normal herramienta Tivoly material Macizado	114
Ilustración 66: Distribución normal herramienta WNT material Carbono.....	114
Ilustración 67: Distribución normal herramienta WNT material macizado	115
Ilustración 68: Interfaz general software Lumiere.....	116
Ilustración 69: Selección de variables para la Regresión múltiple.....	116
Ilustración 70: Definición de variables	117

1. INTRODUCCIÓN

En este trabajo de fin de master se colabora con la empresa Tecnalía para el proyecto AVANWINGLET, proyecto con origen en la empresa Aernnova. También se trabaja con la empresa CTA y con la filial de Aernnova, Coasa. Para el desarrollo de este trabajo se parte de tres materiales compuestos, con el objetivo de analizar el desgaste de una serie de fresas ante diferentes condiciones de corte. El trabajo concluirá una vez establecidas las leyes de corte y desgaste de dichas herramientas mecanizando cada uno de estos materiales.

El fin principal del proyecto es la automatización del proceso de mecanizado de materiales compuestos. Estos materiales compuestos son muy utilizados hoy en día en el sector aeronáutico, de hecho tienen una alta presencia en las partes no estructurales de los aviones. Con el paso del tiempo y el avance de la tecnología, el uso de estos materiales en partes más importantes de los aviones incrementará, llegando a ocupar gran parte del porcentaje en volumen de las aeronaves. La empresa Aernnova propone la monitorización del proceso, de forma que un robot sea capaz de realizar las operaciones de mecanizado, y así lograr mejores resultados, optar a periodos más pequeños de tiempos y sobre todo no poner en riesgo a los operarios.

En este documento, en primer lugar se explicará el contexto en el que se sitúa este proyecto y la importancia que está tomando la automatización de procesos y el uso de materiales compuestos en el sector aeronáutico. Se expondrán los materiales que deben ser estudiados durante el trabajo, ya que son los que la empresa en cuestión mecaniza en su fábrica. Además también se hará un breve resumen del tipo de herramientas que son más óptimas para el mecanizado de estos materiales, se muestran los parámetros de corte variables para los ensayos y se expone la teoría de los modelos de fuerzas en el desgaste de las herramientas.

Posteriormente, se profundizará en el alcance del proyecto, así como los beneficios que su desarrollo puede conllevar, tanto en el ámbito económico como en el ámbito técnico. Se plantearán las alternativas posibles para llevar a cabo el proyecto y se seleccionara de forma justificada la que mejor se adapte a los requisitos.

A continuación, se plasmará la metodología llevada a cabo para la realización del proyecto, desde el diseño de experimentos hasta la obtención de las leyes de corte y desgaste. En esta parte se expone la realización de los ensayos, y unos análisis de dichos ensayos que permiten seguir avanzando en el proyecto o volver atrás y cambiar algún aspecto. Todos los sistemas utilizados para obtener los resultados son explicados en la metodología.



En el siguiente apartado, se realizará una programación de las tareas realizadas que serán incluidas en el correspondiente diagrama Gantt que permitirá un mejor desarrollo del proyecto, y se acompañara con un presupuesto que tendrá en cuenta dichas tareas y la inversión requerida para acometerlas.

Por último, se presentarán los resultados obtenidos tras los ensayos junto con unas comparaciones entre las diferentes herramientas utilizadas y las respectivas conclusiones para cada uno de los materiales. Se añadirán también en los anexos toda la información restante que sea necesaria para la comprensión completa del trabajo.

2. CONTEXTO

2.1 Localización del proyecto

El presente trabajo ha sido propuesto por Franck Girot, como parte del proyecto AVANWINGLET, el cual pertenece a la empresa AERNNOVA. Una de las líneas de investigación y desarrollo de dicha empresa, una filial de nombre COASA, la empresa TECNALIA y la Universidad del País Vasco (UPV) se encargan de llevar a cabo el proyecto, teniendo cada una de ellas unas responsabilidades definidas.

UPV

La tarea a desarrollar por parte del equipo de la UPV es la de la “Monitorización del recantado y determinación de las leyes de corte en materiales compuestos”. Dicho grupo está compuesto por dos Profesores Doctores (Franck Girot y Unai Alonso Pinillos) y un alumno becario que está realizando el Trabajo Fin de Master correspondiente al Master Universitario en Ingeniería Industrial. Este equipo pertenece al grupo Fabricación de Alto Rendimiento, este grupo está situado en el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Escuela de Ingeniería de Bilbao, perteneciente a la Universidad del País Vasco (UPV).



Ilustración 1: Logo grupo de Fabricación de Alto Rendimiento

El grupo está compuesto por más de 40 personas sumando profesores, personal investigador realizando su Tesis Doctoral y estudiantes colaboradores de grado y master. Este grupo recibe apoyo del resto de profesores de otras áreas del Departamento.

Su trabajo se inscribe en la investigación y docencia relativa a procesos de fabricación, entre ellos el fresado a alta velocidad, la electroerosión, los procesos basados en láser y el rectificado, fundamentalmente. El uso de técnicas CAD/CAM y basadas en el ordenador también es parte del trabajo desarrollado.

Cuenta con taller equipado para la realización de pruebas de mecanizado, dotado de máquinas de última tecnología y sistemas de instrumentación para la captación de fuerzas, temperaturas y otras magnitudes, siempre en la línea de poder obtener mucha información de cada ensayo.

En definitiva, el grupo trata de llevar adelante una investigación de calidad en el campo de la fabricación, posibilitando el uso de sus resultados tanto en la docencia impartida como en los proyectos de transferencia, participando en el desarrollo del lema de la Universidad del País Vasco, Eman ta zabal zazu (Dá y difúndelo).

AERNNOVA

La empresa que más ligada está al proyecto global del que pertenece este trabajo es Aernnova. Es una empresa líder especializada en el diseño y fabricación de Aeroestructuras y Componentes para los principales OEMs. Por tanto, Aernnova es un suministrador de primer nivel de estructuras aeronáuticas para aquellos fabricantes de equipamiento original en el sector aeronáutico. Con más de 700 millones de facturación y 4.700 empleados, son el principal Tier 1 en España y el 10º del mundo.



Ilustración 2: Logo Aernnova

Entre todas sus actividades especializadas, una es la de Aernnova Composites, la cual fabrica y diseña componentes aeronáuticos en materiales compuestos. En dicho sector de la empresa se sitúa el proyecto sobre el cual se basa este trabajo. Sin embargo, dado que el proyecto es de gran envergadura, la filial Componentes Aeronáuticos Coasa SA, se encarga de una parte del proyecto. En nuestro trabajo, Coasa es la encargada de proporcionar las herramientas y las probetas de los materiales correspondientes para la realización del trabajo.

TECNALIA y CTA

Tecnalia, dentro del proyecto, es la encargada de realizar los ensayos correspondientes. En sus instalaciones se realizan las pruebas tanto de mecanizado como térmicas. La Corporación Tecnalia se configura como una Corporación Tecnológica que a través de la investigación es un ejemplo a seguir en desarrollo tecnológico, no solo por los proyectos que realiza por cuenta propia, sino por aquellos en los que se ve involucrado de forma secundaria, gracias a sus trabajadores e instalaciones.



Ilustración 3: Logo Tecnalia

Por otro lado, la empresa CTA, cuyas siglas significan Centro de Tecnologías Aeronáuticas, es un laboratorio especializado en ensayos para proyectos aeroespaciales en la que se testa el desarrollo y certificación de materiales, sistemas y estructuras aeroespaciales.



Ilustración 4: Logo CTA

2.2 Sector aeronáutico

La importancia de la industria aeronáutica a nivel mundial es innegable, siendo la octava industria por detrás de la industria automotriz. Estos números se mantienen a nivel europeo gracias a las grandes empresas del sector, y más en concreto gracias a Airbus, el gigante de la aviación que genera beneficios anuales muy altos, a lo que se añade un número de en torno a 140.000 empleados en todo el mundo.



Esto, unido a todas las empresas suministradoras que hay en el sector, tanto de Airbus como Boeing o Bombardier implica una industria muy fuerte que además solicita una continua innovación en la todos los aspectos para poder adaptarse a las nuevas demandas de mercado. Por tanto, la industria aeronáutica está en continua evolución. Las nuevas y exigentes normas medioambientales, junto con el auge de la actividad han generado un gran interés en desarrollar aeronaves eficientes y con una gran sostenibilidad. Esto, unido a las mejoras acaecidas en los últimos años en el ámbito de los materiales compuestos ha supuesto la incorporación de estos materiales en la fabricación de partes de estas aeronaves, ya siendo tanto materiales compuestos como en otras configuraciones.

Una de las configuraciones más usada son los apilados, consistente en realizar un material compuesto por capas del mismo o de diferente material. La combinación de apilados tiene como principal objetivo mejorar las prestaciones técnicas de los materiales. Si comparamos estos compuestos con los materiales homogéneos, podemos observar como las características mecánicas son superiores, y por ello, dentro del sector aeronáutico, en el cual las prestaciones técnicas son muy exigentes, el uso de estos materiales ha aumentado de forma considerable.

Los materiales compuestos llevan ya tiempo siendo usados con el único objetivo de ahorrar peso, pero siempre en aplicaciones no estructurales, como en asientos, compartimentos de equipajes, en la cabina, o en otros lugares no estratégicos que no afecten a la integridad estructural del avión. Con el paso del tiempo, esto ha ido cambiando y han adquirido una mayor importancia y dichos materiales se pueden ver en zonas sensibles de las aeronaves, como fuselajes, alas o estabilizadores laterales y de cola. Hoy en día, existen aeronaves en las que el material compuesto constituye el 50% del peso, dejándose de usar las aleaciones de aluminio que tanto éxito tenían en los modelos previos de las aeronaves, esto dice mucho de la relevancia que tienen estos materiales compuestos dentro del mundo aeronáutico.

3. ESTADO DEL ARTE

3.1 Los composites en el sector aeronáutico.

Hoy en día, en el sector aeronáutico las exigencias de prestaciones que tienen los materiales empleados en la fabricación son muy altas. La resistencia mecánica, la alta rigidez y el bajo peso son aspectos de gran importancia a la hora de seleccionar el material a utilizar. Desde hace unos años en este sector se han comenzado a utilizar los composites. En un comienzo estos se utilizaron para estructuras secundarias y componentes internos de los aviones. A día de hoy, y gracias a la gran investigación que se ha realizado en este sector, los materiales compuestos son muy utilizados, llegando a estar implementados en partes estructurales muy relevantes de los aviones.

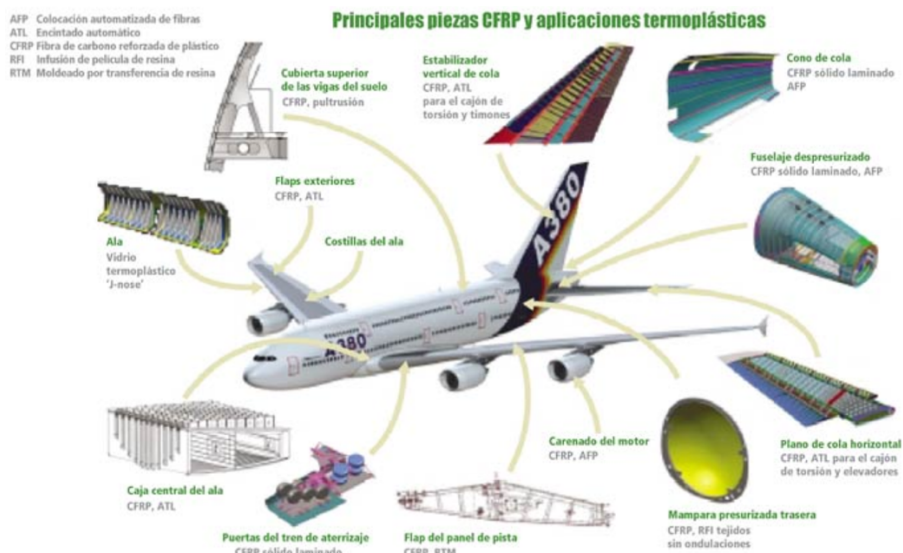


Ilustración 5: Componentes de fibra de carbono en aeronáutica

Como se puede observar en la figura X, los composites están muy presentes, principalmente por que los compuestos de fibra de carbono son capaces de dar respuestas muy positivas a exigencias mecánicas muy estrictas. Dichos resultados positivos pueden incluso superar las prestaciones de los materiales tradicionalmente utilizados en componentes estructurales. Dichos materiales compuestos presentan las siguientes propiedades:

- Los composites logran grandes reducciones de peso. La reducción depende del tipo de sollicitación, se utiliza más cuanto más uniaxiales

son los esfuerzos a los que va a estar sometida la estructura, ya que ante fuerzas en un único eje, los materiales compuestos trabajan muy bien. Es por tanto, que es posible reducir en peso un 25-50% sobre el peso de una estructura de aluminio.

- Los materiales compuestos poseen resistencias a fatiga superiores a la de los materiales metálicos tradicionales.
- La resistencia a la tensión es aproximadamente 5 veces mayor en los composites que en el aluminio o el acero.
- Debido a la discontinuidad de fases de los composites y a su comportamiento viscoelástico, dichos materiales tienen excelentes propiedades de amortiguación.
- La rigidez específica de los materiales compuestos también es mayor que en los materiales metálicos típicos como el acero o el aluminio.

3.2 La operación de mecanizado de composites en el sector aeronáutico.

Debido a la demanda de aviones más ligeros y más eficientes energéticamente, los materiales compuestos se emplean en más de un 50% del peso total de la aeronave. La industria aeroespacial, en este aspecto, está en constante aprendizaje, el cual incrementa el desarrollo tecnológico en cuanto a procesos de manipulación y mecanizado de materiales compuestos. Es por ello por lo que, más allá de los materiales, el sector aeronáutico también trabaja en la optimización de los procesos de producción, con el objetivo de reducir los tiempos de fabricación y los costes, mientras se consigue mayor homogeneidad en las piezas. La automatización del proceso de mecanizado de materiales compuestos es un gran paso para la reducción de tiempos de fabricación.

Los procesos de fabricación de materiales compuestos parte de una forma e intenta lograr una geometría real. Para dotar a la pieza de la geometría final, eliminando material sobrante que se ha depositado en los procesos manuales de deposición de fibra o telas o los procesos automáticos como pueden ser el ATL o el AFP. Para ello se utiliza el recantado, que corta el material sobrante geoméricamente. En función del acabado superficial resultante, y las necesidades de la pieza puede añadirse un proceso de rebabado.

El mecanizado tanto de los polímeros reforzados con fibras de carbono como los demás composites difieren en gran medida del mecanizado convencional de metales. De forma que, la presencia de fibra altamente abrasiva da lugar a un gran desgaste de las herramientas, y genera una resina que limita la temperatura máxima que puede generarse en el mecanizado. Ciertos composites ya poseen dicha resina y por tanto es muy importante también el control de la temperatura de mecanizado. Los principales problemas que presenta el mecanizado de materiales compuestos son los siguientes:

- **El daño térmico.** Las propiedades de los materiales reforzados generan un calor que es absorbido en gran parte por la herramienta de corte. Estas grandes temperaturas generadas aumentan el desgaste de las herramientas de corte y pueden generar daño térmico en la resina que está mecanizándose. Por ello en ciertos composites es importante no superar ciertos valores de temperatura.
- **La delaminación.** Es un efecto que puede producirse en los materiales cuya estructura esta formada por láminas. Es un problema que principalmente se da en las operaciones de taladrado, cuando las fuerzas de corte en la dirección de avance de la herramienta superan las fuerzas existentes entre las capas del material. La delaminación suele ocurrir en la entrada o salida de la broca.
- **Astillamiento.** El astillamiento es el mecanismo de fractura que se puede dar en la fibra de carbono, cuando el corte no es completo.

Por tanto, la operación de mecanizado exige tener muchos factores en cuenta. En primer lugar la geometría de la herramienta, dependiendo de que operación se vaya a realizar, el ángulo de ataque es muy importante, al igual que el radio de punta de la herramienta. En segundo lugar, las propiedades del material a mecanizar, ya sea la orientación de la fibra, el módulo de corte de la matriz, la resistencia a la tensión de la fibra, y más propiedades son determinantes en el resultado final del mecanizado. Por último, las condiciones de mecanizado son otro factor a controlar en la operación, ya que seleccionar una estrategia de corte incorrecta puede favorecer la aparición de los problemas que presenta el mecanizado de materiales compuestos previamente explicados. Dos parámetros principales que marcan la calidad superficial así como la delaminación en la zona de corte son, la velocidad de corte y el avance.

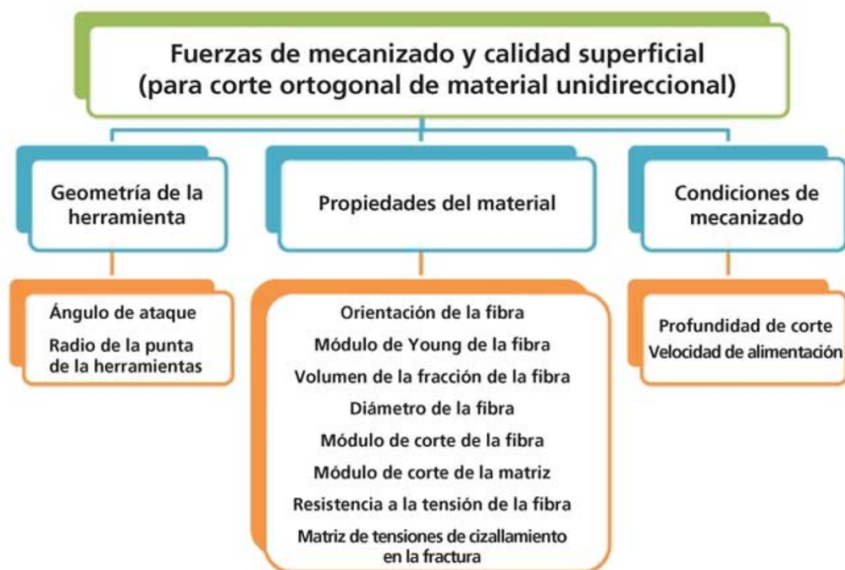


Ilustración 6: Propiedades a tener en cuenta en el mecanizado de materiales compuestos

En cuanto a la estrategia de corte, es importante encontrar el equilibrio entre la velocidad de corte y el avance. Valores elevados de avance generan daños similares a los producidos por impacto. Los valores intermedios de avance pueden presentar problemas en la entrada y salida del ranurado o recantado. Adicionalmente es importante tener en cuenta las partículas generadas durante el mecanizado, que pueden dar lugar a problemas de salud de los operarios. Es por ello por lo que un buen sistema de extracción de viruta es importante durante la operación.

3.3 La automatización de la operación de mecanizado de composites en el sector aeronáutico.

Los actuales ritmos de demanda en el sector aeronáutico han hecho que la fabricación de materiales composites, y mas en concreto de fibra de carbono haya tenido que dejar de lado la forma manual de manipulación para empezar a encontrar formas de automatizado eficaces y fiables.

Por tanto, una de las tareas pendientes es la automatización de los procesos de mecanizado de composites, ya que hay muchas horas de operación a reducir que son clave para reducir costes y cumplir plazos dentro de los proyectos. Los principales motivos de pensar en esta automatización son varios: reducción de costes, mejora de la calidad e incremento de la seguridad en el trabajo. El uso de una máquina para la realización de estas operaciones repetitivas de manera constante incrementa la velocidad de producción y reduce tanto fallos como reparaciones necesarias aumentando la calidad final del proceso.

Las tecnologías AFP y ATL son procesos que utilizan la robótica guiada por ordenador para establecer una o varias capas de cinta de fibra continua impregnada de resina sobre un molde para crear una pieza o estructura. Ambos procesos, que son similares, han sido los primeros sistemas automatizados de fabricación y mecanizado de materiales compuestos. Debido al gran éxito de dichas tecnologías, a día de hoy el objetivo de grandes empresas es lograr la robotización personalizada del mecanizado de los materiales compuestos con los que trabaja cada una de ellas.

3.4 Composites comunes y formas de mecanizado.

En el presente proyecto los materiales composites a utilizar son, la fibra de carbono (CFRP), el panel de abeja “Honeycomb” de aramida y Macizado. Este último consta del núcleo, de Honeycomb, junto con una resina “Scotch-Weld™ EC-3500-2 PMF”, que dota al material de consistencia y rigidez no solo ante esfuerzos uniaxiales. Se requiere por tanto un estudio previo de las diferentes

alternativas de mecanizado que hay hoy en día para estos tres tipos de materiales, de forma que analizándolas, se logre escoger la alternativa más óptima según las especificaciones del proyecto.

3.4.1 Fibra de carbono (CFRP)

El polímero reforzado con fibra de carbono o CFRP, es un plástico reforzado muy fuerte y ligero que contiene fibras de carbono. Los materiales compuestos constan de dos partes, un refuerzo, que en el caso de CFRP es la fibra de carbono y una matriz que es usualmente una resina polimérica, la cual une los refuerzos entre sí.

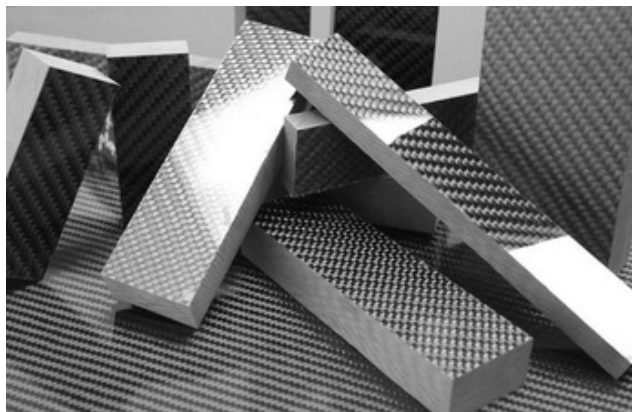


Ilustración 7: Fibra de carbono CFRP

En cuanto al mecanizado de este material, los CFRP plantean desafíos específicos al mecanizar este material. El mecanizado preciso también se complica por las diferentes propiedades que muestran los materiales, según el ángulo de la fresa en que el filo de corte ataca a la fibra de carbono. Por lo tanto, se necesitan herramientas de corte optimizadas para mecanizar con el mejor proceso para lograr cortes limpios sin delaminaciones y sin la necesidad de un mecanizado o repaso posterior.

Las operaciones más comunes son el fresado, con el que se da forma a las piezas, y el taladrado, que se basa en proporcionarle al material una serie de agujeros que sirvan para la posterior unión en el ensamblaje con otras piezas. El fresado es el método de mecanizado más convencional, sin embargo para compuestos de fibra de carbono existen procesos menos comunes como pueden ser el corte por láser, limitado por el problema térmico, y el corte abrasivo por agua a presión. Hoy en día para el recantado y ranurado de las piezas de CFRP, lo más utilizado es el fresado con herramientas de corte multidentado.



Ilustración 8: Fresas multidiente para mecanizado de CFRP

La operación de recantado se realiza con fresa multidiente, y se basa en mecanizar las aristas de la pieza, se puede mecanizar todo el canto o parte de el, en función de la profundidad de corte que se seleccione. Es de vital importancia seleccionar las condiciones de corte adecuadas para la operación, dichas condiciones son:

- Velocidad de corte
- Avance
- Profundidad de pasada vertical
- Profundidad de pasada lateral

Por lo general la velocidad de corte ha de tener valores altos, el avance debe ser no muy alto puesto que, avances excesivos provocan temperaturas altas y en materiales compuestos es la temperatura la que delimita el valor máximo de estos parámetros. En cuanto a las profundidades de pasada, cuanto mayor sea la profundidad de pasada mayor contacto hay entre herramienta y material y por tanto mayor sufre la herramienta.



Ilustración 9: Fresa multidiente recantando CFRP

Cabe destacar que a día de hoy, debido a la complejidad del mecanizado de materiales compuestos, la bibliografía publicada en este campo es menor en comparación con el mecanizado de metales. Este continuo desarrollo en el que se encuentra el mecanizado de composites provoca que muchas marcas de herramientas de corte tengan muchos tipos fresas (con distinto tipo de geometría del diente, distinta densidad de diente, distinto material, etc.) para realizar operaciones casi idénticas. Por tanto, la tarea de escoger la herramienta para una operación determinada de mecanizado es compleja, y requiere de un previo análisis que ayude a sacar conclusiones que permitan elegir la mejor opción. Ante las mismas condiciones de corte para distintas herramientas, aquella que sufra un desgaste menor, será la más óptima en cuanto a la herramienta se refiere, también habrá que observar el acabado del material mecanizado para acabar tomando la mejor decisión posible.

3.4.2 Panal de nido de abeja “Honeycomb”

Los núcleos en forma de panal en fibra de aramida para aplicaciones aeroespaciales, poseen excelentes propiedades de inflamabilidad, están fabricados con aramida y están revestidos con una resina fenólica resistente al calor. El núcleo posee la forma que se observa en la figura 10. Adicionalmente, a dichos núcleos se les suelen añadir placas arriba y debajo de otros polímeros con el fin de reforzarlo, esto se hace para aquellos elementos estructurales que van a estar sometidos a esfuerzos de flexión, y de los que serán comentados posteriormente como “macizado”. En cambio los núcleos se utilizan para elementos aeroespaciales que no poseen tanta importancia estructural y que no van a estar sometidos a grandes esfuerzos, sin olvidar que es una gran solución para esfuerzos uniaxiales en la dirección de las paredes de las celdas ya que la geometría hexagonal propia del panal de abeja proporciona una rigidez muy alta.

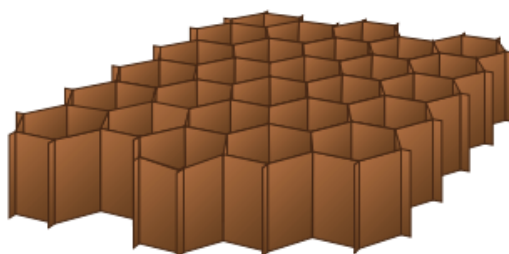


Ilustración 10: Estructura panal de abeja

Los materiales de panel de nido de abeja se utilizan principalmente en el sector aeroespacial. Su alta rigidez sumado al bajo peso que tiene, debido a que principalmente esta lleno de celdas de aire, son las principales características del Honeycomb. Son particularmente adecuados para la construcción de suelos o paredes de fuselaje en aviones. Puesto que es un material cada vez más utilizado en el sector aeronáutico, las innovaciones en cuanto a su fabricación y uso están a la orden del día. Al tener este material una serie de agujeros naturales y de forma continua, el mecanizado de este no es similar al mecanizado de ningún otro material, es por ello que existen diferentes alternativas a la hora de realizarle operaciones de mecanizado. Por un lado existe el método de mecanizado con fresas, el cual es el más convencional, y por otro lado, el corte de núcleos Honeycomb o panel de nido de abeja con cuchilla por ultrasonidos.

En cuanto al mecanizado de Honeycomb las fresas crean un polvo grueso, las virutas en forma de coma son el resultado del fresado de panel de Honeycomb. Es importante que las celdas de nido de abeja no se arranquen durante el procesamiento, sino que se corten limpiamente, tanto en el extremo frontal como en la circunferencia de la herramienta de fresado. Para realizar esta operación hoy en día se utilizan fresas que tienen distinta geometría, tal y como podemos observar en la figura 11.

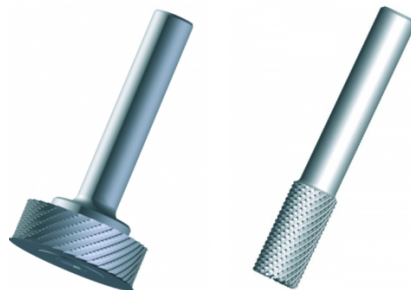


Ilustración 11: Fresas para Honeycomb

Las herramientas de la figura de la izquierda tienen forma de disco y la velocidad de rotación necesaria para el mecanizado de Honeycomb es bastante mas alta que la de la herramienta multidiente de la derecha, y en las fresas del estilo de la segunda hay que tener muy en cuenta al diámetro de las celdas para la elección de la herramienta adecuada.

La empresa Neuhäuser Controx desarrolla una gama de herramientas para el mecanizado de núcleo de nido de abeja, específicamente. Esta gama consta principalmente de 3 tipos, el corecut, el pocketcut y el valve type cutter.

- **Corecut**

Son herramientas e corte específicas para el mecanizado de núcleo de panal de abeja con fresadoras de 5 ejes. Dependiendo de la geometría de las operaciones a realizar sobre la pieza se pueden combinar diferentes diámetros y altura de herramientas. Además también se le pueden añadir a las piezas cabezales en función de la operación necesaria.

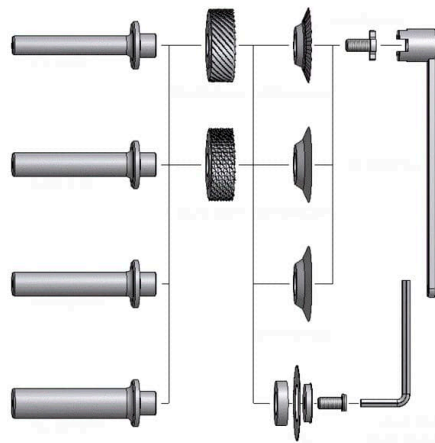


Ilustración 12: Herramientas tipo Corecut

- **Pocket cut**

Estas herramientas son más útiles para el mecanizado de ranurados en nido de abeja. La herramienta se caracteriza por ser multidiente, situados en la parte axial y radial del eje. La geometría de los dientes cambia en las diferentes versiones de esta herramienta. El estilo de herramienta es el de la figura 13 arriba, con dentado fino y en la figura 13 abajo con dentado grueso las variantes solo cambian la densidad de diente en la zona de mecanizado de la herramienta y la geometría de este.



Ilustración 13: Herramientas tipo Pocket Cut

- **Valve Type Cutter**

Herramienta de corte tipo válvula para mecanizado de nido de abeja. Tal y como se observa en la imagen tiene un mango con forma de válvula el cual esta combinado con la sierra de disco, esta especializada en operaciones de corte y en el achaflanado de piezas Honeycomb.

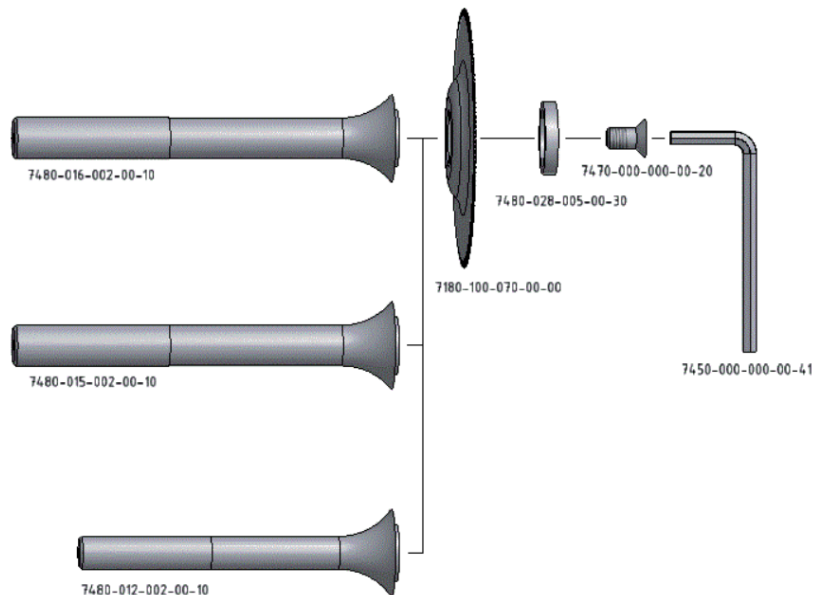


Ilustración 14: Herramientas tipo Valve Type Cutter

Las condiciones de corte para los tres tipos de herramienta son muy similares, cabe destacar que aquellas herramientas que poseen un diámetro mayor requieren velocidades de corte mayores. En cuanto al avance, no hay grandes diferencias entre las herramientas, en los ensayos experimentales es donde se sacan las conclusiones para definir los parámetros.

Corte por ultrasonidos de Honeycomb

El núcleo de panal de abeja o Honeycomb se corta de manera limpia y suave con fresas, taladros y cuchillas de ultrasonido. Un sistema de corte por ultrasonido proporciona las funciones adecuadas de vibración a alta frecuencia para conseguir condiciones de corte óptimas y la máxima velocidad de avance. Las cuchillas de corte están diseñadas para que las oscilaciones de ultrasonido naveguen desde el generador hasta la punta sin pérdidas y se pueden lograr grandes resultados con amplitudes de oscilación muy grandes. Cortar núcleo de Honeycomb por ultrasonidos el material se separa limpiamente y sin distorsiones.

A pesar de que el corte por ultrasonidos es muy limpio y adecuado para mecanizar Honeycomb, para este proyecto la empresa ha seleccionado el método de mecanizado mas convencional, mediante fresado, para la

realización de las operaciones. El motivo principal es que, por parte de Aernnova, empresa encargada del mecanizado y ensamblado de los elementos aeroespaciales, hay más interés en la automatización del proceso cuando se realiza con fresadoras que ya poseen en sus zonas de trabajo. Por tanto, posteriormente en el trabajo, una tarea será seleccionar la fresa más adecuada para el mecanizado de núcleo. Además también se deben definir las condiciones de corte más adecuadas para esta tarea.

3.4.3 Macizado

En este proyecto se denomina macizado a un material compuesto, cuya refuerzo es el núcleo de panel de abeja de aramida, anteriormente comentado, y como matriz se usa la resina Scotch-Weld 3500-2 PMF. Como se puede observar en la figura 15 el panel de abeja de aramida está repleto con la resina, de forma que todos los huecos vacíos de las celdas de dicho panel quedan completamente rellenos de la resina. Las propiedades mecánicas de este material son muy similares a las del panel de abeja, con la diferencia de que el macizado si está preparado para sufrir esfuerzos no solo uniaxiales sino también ante esfuerzos compuestos.

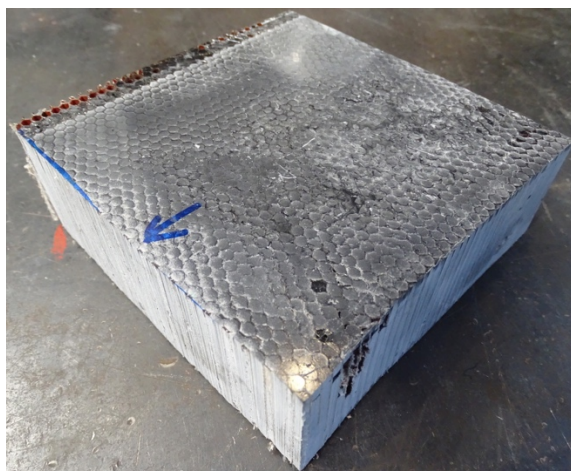


Ilustración 15: Probeta de Macizado

Debido a que el material compuesto en cuestión esta creado por la empresa encargada de realizar el proyecto, no existe bibliografía que especifique los métodos de mecanizado más adecuados para tratarlo. En otras aplicaciones es habitual composites tipo sándwich, que tienen el panel de abeja como núcleo y tanto encima como debajo de este, placas de materiales dispares, en función de la aplicación requerida. La resina que se le aplica en todo el conjunto al macizado, le dota al material de una homogeneidad que no poseen los

materiales tipo sándwich, es por ello por lo que a la hora de mecanizarlo se asemeja más a un composite CFRP, que a un material compuesto con panel de abeja y placas. De cara a los ensayos, se utiliza el fresado convencional como método de mecanizado más adecuado. Debido a sus aparentes similitudes con materiales CFRP en cuanto a homogeneidad, lo menos arriesgado es tratarlos parecido en las operaciones. En cuanto a las herramientas más adecuadas para fresar el material, será en los ensayos donde se saquen conclusiones que ayuden a seleccionar la mejor opción.

3.5 Modelos de fuerzas.

En este proyecto, el fresado es la operación que se utiliza para el mecanizado de las piezas, por tanto, el desgaste de las fresas en la práctica se podrá asemejar al modelo de desgaste en fresado teórico que se va muestra a continuación. Este estudio es realmente importante para el cálculo de la duración de vida de las herramientas.

La modelizado del desgaste de las herramientas en la operación de fresado, es un modelo que relaciona el esfuerzo de avance, que sufre la herramienta durante el mecanizado, con el desgaste. Como es lógico, el esfuerzo de avance “ i ” depende del desgaste alcanzado en fresado anterior “ $i-1$ ”. Dicho modelo tiene en cuenta los siguientes parámetros:

- Velocidad de avance (V_f (m/min)).
- Velocidad de corte (V_c (m/min)).
- Profundidad de corte axial (p (mm)).
- Diámetro de la herramienta (d (mm)).
- Desgaste (W).

La relación que existe entre todos estos parámetros se rige por la siguiente fórmula:

$$F_{ai} = K \cdot V_{fi}^{a1} \cdot V_{ci}^{a2} \cdot d^{a3} \cdot p_i^{a4} \cdot W_{i-1}^{a5}$$

Para la resolución de esta ecuación es necesario, como ya se ha comentado en el párrafo anterior relacionar el desgaste en el momento “ i ” con el desgaste en “ $i-1$ ”, por tanto tenemos la siguiente fórmula:

$$W_i = W_0 + A_0 \cdot \gamma_i$$

Teniendo en cuenta que γ_i es un parámetro que, tal y como podemos observar en la ecuación correspondiente, depende del esfuerzo de avance sufrido por la herramienta y L_c , que es la longitud de contacto entre la arista de la herramienta y el material compuesto. De forma que si la herramienta ha realizado un ranurado, la longitud de contacto dependerá de la mitad del perímetro, ya que es la distancia de la fresa que está en continuo contacto con el material.

$$\gamma_i = \sum_{j=1}^i F_{aj} \cdot L_{cj}$$

Para el cálculo teórico del desgaste es necesario determinar de forma experimental las 8 constantes que hay en las ecuaciones, por un lado los exponentes a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 , de la ecuación principal, la constante K que depende del material compuesto y de la geometría de la herramienta y las constantes W_0, A_0 de la segunda ecuación. Generalmente W_0 es nulo, si tenemos fresas que todavía no hemos utilizado.

4. ALCANCE/OBJETIVOS

El objetivo principal del proyecto global en el que se encuadra este trabajo es la automatización del proceso de mecanizado de ciertas piezas de carácter aeroespacial que se fabrican y ensamblan por parte de la empresa Aernnova, llegando a robotizar dicho mecanizado. Para lograr la automatización completa del mecanizado es necesario generar un algoritmo que se implanta en el robot. Es, por tanto, la generación de dicho algoritmo, el objetivo primordial del proyecto total. La determinación del algoritmo es tarea de la empresa COASA, una filial de Aernnova.

Este trabajo ocupa una parte de dicha monitorización, la cual consiste en la determinación de las leyes de corte y leyes de desgaste de las herramientas en el mecanizado de materiales compuestos CFRP y de núcleos panel de abeja Nomex, y macizado compuesto de panel de abeja con resina epoxy. Para eso, es necesario obtener valores críticos de esfuerzos, de forma que se pueda monitorizar en base a esfuerzos y no en base a posiciones del robot. Para la realización de este objetivo principal se deberán cumplir los siguientes objetivos parciales:

- Seleccionar las herramientas para fresado de los 3 tipos de materiales a mecanizar. Se deben tener en cuenta en la selección a los fabricantes nacionales e internacionales y se escogen las herramientas más adecuadas para cada uno de los materiales. Realizando un análisis que permita comprar fresas que puedan llegar a ser útiles para mecanizar los 3 tipos de materiales.
- Estudiar la forma de realizar los ensayos de desgaste, teniendo en cuenta las limitaciones de las máquinas del taller y de la cantidad de material que se tiene. Diseñar los ensayos de forma eficiente, tratando de optimizar cada una de las probetas que se tienen para mecanizar.
- Calibrar las mesas de ensayo entre ellas para poder medir las fuerzas de la forma más exacta posible. Pudiéndose llegar a obtener información de los esfuerzos desde 3 fuentes sensoriales diferentes.
- Realizar, con las herramientas y los materiales seleccionados, los ensayos de desgaste previamente diseñados. Obtener los datos de las fuerzas y imágenes de las herramientas.
- Modelizar el desgaste de las herramientas de forma teórica, con los datos obtenidos en los ensayos, de las fuerzas de avance. Y compararlos con los datos de desgaste obtenidos de forma experimental.



- Analizar las alternativas en cuanto a herramientas y seleccionar aquella que sea más óptima en cuanto a durabilidad, desgaste y tipo de material a mecanizar.
- Calcular las leyes de corte y de desgaste con las cuales se podrá monitorizar el proceso de mecanizado.

No es objetivo de este proyecto ni el diseño final del algoritmo, ni la implantación de este en el robot que forma parte del proceso de mecanizado real. Los ensayos se realizan en los talleres de la empresa Tecnalía, y los datos térmicos corren a cargo del CTA. Todos los objetivos parciales, citados anteriormente, son labor de la colaboración entre estas dos empresas nombradas y la UPV/EHU.

5. BENEFICIOS DEL PROYECTO

5.1 Beneficios técnicos

Los beneficios técnicos que aporta este trabajo están íntimamente ligados con la automatización total de la operación de mecanizado de las piezas de materiales compuestos CFRP, núcleo Nomex y macizado con resina epoxi. Por un lado, el cálculo de las leyes de corte y desgaste de este trabajo nos proporciona soluciones para problemas de pequeña escala y, por otro lado, este cálculo forma parte de una solución más global que puede ser fácilmente utilizado en diversas aplicaciones.

El cálculo de estas leyes de corte es uno de los últimos pasos previo a la automatización del mecanizado de componentes. Una vez obtenidos los valores clave que se implementan en el algoritmo del robot, la monitorización está casi completa. Dichas leyes permiten iterar y crear un conjunto ordenado de operaciones sistemáticas que en función de las variables que existan en cada momento se obtendrán soluciones diferentes, pudiendo así prever y controlar el comportamiento de las herramientas ante diferentes circunstancias. La información obtenida mediante las leyes de corte y desgaste es de gran importancia, dado que nos aporta una serie de ventajas, siendo las más notables las siguientes.

- Conocer los valores críticos de esfuerzos en el momento del mecanizado nos permite monitorizar el robot según dichos esfuerzos y no según posición. Es decir, el robot conoce en todo momento las fuerzas, y con ellas puede cerciorarse de que material está mecanizando, y darse cuenta por si mismo si debe o no parar en algún momento. Todo ello son variables a introducir en el algoritmo que se debe crear a partir de dichas leyes.
- Selección óptima de las herramientas. Los ensayos realizados dan a conocer el comportamiento de las herramientas seleccionadas ante el material mas extraño con el que trabajamos y sobre el cual no hay ninguna bibliografía, el macizado con resina epoxi. Dado que es un material compuesto creado expresamente para aplicaciones muy específicas, no hay una clara certeza de si su comportamiento, a la hora de ser mecanizado, se parece al comportamiento que tienen las probetas de núcleo de panel de abeja o si es más parecido a compuestos CFRP. Los datos obtenidos ayudarán a escoger las herramientas óptimas para las operaciones.

- La automatización de la operación de mecanizado supone conocer los esfuerzos reales que sufre la herramienta en todo momento, ya que el propio robot usa estos datos para su forma de actuar. Conocer esfuerzos es en todo momento conocer deformaciones, o desgastes, y por tanto la durabilidad de las herramientas se puede prever con la ayuda de estos datos.
- Otra ventaja es poder controlar la potencia suministrada por la fresadora. Conocer de forma inmediata la fuerza de avance que se oponen a la fresa permite variar las condiciones de corte y la potencia la herramienta para diferentes valores de los esfuerzos. Es decir, el sistema a través de estas variaciones de esfuerzos podrá saber cuándo se producen los cambios en los materiales compuestos. Al traspasar la frontera de un material a otro la fresadora será capaz de variar automáticamente sus condiciones de corte.

5.2 Beneficios secundarios/económicos

Los beneficios secundarios están relacionados con la generación del algoritmo para el posterior automatizado del robot. La implantación de un sistema monitorizado en un proceso en el cual toman parte operarios favorece no solo a la empresa de forma económica sino también al riesgo laboral de los empleados. Por tanto, los beneficios secundarios a destacar en el conjunto de este proyecto son los siguientes.

- **Mejora de la calidad del producto y descenso de las horas de producción.** La automatización supone una reducción de horas, ya que el robot es capaz de desarrollar tareas repetitivas de manera constante y a un ritmo rápido. Además, el control numérico proporciona un aumento de la calidad del mecanizado, puesto que la actividad monitorizada del robot programado es más exacta que la actividad manual del operario controlando la fresadora.
- **Reducción de costes en la operación.** Es un beneficio que va la mano del anterior, ya que la reducción de horas supone siempre una reducción de costes de operación. Sumado a esto, poder prever el desgaste de las herramientas o sus posibles roturas permite llevar a la herramienta a su límite de uso sin ponerla en riesgo real.
- **Incremento de la seguridad del trabajador.** La automatización del mecanizado de materiales compuestos permite descargar de tareas rutinarias a los operarios altamente cualificados y emplearles en tareas de más responsabilidad. En situaciones particulares (espacio confinado, esfuerzos repetitivos de fresado, desprendimiento de material compuesto es nocivo, etc.), la automatización incrementa la seguridad del operario en su puesto de trabajo.

6. ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS

Se han evaluado las alternativas que pueden ser usadas para cumplir los objetivos deseados, y posteriormente llevar a cabo los ensayos. Para la elección correcta de las alternativas se han estudiado profundamente las propiedades y las características mecánicas y térmicas de los materiales. Una vez conocidas dichas propiedades, se realiza la elección de las herramientas para mecanizar. Aquellas herramientas que cumplan con los requisitos impuestos por la situación del proyecto y de los materiales serán las seleccionadas.

6.1 Materiales

Los materiales utilizados en el proyecto y suministrados por COASA son tres materiales compuestos. Dichos materiales compuestos están formados por un refuerzo y una matriz, a continuación se exponen las características de dichos materiales, así como su uso y las probetas suministradas.

6.1.1 Macizado

El material con nombre de macizado es un material compuesto cuyo refuerzo es el panal de abeja honeycomb con celdas de diámetro muy pequeño y la matriz es la resina SCOTCH-WELD 3500-2 PMF, con material de potting basado en epoxi. La resina esta filtrada entre las celdas del refuerzo de honeycomb, por tanto la cantidad de resina es mayor que la de refuerzo, tanto es así que el material tiene un 71% en volumen de esta matriz y un 29% en volumen de refuerzo. Al ser un material compuesto fabricado por COASA, no existe una hoja de especificaciones en la cual se puedan observar las propiedades mecánicas del composite, sin embargo, dado que tiene un porcentaje muy alto en peso de resina, será la matriz la que delimite los factores más importantes a la hora de mecanizar. Se toman, por tanto, las especificaciones de dicha resina como propiedades críticas del material compuesto.

Dicha resina se caracteriza por ser un compuesto de relleno de huecos estructurales de baja densidad y curado por calor. El producto esta diseñado para el uso en estructuras tipo sándwich o compuestos de panal de abeja. El relleno de dicha resina es compatible con estructuras de materiales metálicos y no metálicos que generalmente se encuentran en los diseños de componentes aeroespaciales. Los puntos fuertes son la excelente resistencia química que presenta y el alto rendimiento mecánico que ofrece ante un amplio rango de temperaturas. Las características principales de esta resina son las siguientes.

- Alto rendimiento desde -55 °C hasta 175 °C, para aplicaciones estructurales.
- Material de resina, pensado y diseñado para el refuerzo del panel de abeja.
- Densidad del material baja para diseños ligeros
- Producto desaireado para una mayor durabilidad estructural.

Las propiedades mecánicas dependen del procedimiento que se haya seguido para el curado de la resina una vez aplicado en el material compuesto. El procedimiento de curado A se basa en un proceso de 60 minutos manteniendo la resina a presión atmosférica a una temperatura de 125 ± 5 °C. El procedimiento de curado B se basa en un proceso de 60 minutos manteniendo la resina a presión atmosférica a una temperatura de 175 ± 5 °C. En la tabla 1 se pueden observar las propiedades mecánicas según ambos procesos de curado. Cabe destacar que la temperatura máxima en la que la resina no pierde ninguna propiedad son los 180 °C, por tanto, es la temperatura que no se puede superar en el proceso de mecanizado.

Mechanical Properties	Temperature / Medium	Cure Cycle A ³	Cure Cycle B ³
Compressive Strength	23 ± 2 °C	81 MPa	76 MPa
ISO 604 ; Sample size : 12,5 x 12,5 x 25 mm ³	120 ± 2 °C	50 MPa	44 MPa
	135 ± 2 °C	45 MPa	36 MPa
	180 ± 2 °C	-	19 MPa
Resistance to Fluids & Fluid Absorption	Reference compression strength value at 23 ± 2 °C	-	78 MPa
ISO 604 Sample size : 12,5 x 12,5 x 25 mm ³ The samples have standardized been immersed in the environments for 1000 hours, if not mentioned otherwise.	2000 h, 70 ± 2 °C, 85 % RH tested at 23 ± 2 °C	-	55 MPa (1,1 %)
	2000 h, 70 ± 2 °C, 85 % RH tested at 120 ± 2 °C	-	19 MPa (1,0 %)
	Demineralised water at 23 ± 2 °C	-	43 MPa (1,4 %)
	Fuel JP4, F40 at 23 ± 2 °C	-	61 MPa (0,5 %)
	Skydrol 500B at 23 ± 2 °C	-	62 MPa (0,9 %)

Tabla 1: Propiedades mecánicas resina

Probetas suministradas

Las probetas son fabricadas y suministradas por parte de COASA. Dichas probetas son necesarias para tres ensayos, una probeta para cada una de las herramientas elegidas. Las dimensiones de dichas probetas son de 130x125x35mm. Previo al mecanizado dichas probetas requieren de una prueba de inspección de rayos X de forma que se puedan observar si existen defectos de infiltración de la resina en las celdas del honeycomb propios del proceso de fabricación. En la figura 16 se pueden observar las probetas suministradas por COASA previo al mecanizado.

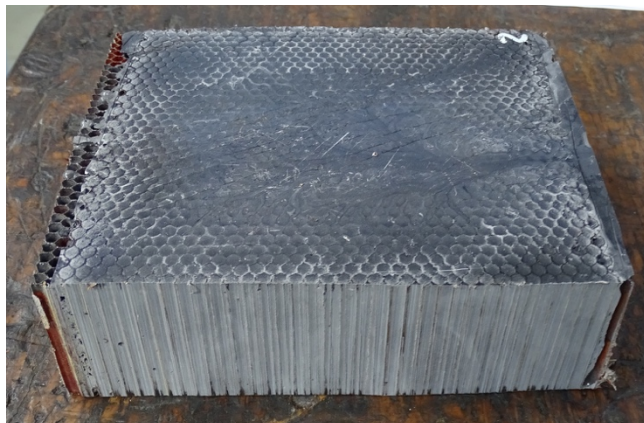


Ilustración 16: Probeta e Macizado

6.1.2 CFRP

El segundo material utilizado es el correspondiente a la fibra de carbono ABS5003B0000. Se trata de un material compuesto de fibra de carbono con resina epoxi curada a 180°C, la designación del módulo de fibra de carbono es HTA 40 E13 6K 400Tex. Dicha fibra posee compatibilidad con la resina epoxi. Se trata de un material composite muy duro y que presenta mucha abrasión a la hora de mecanizar. Las propiedades básicas de fabricación tanto de la matriz como del refuerzo, que son la resina epoxi y la fibra respectivamente, podemos observarlas en tabla 2.

Propiedad	Método de ensayo	Unidades	Valores nominales
Densidad de la resina	ISO 1183-1 Method A	g/cm ³	1,31
Densidad de la fibra	ISO 10119	g/cm ³	1,77
Espesor de la capa de curado	-	mm	0,319
Densidad laminar.	-	g/cm ³	1,554

Tabla 2: Propiedades Carbono CFRP

En cuanto a las propiedades mecánicas que presenta el material, podemos observar lo siguiente en la tabla 3. Dado que en este compuesto, el porcentaje de fibra es mayor que el de resina, la temperatura no es un factor tan determinante a la hora de mecanizar el material, ya que no hay matriz

suficiente como para que bajo temperaturas del orden de 200 °C, el composite comience a perder propiedades mecánicas.

Propiedad	Unidades	Valor nominal
Tensión de rotura	MPa	4100
Módulo de Young	GPa	240
Elongación	%	1,7

Tabla 3: Propiedades mecánicas

Probetas suministradas

Las probetas de carbono son suministradas por COASA. Tienen unas dimensiones de 200x200x2,8mm. El número de probetas suministradas es de tres probetas, dado que en los ensayos se quiere mecanizar con diferentes condiciones de corte se opta por cortar cada probeta en cuatro partes iguales, obteniendo así doce probetas. Las dimensiones de estas probetas es ahora de 200x50x2,8mm y para cada una de las herramientas se utilizan 4. En la figura 17 se pueden observar las probetas correspondientes al CFRP.



Ilustración 17: Probeta CFRP

6.1.3 Núcleo Honeycomb

El tercer y último material a utilizar es el núcleo honeycomb, también llamado panal de abeja de aramida, fabricado por Nomex, y cuyo nombre técnico corresponde con el de honeycomb termoplástico ABS5035C3-385. El nido de abeja Nomex es la solución estándar más ligera de entre los materiales compuestos no metálicos. Dicho composite está fabricado con fibra de aramida (DUPONT Nomex o equivalente) y recubierto con resina fenólica, la cual es resistente a grandes temperaturas, ofrece una excelente elasticidad, tiene una densidad muy baja y una muy buena relación peso resistencia. Las celdas rellenas de aire dan lugar a un gran aislante tanto térmico como sonoro, y dichas celdas en conjunto se comportan muy bien ante esfuerzos uniaxiales de

compresión. Dicho esto, las características principales de dicho composite son las siguientes.

- Muy alta relación resistencia - peso
- Gran resistencia a la corrosión
- Retardante de llama, ayuda a la no expansión del fuego por el material
- Muy buen aislante térmico, gracias a sus celdas.
- Fácilmente moldeable, puede tener muchas formas.

Las propiedades mecánicas del Nomex honeycomb se pueden observar en la tabla 4. En este caso las celdas del material suministrado tienen un diámetro aproximado de 9,5mm, la configuración de la celda es de un hexágono regular, y tiene una densidad calculada de 3(lb/ft³). Por tanto, en la tabla se pueden apreciar las propiedades mecánicas de dicho material.

Density (lb/ft ³)	Cell Size (inch)	Cell Configuration	Bare Compression			Plate Shear					
			Strength (psi)			L Direction			W Direction		
			Typ	Min	Typ	Strength (psi)		Modulus (ksi)	Strength (psi)		Modulus (ksi)
						Min	Typ	Typ	Min	Typ	
2	3/16	RH	120	88	90	68	4.3	50	38	2.4	
2	3/16	OV	110	86	65	48	23.2	65	38	3.2	
2.5	3/16	OV	190	162	90	59	2.7	95	55	5	
3	1/8	RH	280	190	195	133	6.4	95	70	3.3	
3	3/16	RH	290	190	175	133	5.8	105	64	3.9	
3	1/4	RH	270	190	170	133	5.4	105	64	4.8	
3	1/8	OV-20%	255	190	160	95	4.8	110	76	3.8	
3	3/16	OV	270	238	110	71	3.2	130	71	6.3	
4	1/8	RH	490	333	265	204	8.2	145	130	4.5	
4	3/16	RH	490	333	220	204	7.8	160	106	5.2	
4	1/4	RH	470	333	225	204	6.8	150	106	6.4	
4	1/8	OV-20%	480	333	225	150	6.7	185	125	6.8	
4	3/16	OV	470	333	150	95	3.9	185	114	8.9	
5	1/8	RH	670	513	310	252	10.3	205	124	5.8	
6	1/8	RH	880	665	340	304	12.3	235	143	7.1	
6	3/16	RH	935	665	285	275	9.8	245	143	6.7	

Tabla 4: Propiedades Honeycomb

Probetas suministradas

Las probetas de honeycomb Nomex son suministradas por COASA. Las dimensiones de estas probetas son de 200x200x40mm. Debido al numero de ensayos que se van a realizar, son necesarias 12 probetas de 200x50x40, por tanto cada una de las tres probetas de carbono se parten en cuatro partes iguales, de forma que se obtienen doce probetas con las dimensiones necesarias. En la figura 18 se pueden observar las probetas utilizadas para los ensayos.

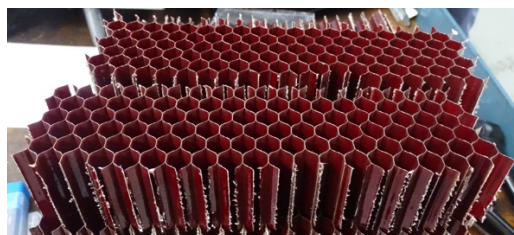


Ilustración 18: Probeta Honeycomb

6.2 Herramientas

Una tarea muy importante además de la selección de los materiales es la elección de las herramientas que van a mecanizar dichos materiales, y con las que se van a realizar los ensayos. Es importante tener en cuenta que se trata de mecanizar materiales compuestos, cuyo comportamiento en el mecanizado es complicado y muy novedoso, y por ello no existe gran bibliografía que ayude a la selección de herramientas. Los tres materiales a mecanizar son diferentes pero a la vez son similares, es por ello por lo que se va a optar por seleccionar tres herramientas, de las cuales cada una de ellas esté especializada en uno de los materiales. De esta forma, al realizar los ensayos y observar los resultados, podremos analizar para cada material cual es la mejor herramienta. Lo natural es que salga para cada composite, la herramienta correspondiente pero los resultados de los ensayos son los que deciden.

Para la realización de los primeros ensayos, las restricciones en cuanto a selección de herramienta son principalmente de tiempo. Por tanto, solo se estudian herramientas cuyo suministrador sea Europeo, y a poder ser, Español. Por otro lado, es importante que el diámetro de la herramienta ronde entre los 6-10mm de diámetro. Las herramientas estudiadas han de estar especializadas en materiales compuestos, una ha de ser especializada en CFRP y las otras en honeycomb Nomex.

La empresa encargada de suministrar las herramientas es COASA, por su parte recomiendan el uso para el material CFRP de dos herramientas que ya poseen ellos en el almacén y que por tanto no sería necesario comprar. Por un lado, se propone la herramienta de la marca Tivoly, cuyas características se observan en la figura 19. Se trata de una herramienta multidiente especial para fibras composites, y más en concreto para el material de fibra de carbono. Además tiene la punta de la herramienta en forma de V que facilita las operaciones de recantado o ranurado y entorpece aquellas de taladrado.

**FRAISE CARBURE À DÉTOURER
BOUT FORET *QUEUE DE POISSON*.**

HM CARB
BRIGHT UNCOATED
TIVOLY NORM

Conçu pour la découpe des composites (résines, fibres carb./de verre).

**HARDMETALEN BOORFREES,
CONTOUR, VISSCHACHT.**

Voor uitsnijden van composietmaterialen: hars, (glas-/koolstof)vezel.

**HARTMETALL-SCHNEIDFRÄSER
MIT BOHRERSPITZE TYP *FISCH-SCHWANZ*.**

Geeignet zum Ausschneiden von Verbundmaterialien.

X Composites Fibres
Compositvezela
Verbundfasern

8236851	EAN	Ø	d2	L	L2	QTY PCB
82368510300	3221910882556	3	3	70	12	1 1
82368510400	3221910882563	4	4	70	16	1 1
82368510600	3221910882570	6	6	70	16	1 1
82368510800	3221910882587	8	8	70	25	1 1
82368511000	3221910882594	10	10	75	25	1 1
82368511200	3221910882600	12	12	75	25	1 1

Ilustración 19: Herramienta Tivoly

Por otro lado, proponen también la fresa de la marca WNT, cuyo numero de serie es el 50983060, en el catálogo de dicha empresa de herramientas se obtienen las especificaciones de dicha herramienta. Se corresponde con una herramienta multidiente con punta plana especial para materiales plásticos o composites. Tal y como se puede observar en su ficha de especificaciones de la figura 20.



Ilustración 20: Herramienta WNT

Una vez seleccionadas dos herramientas que son válidas para los ensayos, es necesario encontrar una tercera y para ello se proponen varias alternativas que corresponden con el mecanizado de núcleos honeycomb. Las empresas que se estudian para seleccionar la tercera herramienta son todas europeas y en primer lugar se realiza una lista de las opciones.

- **NEXAM.** Es una empresa de herramientas de corte especializada en aplicaciones aeroespaciales, y es de origen francés. Tiene un catálogo muy amplio.
- **KENDU.** Es una empresa Española con sede en Guipúzcoa que fabrica herramientas de corte para cualquier disciplina. El plazo de entrega de estas herramientas es muy corto ya que el suministro se realiza desde Guipúzcoa, además, hay muchas opciones de herramientas.
- **MAPAL.** Esta empresa se encuentra en la región de Aalen en Alemania, es pionera en herramientas de corte.
- **SecoTools.** Es una empresa de herramientas de corte con origen en Suecia, que tiene suministradores por todo el mundo. Los plazos de entrega por tanto no son un impedimento.
- **Recoules.** Es una marca Francesa, que posee una gran variedad de herramientas para el fresado de materiales compuestos.

De todas las alternativas de empresas, la que más opciones tiene para mecanizado de Honeycomb es KENDU, que además parte con la ventaja de ser una marca Española, por tanto se realiza el análisis de las 3 alternativas de herramientas que ofrecen para el mecanizado de composites y Honeycomb.

6.2.1 Alternativa 1

La primera alternativa a tener en cuenta es la fresa frontal para el fresado de estructuras de panel de abeja. Está especializada absolutamente en la estructura de Honeycomb y por tanto es una gran opción para la elección. Además cuenta con un revestimiento que le proporciona a la herramienta una resistencia mayor ante el desgaste. Las especificaciones de dicha herramienta se pueden observar en la figura 21.

Fresa frontal para fresado de estructuras de panel de abeja
 End mill for honeycomb milling
 Fraise cylindrique pour les structures en nid d'abeille
 Fresa cilindrica per la fresatura a nido d'ape
 Schaftfräser für Honeycombstrukturen
 Для обработки композитных ячеистых (стовых) материалов

HM
ESM6

KENDU
NORM

SERIE
L

KENDU
TYP

40°
HELIX

DIN
6535-HA

Brillante
Uncoated

Air

Recubrimiento - Coating - Revêtu - Investimento - Beschichtung - Покрытие

Aplicaciones - Application - Application - Anwendung - Applicazione - Применение

N8- N9													
TERMOPLÁSTICOS THERMOPLASTIC					TERMOPLÁSTICOS THERMOPLASTIC		PLÁSTICOS Y FIBRAS PLASTIC AND FIBRE			GRAFITO GRAPHICS			
Semicristalinos Semicrystalline		Semicristalinos + % fibra Semicrystalline + % fiber			Amorfo Amorphous	Fibra carbono Carbon fiber	Fibra vidrio Fiber glass	Metal polímero fibra	Metal matrix composite	Estructura panel de abeja			
PEEK	AFRP Aramide	PA66 GF30	PEEK CF30	PVDF GF20	PTFE CF25	POM GF25	PMMA Acrylic	CRP	GRP	HÍBRIDOS HYBRID	MMC	HONEYCOMB	GRAFITO GRAPHITE
D	d	l	L	Z									
h10	h6												
12	12	50	110	8									
16	16	80	140	10									
20	20	90	160	10									
											01200		
											01600		
											02000		

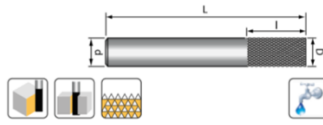
Ilustración 21: Alternativa 1

6.2.2 Alternativa 2

La segunda alternativa es una herramienta multidiente de diente piramidal y largo cuya punta es plana. Está especializada en termoplásticos, y por tanto en materiales composites plásticos. Según el fabricante esta herramienta sirve para el mecanizado de material Honeycomb y también para material CFRP, tal y como se puede observar en las especificaciones de la herramienta en la figura 22.



Router, diente piramidal, largo, sin corte frontal
 Router, pyramid-toothed, long, no end cut
 Router, dent pyramide, longue, sans couper avant
 Router, dente piramide, lungo, senza taglio frontale
 Router, pyramidenverzahnt, lang, flache Stirn
 Для стекловолокна с режущим торцом, длинная - не режущий торец



Recubrimiento - Coating - Rivestito - Rivestimento - Beschichtung - Покрытие



Aplicaciones - Application - Application - Anwendung - Applicazione - Применение

N8- N9													
TERMOPLÁSTICOS THERMOPLASTIC						TERMOPLÁSTICOS THERMOPLASTIC		PLÁSTICOS Y FIBRAS PLASTIC AND FIBRE			GRAFITO GRAPHICS		
Semicristalinos Semicrystalline		Semicristalinos + % fibra Semicrystalline + % fiber				Amorfo Amorphous	Fibra carbono Carbon fiber	Fibra vidrio Fiber glass	Metal polímero fibra	Metal matrix composite	Estructura panel de abeja	GRAFITO GRAPHITE	
PEEK	AFRP Aramide	PA66 GF30	PEEK CF30	PVDF GF20	PTFE CF25	POM GF25	PMMA Acrylic	CRP	GRP	HIBRIDOS HYBRID	MMC	HONEYCOMB	GRAFITO GRAPHITE
D	d	l		L		Z							
h10	h6												
6	6	25		100		11		00600 00600					
8	8	40		80		14		00800 00800					
8	8	25		100		14		00800.01 00800.01					
10	10	30		100		16		01000 01000					
12	12	50		100		17		01200 01200					

Ilustración 22: Alternativa 2

6.2.3 Alternativa 3

La última alternativa, también de KENDU, se corresponde con una herramienta multidiente con diente piramidal con corte en forma de V en la punta. Es tan válida la herramienta para honeycomb como para CFRP, y demás materiales termoplásticos y compuestos. Dichas especificaciones se pueden observar en la figura 23.

Router, diente piramidal, 2 cortes, largo, corte al centro angular
 Router, pyramid-toothed, 2 flute, long, end mill push cut
 Router, dent pyramide, 2 coupe, longue, coupe au centre angulaire
 Router, dente piramide, 2 denti, lungo, taglio angolare al centro
 Router, pyramidenverzahnt, 2 Schneiden, lang, schiebender Schnitt
 Для стекловолокна с режущим торцом 2-х, длинная, центральным резом



Recubrimiento - Coating - Rivestito - Rivestimento - Beschichtung - Покрытие



Aplicaciones - Application - Application - Anwendung - Applicazione - Применение

N8- N9													
TERMOPLÁSTICOS THERMOPLASTIC						TERMOPLÁSTICOS THERMOPLASTIC		PLÁSTICOS Y FIBRAS PLASTIC AND FIBRE			GRAFITO GRAPHICS		
Semicristalinos Semicrystalline		Semicristalinos + % fibra Semicrystalline + % fiber				Amorfo Amorphous	Fibra carbono Carbon fiber	Fibra vidrio Fiber glass	Metal polímero fibra	Metal matrix composite	Estructura panel de abeja	GRAFITO GRAPHITE	
PEEK	AFRP Aramide	PA66 GF30	PEEK CF30	PVDF GF20	PTFE CF25	POM GF25	PMMA Acrylic	CRP	GRP	HIBRIDOS HYBRID	MMC	HONEYCOMB	GRAFITO GRAPHITE
D	d	l		L		Z							
h10	h6												
6	6	25		100		11		00600 00600					
8	8	40		80		14		00800 00800					
8	8	25		100		14		00800.01 00800.01					
10	10	30		100		16		01000 01000					
12	12	50		100		17		01200 01200					

Ilustración 23: Alternativa 3

6.2.4 Comparación de alternativas

Una vez descritas las tres alternativas se va a realizar una comparación por medio de una matriz de impacto que permite resumir visualmente los pros y los contras de las posibles soluciones. También permite establecer prioridades a la hora de escoger la opción más adecuada.

Parámetros	Ponderación (1-5)	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
TÉCNICA				
Calidad	3	5	3	4
Obtención resultados	5	2	4	4
Fiabilidad resultados	4	3	4	4
Adecuidad	5	2	5	4
ECONÓMICA				
Coste unitario	3	4	3	3
Inversión	2	4	3	3
TOTAL		67	85	83

Tabla 5: Comparación de alternativas

Los aspectos a comparar con esta matriz se agrupan en dos, aspectos técnicos y aspectos económicos. Por un lado los aspectos técnicos. Primero hay que evaluar la calidad de la herramienta, y eso se observa en las especificaciones de estas. Posteriormente para evaluar la obtención de resultados, hay que observar en las especificaciones si dicha herramienta puede cumplir con los objetivos del trabajo, en este caso el mecanizado tanto de honeycomb como de CFRP y además cumplir que tiene opciones para diámetros de herramienta de entre 6-10mm. La fiabilidad de los resultados va de la mano de la obtención y también tiene en cuenta la calidad de dicha herramienta. En cuanto a la adecuación, es un aspecto que representa cuanto de adecuada es la herramienta para el trabajo que se va a realizar, si es multidentado, si tiene la punta plana o por lo contrario posee punta en V que ayuda a sacar la viruta en la operación de ranurado y más aspectos. Por otro lado los aspectos económicos que tienen en cuenta el precio de la herramienta, y por consiguiente la inversión a realizar, ya es necesario comprar más de una herramienta.

Tras analizar los resultados de la matriz, no cabe duda que la alternativa número 1 no es válida por el valor que ha obtenido. El principal problema de esa herramienta es que solo puede mecanizar honeycomb, y en el trabajo se requiere de una herramienta que valga también para mecanizar CFRP.

En cuanto a las otras dos alternativas, la puntuación es más ajustada, saliendo la alternativa 3 como ganadora. Ambas herramientas son exactamente iguales en los aspectos económicos, pero tienen distintas puntuaciones en los aspectos técnicos. Mientras que la herramienta de la alternativa 3 posee mejor calidad, la alternativa 2 cumple de forma más notable con las especificaciones del proyecto, es por ellos por lo que la alternativa óptima es la tercera.

Dado que la alternativa elegida es la segunda, ya están especificadas las tres herramientas con las que se van a realizar los ensayos de mecanizado. Una vez elegidas las fresas que se van a utilizar y elegidos los materiales se comienza a desarrollar el de ensayos y experimentos que determinen cual es la mejor de las herramientas para realizar el mecanizado. Finalmente cabe destacar las especificaciones de las tres herramientas elegidas para el proceso.

Herramienta	Diámetro (mm)	Longitud Axial de fresado máxima (mm)
Tivoly	6	30
WNT	6	25
Kendu	6	35

Tabla 6: Resumen características herramientas

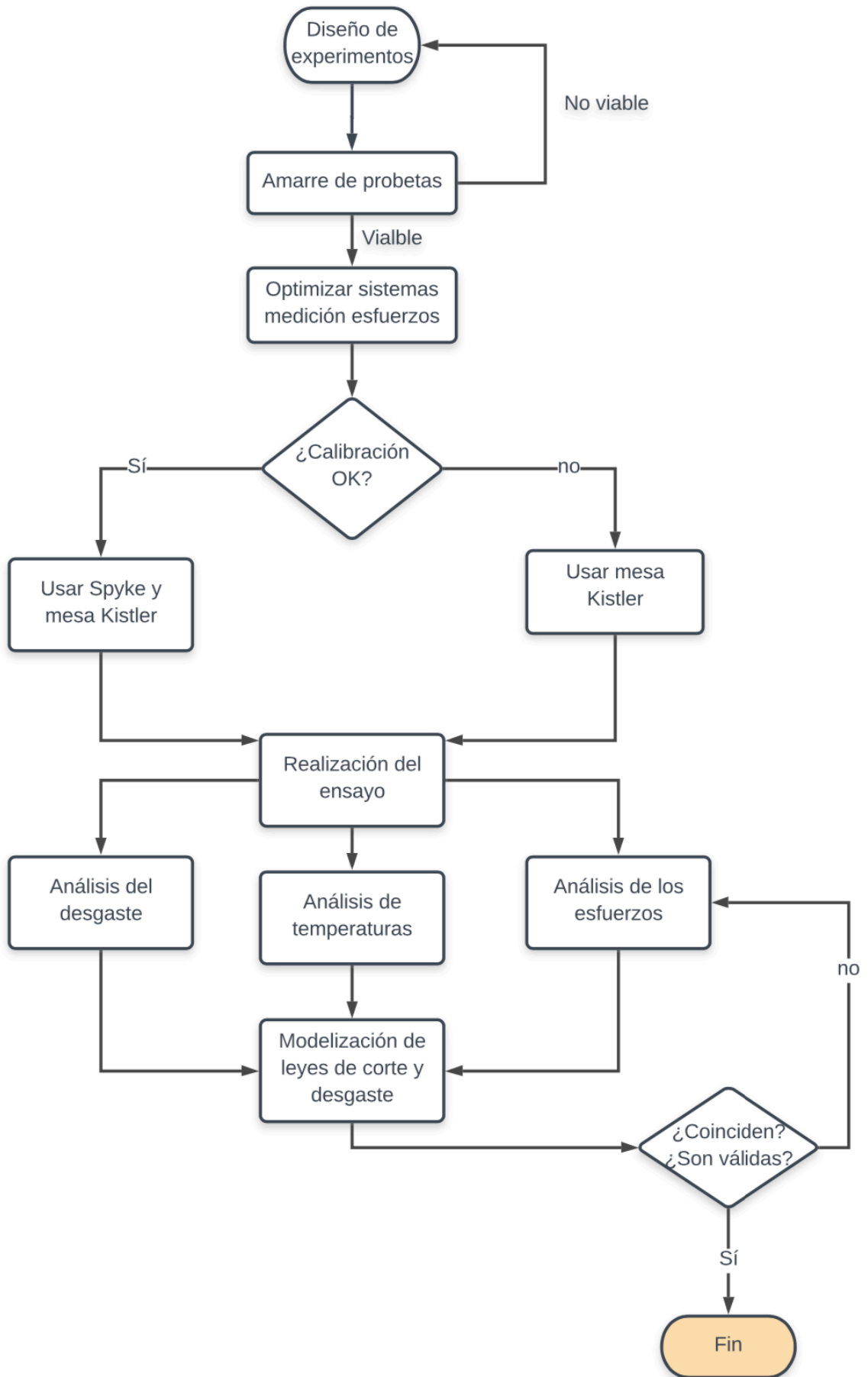
7. METODOLOGÍA

En este apartado se profundiza el aspecto más relevante del trabajo, la descripción detallada del proceso llevado a cabo para realizar los ensayos de mecanizado. Desde el diseño de los experimentos, hasta los métodos de análisis de datos y modelización de leyes de corte y desgaste. El modelo de leyes de corte y desgaste será introducido en el algoritmo para la automatización del proceso de mecanizado.

El objetivo principal es obtener los resultados de las fuerzas sufridas en el avance de las herramientas mediante dos métodos diferentes. Por un lado, durante los ensayos un sistema de medición de fuerzas obtendrán los valores de las fuerzas ejercidas por parte del material a la herramienta. Por otro lado el desgaste de las fresas se puede medir en cada diente, una vez se han realizado los ensayos, y mediante comparación con el diente no desgastado, poder sacar el volumen de material perdido. De tal forma, se tiene el desgaste tanto instantáneo como acumulado, mediante las formulas de las leyes de corte y leyes de desgaste, se obtendrán los valores de las fuerzas resultantes para cada caso y comparando dichas fuerzas con las fuerzas medidas por el sistema se darán o no por válidas dichas leyes de corte y desgaste.

Previo a la ejecución de los ensayos se realizan unas tareas necesarias para poder completar estos de forma correcta. Dichas tareas se exponen en los apartados que hay a continuación.

El proceso seguido para la realización de los ensayos y su posterior análisis requiere de unas tareas, todo ello puede ser observado en el diagrama de flujo de la siguiente página.



7.1 Diseño de experimentos y montaje de probetas

Un aspecto importante para los ensayos es analizar como es el sistema en el que se van a realizar los experimentos. Los ensayos se van a hacer en las instalaciones de la empresa Tecnalía, en un centro de mecanizado CNC de cinco ejes, el cual solo son necesarios los tres grados de libertad correspondientes a X, Y y Z.

Los ensayos se realizan teniendo en cuenta cuatro variables de mecanizado diferentes, de forma que combinando dichas variables se dan un número de ensayos necesarios. Dichas variables son las siguientes.

- **Ap:** Este parámetro se define como la profundidad de pasada axial. En la operación de ranurado o recantado, este valor es la distancia del eje de la herramienta que va a mecanizar. La unidad de medida de este parámetro es mm.
- **Ae:** Corresponde con la profundidad de pasada radial. En la operación de mecanizado la herramienta puede realizar el fresado con el diámetro total o con menos. Este valor es el que determina cuanto perímetro de la herramienta mecaniza a la vez. La unidad de medida de este parámetro es mm.
- **f:** Es el parámetro que define el avance de la herramienta durante la operación de mecanizado. Las unidades de medida son mm/min.
- **N:** Velocidad de rotación de la herramienta. Corresponde con la velocidad de rotación de la herramienta mientras se realiza la operación de mecanizado. Las unidades de medida son rpm (revoluciones por minuto). Teniendo en cuenta la velocidad de rotación se puede calcular la velocidad de corte (V_c) en m/min.

Además de los parámetros de corte que definen las condiciones de corte de cada ensayo también hay que definir el procedimiento de fresado que se va a realizar. En este ámbito se opta entre dos métodos.

- **Fresado en concordancia.** En este caso el fresado se realiza de forma que la fresa gira en el mismo sentido al que avanza la herramienta.
- **Fresado en oposición.** Esta opción es lo contrario que el fresado en concordancia. La fresa gira en el sentido opuesto al que avanza la herramienta.

Otro aspecto muy importante a la hora de mecanizar es tener en cuenta las restricciones que existen en el centro de mecanizado donde se van a realizar los ensayos. Dichas restricciones son las que definirán el método de montaje de las probetas y posteriormente el número de pasadas que se pueden realizar por cada una de ellas.

Una vez definidos todos los aspectos a tener en cuenta, se va a especificar el diseño de los ensayos y el montaje de las probetas para cada uno de los materiales.

7.1.1 Macizado

7.1.1.1 Diseño de ensayos

Para los ensayos se tienen tres probetas de dimensiones 120x125x35mm. Dado que el barrido se va a realizar con cuatro parámetros y para cada parámetro vamos a seleccionar dos valores, será necesario poder realizar 16 barridas por cada una de las probetas y por cada una de las herramientas. Por tanto, en la siguiente tabla se esquematiza el procedimiento de ensayos que se va a seguir.

Nº	Profundidad de pasada Axial	Profundidad de pasada Radial	Avance	Velocidad de corte o de rotación
1	ap1	ae1	f1	Vc1 o N1
2	ap1	ae2	f1	Vc1 o N1
3	ap1	ae1	F1	Vc2 o N2
4	ap1	ae2	F1	Vc2 o N2
5	ap1	ae1	F2	Vc1 o N1
6	ap1	ae2	F2	Vc1 o N1
7	ap1	ae1	f2	Vc2 o N2
8	ap1	ae2	f2	Vc2 o N2
9	ap2	ae1	f1	Vc1 o N1
10	ap2	ae2	f1	Vc1 o N1
11	ap2	ae1	F1	Vc2 o N2
12	ap2	ae2	F1	Vc2 o N2
13	ap2	ae1	F2	Vc1 o N1
14	ap2	ae2	F2	Vc1 o N1
15	ap2	ae1	f2	Vc2 o N2
16	ap2	ae2	f2	Vc2 o N2

Tabla 7: Ensayos de Macizado

Los valores de los parámetros se seleccionan de forma que para cada uno de ellos existan dos posibilidades que disten lo suficiente como para dar resultados diferentes y se pueda obtener una tendencia. Los valores seleccionados para los parámetros son los siguientes.

Profundidad de pasada Axial (mm)	ap1	20
	ap2	10
Profundidad de pasada Radial (mm)	ae1	6
	ae2	3
Avance (mm/min)	f1	398
	f2	663
Velocidad rotación (rpm)	N1	13263
	N2	7958

Tabla 8: Parámetros de corte

Cabe destacar que la velocidad de rotación de los herramienta en revoluciones por minuto son calculados a partir de la velocidad de corte del mecanizado. Los parámetros de la velocidad de corte que se corresponden con N1 y N2 son respectivamente V_{c1} y V_{c2} con valores de 250 y 150 con unidad de medida de m/min. También destacar que en los valores de profundidad de pasada radial se observa que el primero de los parámetros es de 6mm, es decir, es una operación de ranurado, y el segundo es de 3mm, es decir, una operación de recantado con medio diámetro.

Se deciden realizar todas las operaciones con el método de fresado en oposición. Es importante que las 16 barridas se hagan con el mismo método, con el fin de obtener unos resultados coherentes.

A cada probeta de macizado se le aplican 16 barridos de las características de la tabla 7 y este proceso se repite tres veces, una para cada herramienta. Dado que el número de probetas para realizar los ensayos no es sobrante, es necesario optimizar lo máximo posible las operaciones de ranurado y recantado que se van a realizar. El diseño previo se puede observar en la figura 24. Se aprecia como se va a dejar gran parte de la probeta sin mecanizar, esto es para tener la posibilidad de realizar más barridos en el caso de que se produzcan errores en los principales.

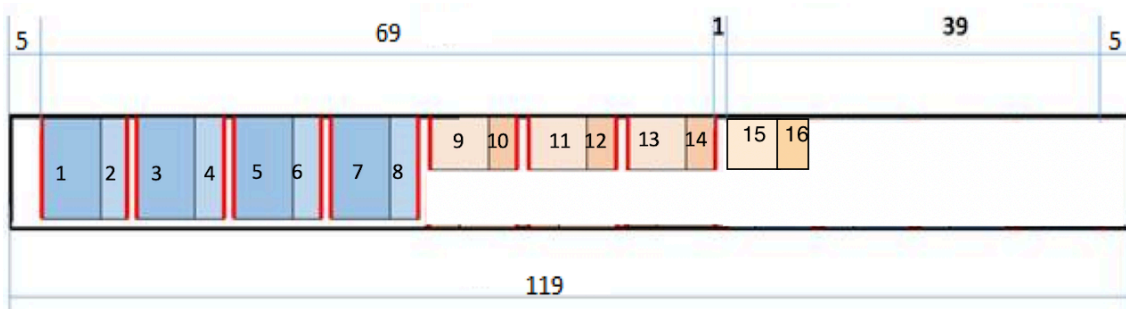


Ilustración 24: Diseño de barridas (vista lateral)

Por un lado se adjunta la vista lateral de cómo se han diseñado los ensayos. Los números impares son ranurados, y aprovechando dicho hueco, se realizan los números pares que corresponden con los recanteados. En la ilustración 25 se observa también la vista por encima de la probeta.

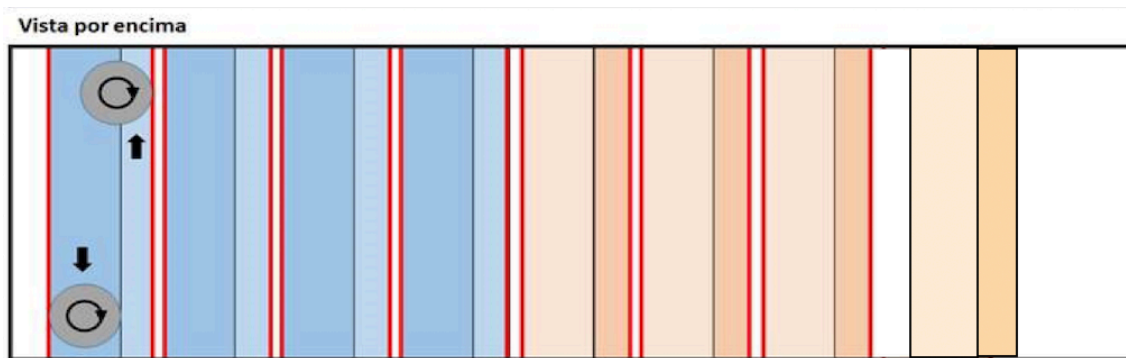


Ilustración 25: Diseño de las barridas (vista superior)

7.1.1.2 Montaje de probetas

Debido a que el espacio que existe en el centro de mecanizado es muy reducido porque los sistemas de medición nos restringen el área en el que podemos colocar las probetas. Además el sistema de anclaje está también restringido por la gran optimización de las probetas que se ha decidido en la parte de diseño de experimentos.

La solución para el caso de las probetas de macizado consiste en montar la probeta encima de la mesa de medición de fuerzas, y colocar dos tornillos largos en los agujeros que posee dicha mesa. A la altura de la probeta se colocan dos arandelas, y se aprietan los tornillos, de forma que la arandela ejerza una presión sobre la probeta, suficiente como para evitar los movimientos de esta durante el mecanizado. En la figura 26 se observa como se monta el sistema real, en el momento del ensayo.

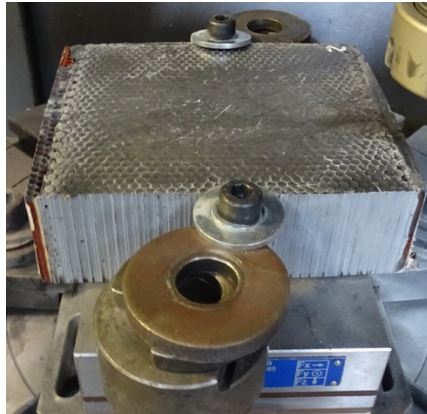


Ilustración 26: Amarre de probeta de macizado

7.1.2 CFRP

7.1.2.1 Diseño de ensayos

Para los ensayos del mecanizado del material composite de fibra de carbono se tienen 12 probetas de dimensiones 200x50x2,8mm. El barrido se va a realizar con los 4 parámetros de corte seleccionados. Dado que el espesor de estas probetas de carbono es de 2,8mm el parámetro correspondiente con la profundidad axial de pasada no va a variar en ninguno de los experimentos, siempre se va a mecanizar los 2,8mm de espesor. Por tanto, la operación que se le va a realizar a las placas de carbono son recanteados. El procedimiento de ensayos se puede observar en la tabla 9.

Nº	Profundidad de pasada axial	Profundidad de pasada radial	Avance	Velocidad corte o de rotación
1	2,8	ae1	f1	Vc1 o N1
2	2,8	ae2	f1	Vc1 o N1
3	2,8	ae1	f1	Vc2 o N2
4	2,8	ae2	f1	Vc2 o N2
5	2,8	ae1	f2	Vc1 o N1
6	2,8	ae2	f2	Vc1 o N1
7	2,8	ae1	f2	Vc2 o N2
8	2,8	ae2	f2	Vc2 o N2

Tabla 9: Diseño de las pasadas

Los valores de los parámetros han de ser lo suficientemente dispares como para obtener resultados diferentes. En cuanto a la profundidad pasada radial, se define para dos recanteados diferentes. Puesto que el diámetro de la herramienta es 6mm, se definen dos valores que sean diferentes, ya que si escogiésemos este valor, la operación sería un recantado-ranurado que puede dar resultados extraños. El avance y la velocidad de corte no varían con respecto a los demás ensayos.

Profundidad de pasada axial (mm)	ap	2,8
Profundidad de pasada radial (mm)	ae1	5
	ae2	3
Avance (mm/min)	f1	398
	f2	663
Velocidad rotación (rpm)	N1	13263
	N2	7958

Tabla 10: Parámetros de corte de las pasadas

Cabe destacar que la velocidad de rotación de los herramienta en revoluciones por minuto son calculados a partir de la velocidad de corte del mecanizado. Los parámetros de la velocidad de corte que se corresponden con N1 y N2 son respectivamente V_{c1} y V_{c2} con valores de 250 y 150 con unidad de medida de m/min. Adicionalmente el método de fresado que se usa en estas operaciones es el de fresado en oposición, al igual que en el caso del macizado.

El número de herramientas es 3, por tanto, para cada herramienta se usan 4 probetas de carbono. A cada probeta se le van a realizar 2 recanteados, uno por cada uno de los cantos de longitud 200mm. Lo que da un número de pasadas de 8 para cada herramienta, y un número de 24 pasadas en total.

Cada probeta independiente de las demás sufre dos barridos uno de profundidad de pasada radial de 5mm y otro de profundidad de pasada radial de 3mm. En la figura 27 se observa el boceto del diseño de los experimentos, siendo la zona roja la correspondiente con el barrido de 5mm y la zona de color crema la del barrido de 3mm.



Ilustración 27: Probeta CFRP

7.1.2.2 Montaje de probetas

Las dimensiones de estas probetas no son un problema a la hora de montarlas en la mesa de medición de fuerzas y por tanto no hay restricciones en cuanto al centro de mecanizado. La solución más correcta para sujetar dichas probetas con dos tornillos situados de forma simétrica tal y como se observa en el esquema figura 28. De tal forma se asegura el no movimiento de la probeta durante el mecanizado.



Ilustración 28: Amarre de la probeta CFRP

Sin embargo, el problema en este mecanizado se debe de tener en cuenta con las probetas. Las 12 probetas han de ser exactamente iguales para poder realizar los ensayos de forma seguida sin tener que programar el ordenador del centro de mecanizado cada vez que se posiciona una probeta. Para ello, en otro centro de mecanizado se cortan las placas de carbono todas juntas y se realizan los taladros correspondientes para poder introducir los tornillos de anclaje. Se procura que los cantos queden todo lo recto posible, para que en la operación de recantado la herramienta mecanice con la misma profundidad de pasada radial. Si la probeta no está totalmente alineada, puede ocurrir que la herramienta empiece a recantar con un ae de 5mm y acabe recantando con un ae de 4,8mm. Y eso suponen inexactitudes que estropean los resultados finales. Por tanto, se mecanizan las 12 probetas con tolerancias muy pequeñas.

Con el fin de agilizar lo máximo posible los ensayos, el centro de mecanizado se programa para que en cada probeta se realicen los dos recanteados seguidos. Por tanto la herramienta recantea primero un canto y luego se mueve hasta el otro canto y realiza la segunda operación. En la figura 29 se puede observar el sistema real montado en el centro de mecanizado de Tecnalia donde se realizan los ensayos.

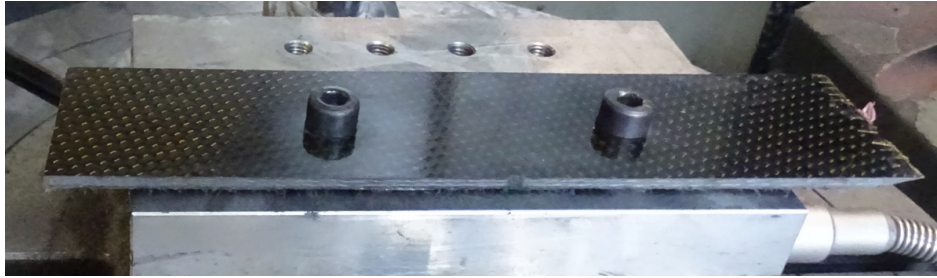


Ilustración 29: Montaje real de la probeta CFRP

7.1.3 Núcleo Honeycomb

7.1.3.1 Diseño de ensayos

Las probetas de núcleo honeycomb tienen unas dimensiones de 200x50x40mm. Se cuenta con 12 probetas de este tipo y 3 herramientas a probar, por tanto, para cada herramienta son necesarias 4 probetas. El barrido se va a realizar con los 4 parámetros de corte seleccionados. Dado que el espesor de estas probetas es de 40mm, se van a realizar 2 pasadas de 20mm por cada uno de los cantos para completar el recanteado de cada uno de los lados.

Nº	Profundidad de pasada axial	Profundidad de pasada radial	Avance	Velocidad corte o de rotación
1	20 y 20	ae1	f1	Vc1 o N1
2	20 y 20	ae2	f1	Vc1 o N1
3	20 y 20	ae1	f1	Vc2 o N2
4	20 y 20	ae2	f1	Vc2 o N2
5	20 y 20	ae1	f2	Vc1 o N1
6	20 y 20	ae2	f2	Vc1 o N1
7	20 y 20	ae1	f2	Vc2 o N2
8	20 y 20	ae2	f2	Vc2 o N2

Tabla 11: Diseño de experimentos Honeycomb

Las herramientas que se van a usar para el recantado del honeycomb son las mismas que las utilizadas para el recantado del carbono, por tanto los parámetros de las condiciones de corte son iguales exceptuando la profundidad de pasada axial. Cabe destacar que la velocidad de rotación de los herramienta en revoluciones por minuto son calculados a partir de la velocidad de corte del mecanizado. Los parámetros de la velocidad de corte que se corresponden con N1 y N2 son respectivamente Vc1 y Vc2 con valores de 250 y 150 con unidad de medida de m/min.

El método de fresado utilizado es el de fresado por oposición.

Profundidad de pasada axial (mm)	ap	20
Profundidad de pasada radial (mm)	ae1	5
	ae2	3
Avance (mm/min)	f1	398
	f2	663
Velocidad rotación (rpm)	N1	13263
	N2	7958

Tabla 12: Parámetros de corte

Cada probeta independiente de las demás sufre dos barridos uno de profundidad de pasada radial de 5mm y otro de profundidad de pasada radial de 3mm. En la figura 30 se observa el boceto del diseño de los experimentos, siendo la zona roja la correspondiente con el barrido de 5mm y la zona de color crema la del barrido de 3mm.



Ilustración 30: Probeta Honeycomb

7.1.3.2 Montaje de probetas

Las probetas de núcleo honeycomb no presentan problemas de espacio ni de ajuste con la mesa de medición de fuerzas. Las celdas propias de este material permiten introducir tornillos por cualquier zona de la probeta y anclarla para poder hacer las operaciones de mecanizado. Para este caso se utiliza una de las probetas de carbono ya mecanizadas, para ejercer presión axial a la probeta de honeycomb, tal y como se observa en la ilustración 31.



Ilustración 31: Amarre probeta Honeycomb

El sistema de amarre de la probeta de honeycomb es muy similar al sistema utilizado en el amarre de las piezas de carbono, la única diferencia es que el canto de esta segunda está más lejos de los anclajes que en el carbono. Esto hay que tenerlo en cuenta ya que puede suponer un problema a la hora de recantear.

7.2 Sistemas de medición de fuerzas

Una vez explicados el diseño de los experimentos a realizar y los amarres de las piezas que se van a utilizar, es necesario exponer los diferentes métodos de captación y medición de fuerzas que se van a usar para obtener los resultados de los experimentos. En las instalaciones de Tecnalia proponen tres sistemas diferentes de captación de esfuerzos durante el mecanizado. Son los siguientes.

- **Spyke:** Es un portaherramientas inalámbrico sensorizado.
- **Mesa Kistler.** Es un dinamómetro multicomponente que permite medir con precisión fuerzas de gran dinamismo.

- **Servoguide.** Es el sistema de medición de esfuerzos propio del centro de mecanizado.

Se profundiza en los dos primeros sistemas de medición ya que son más exactos y más fáciles de tratar a la hora de obtener los resultados de las fuerzas. El Servoguide es el sistema propio del centro de mecanizado y da buenos resultados, pero en este trabajo se ha optado por tener en cuenta los datos obtenidos de los dos primeros sistemas.

7.2.1 Sistema Spyke

Es un sistema inalámbrico de medición de esfuerzos de la marca Promicron. Se usa principalmente como herramienta de diagnóstico o para monitoreo de herramientas. Durante el mecanizado, en este caso durante el fresado, puede medir la fuerza y el par generados directamente en el portaherramientas. Los datos se pueden transmitir de forma directa a un receptor de lectura. Dicho portaherramientas es muy utilizado para la optimización de procesos de corte y fresado.

Una característica distintiva del software es la representación de los valores de medición en un diagrama polar, es decir en coordenadas polares. En este diagrama, el par de flexión que actúa sobre el portaherramientas se muestra en coordenadas polares y por tanto en forma angular. Gracias a este sistema, se pueden detectar fuerzas durante la vida útil de la herramienta o incluso se pueden detectar las fuerzas en diferentes fluidos de corte. Tiene un sensor de temperatura integrado que detecta la temperatura en el lugar del anillo sensorial y, por lo tanto, puede mostrar tendencias de la temperatura del proceso. Para facilitar el análisis y la documentación de los resultados de la medición, el portaherramientas viene acompañado de un software analizador de herramientas opcional. El portaherramientas Spyke puede medir los siguientes esfuerzos sufridos por la herramienta.

- **Momento de flexión.** Se perciben dos señales de momento de flexión, una debida a la fuerza en el eje X y otra debido a la fuerza en el eje Y. La combinación de las dos componentes junto con los momentos generados por las fuerzas F_c y F_{nc} , suman el momento de flexión total.
- **Fuerza axial.** Dicha señal representa la combinación de la fuerza axial y de la fuerza F_{nc} .
- **Momento de torsión.** La señal del momento de torsión proviene de la multiplicación de la fuerza F_c por el radio del portaherramientas.

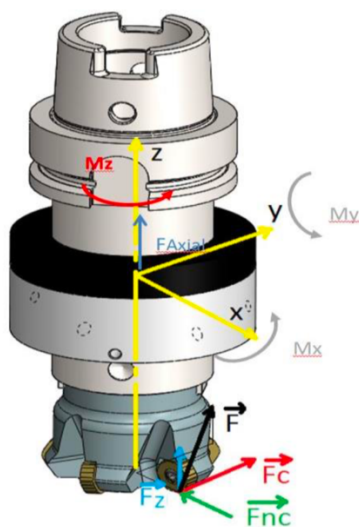


Ilustración 32: Esquema de esfuerzos

El sistema está conectado a los ordenadores de las instalaciones de Tecnalia, siendo estos los receptores de los datos de esfuerzos. El proceso en el que se basa el sistema de obtención de datos, tratamiento y representación en software se puede observar en la figura 33.

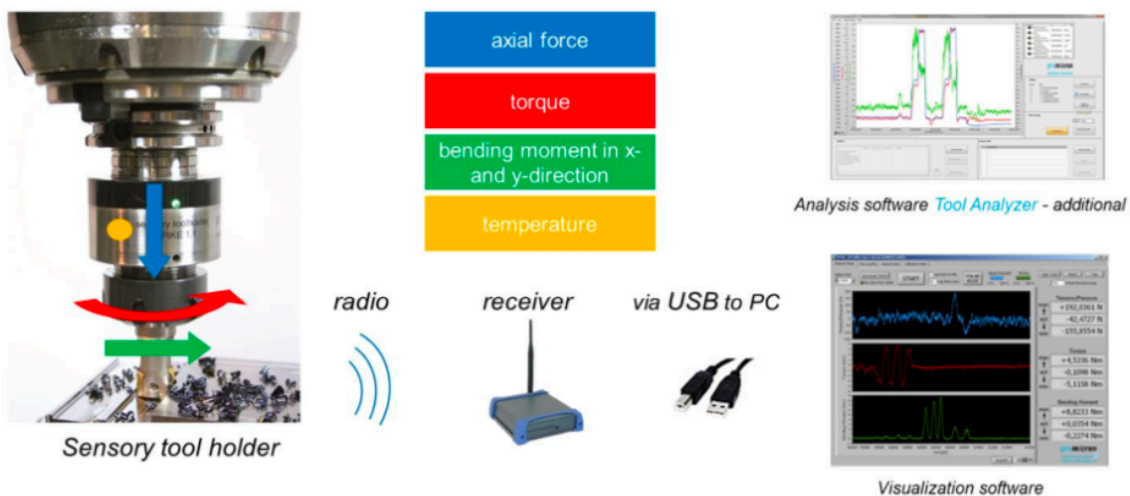


Ilustración 33: Proceso recepción de datos

7.2.2 Sistema Kistler

El dinamómetro consta de cuatro sensores de fuerza de tres componentes instalados bajo alta precarga entre una placa base y una placa superior. Cada sensor contiene tres pares de placas de cuarzo, una sensible a la presión en la dirección z y las otras dos respondiendo a las fuerzas de corte en las direcciones

x e y. Las salidas de los cuatro sensores de fuerza están conectadas dentro del dinamómetro de manera que se puedan realizar mediciones de fuerzas y momentos de múltiples componentes. Toda esta información se extrae a partir del conector que posee en uno de sus extremos. La mesa sensorial esta recubierta de un protector aislador de temperaturas el cual hace que el dinamómetro no sufra ningún daño ante altas temperaturas.

El principal uso de este sistema es la medición de fuerzas durante el corte de torneado, el fresado, rectificado, etc. La alta sensibilidad del sistema permite mediciones exactas en herramientas pequeñas. El sistema Kistler tiene el aspecto y las dimensiones que se observan en la figura 34.

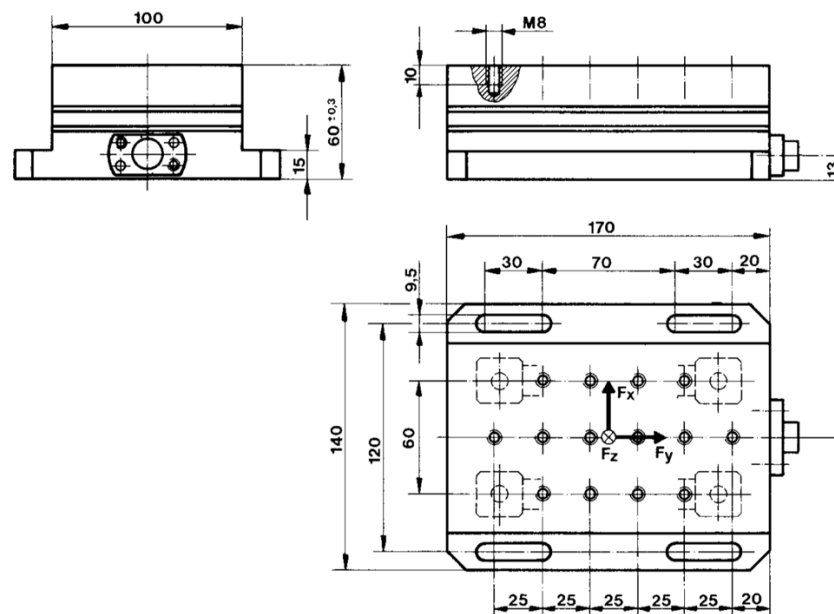


Ilustración 34: Plano mesa dinamométrica Kistler

El sistema de montaje es anclado a la mesa principal del centro de mecanizado. Por el orificio de la derecha del sistema Kistler se conecta el cable de conexión correspondiente que a su vez se conecta a un amplificador multicanal de carga, la información se traslada mediante un cable de conexión a un sistema de adquisición de datos que posteriormente se conecta a un ordenador en el cual está instalado el software DynoWare en el cual se puede hacer la lectura de los datos de forma tanto gráfica como numérica.

7.2.3 Calibración de los sistemas

Un detalle importante del portaherramientas Spyke es que las coordenadas en las que obtiene los esfuerzos son polares. Dado que se van a obtener valores de

las fuerzas no solo del sistema Spyke sino también del dinamómetro Kistler, es necesario realizar la transformación de las coordenadas polares del Spyke a coordenadas cartesianas.

Para agilizar la lectura de las fuerzas en el ensayo de mecanizado se propone obtener una ley de transformación que pase de polares a cartesianas directamente. Esta ecuación se consigue tras un ensayo de mecanizado previo, al cual se le llama ensayo de calibración. El ensayo se ha de realizar en las mismas condiciones que el ensayo de mecanizado del cual se obtendrán los datos de los esfuerzos finales. Se diseña, por lo tanto, un ensayo en el que se va a mecanizar piezas de carbono, haciendo los barridos suficientes como para tener datos que analizar.

El material utilizado para el ensayo de calibración es proporcionado por parte de la UPV y la herramienta es una fresa multidente de la marca SGS, la cual está especializada en el mecanizado de composites de fibra de carbono. En la figura 35 se observa el sistema montado real de ensayo.

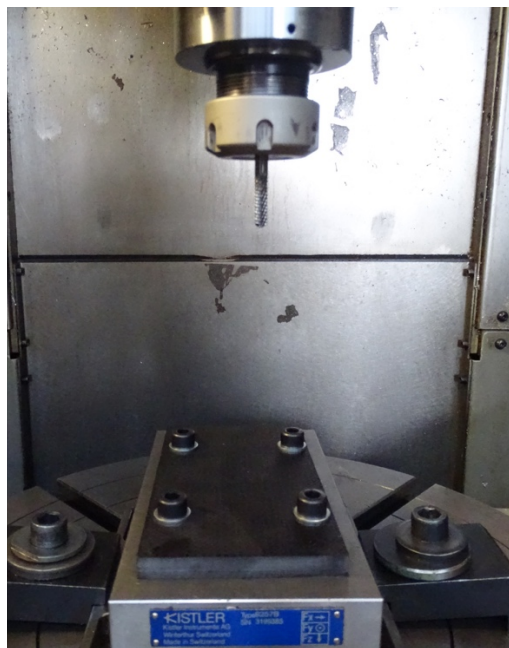


Ilustración 35: Sistema montado real de ensayo

Una vez obtenidos los datos de fuerzas del Spyke y de la mesa Kistler, es necesario comparar dichos valores de esfuerzos en los mismos momentos para poder obtener la ley de transformación. Para la realización de esta transformación es necesario, una vez se obtienen los valores de los esfuerzos del Spyke, a cada esfuerzo se le asigna un valor de ángulo en radianes. Mediante el ángulo y los valores de los esfuerzos se puede transformar el valor polar en cartesiano, una vez realizado dicho cambio, solo hay que contrastar si son o no iguales las fuerzas medidas por el Spyke y las fuerzas medidas por la

mesa Kistler. Si no son iguales es importante comprobar si existe alguna relación estrecha entre unos valores y otros, de forma que, por ejemplo, la fuerza medida por el Spyke es igual a un factor K multiplicada por la fuerza medida por la mesa Kistler. En el caso de que no exista ninguna relación, lo más fácil es dar por válidos los datos que se obtienen de la mesa Kistler.

7.3 Método de análisis del desgaste

Tras haber realizado los ensayos de mecanizado correspondientes se procede a analizar el desgaste de las herramientas utilizadas. Es un proceso en el que se va a medir en cada fresa el volumen promedio de diente que se ha desgastado, y teniendo en cuenta la profundidad axial de pasada se realiza una estimación de que cantidad de volumen se ha perdido.

7.3.1 Instalación

El método a seguir para la medición del desgaste requiere de la instalación de una técnica que permita observar de cerca los dientes y apreciar como la punta de estos ha pasado a ser una superficie con un área determinada. Adicionalmente, es necesario un sistema de portaherramientas que permita posar las fresas de forma que sean analizables los dientes de las mismas. Por último, para la captación de las imágenes se precisa de un ordenador o dispositivo móvil que se pueda conectar con el aparato de aumento de imagen.

Para la amplificación de la imagen del diente de la herramienta se compra un microscopio de marca Jiusion con un aumento de entre 40x1000. Se opta por este microscopio debido a su fácil conectividad con el sistema del ordenador o teléfono móvil. Además permite una observación en directo, en cualquiera de los dispositivos a los que está conectado, de lo que se quiere aumentar.



Ilustración 36: Microscopio Jiusion

El microscopio se ancla con cinta adhesiva a un libro, de forma que este tenga altura para observar las herramientas. Debido a que es un instrumento de gran precisión es necesario que no existan movimientos durante la obtención de las imágenes y para ello se utiliza la cinta adhesiva.

Como el microscopio no se va a mover, se piensa en un sistema de portaherramientas rotativo que permita girar la fresa los grados que se quieran. En el laboratorio de la UPV se encuentra un objeto roscado con un tornillo que es válido para la aplicación en cuestión. Dicho sistema se observa en la figura 37, y dado que el diámetro del agujero es más grande que el diámetro de las herramientas, se introduce un tope de plástico. Además, para asegurar que el sistema de rotación no sufre ningún movimiento, se ancla el portaherramientas a la mesa con cinta adhesiva.

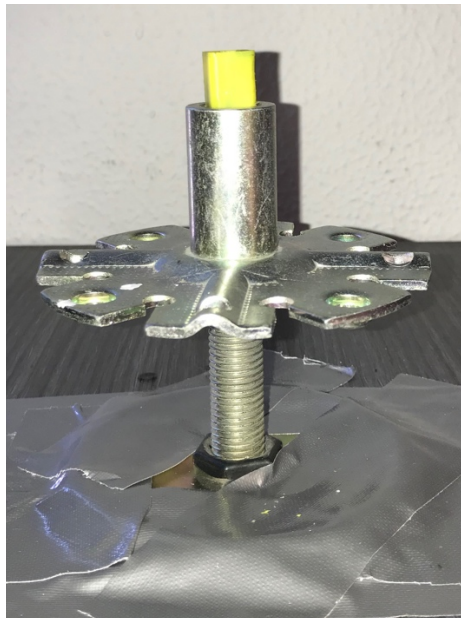


Ilustración 37: Sistema portaherramientas rotativo

La instalación está casi completada a falta de la conexión con el ordenador, a través el cual se observa la captación de la imagen. Se cuenta con un dispositivo con software iOS, el cual no necesita instalación y simplemente al conectar el microscopio la imagen se ve en la aplicación de Cámara. En la figura 38 se puede apreciar el sistema completo de la instalación con una herramienta montada y con el ordenador reproduciendo la captación realizada por el microscopio.



Ilustración 38: Instalación completa de análisis de desgaste

La instalación permite sacar fotos o videos de los dientes con un aumento significativo y en el cual se observan los desgastes. Es esencial que en la captura de imágenes de una misma herramienta, no exista ningún movimiento ni del microscopio ni del portaherramientas, exceptuando la rotación del segundo.

7.3.2 Análisis del desgaste

Una vez instalados todos los aparatos necesarios para el análisis del desgaste se debe plantear los pasos a seguir para realizar la medición de dicho desgaste. La metodología a seguir se aplica a cada una de las herramientas a analizar, y los pasos son los siguientes.

- **Colocar fresa en portaherramientas.** Se coloca la fresa en el portaherramientas rotativo, se procura que quede totalmente erguida de forma que no existan desviaciones debidas a la rotación del sistema.
- **Enfocar con el microscopio la herramienta y capturar la escala con dicho enfoque.** Una vez colocada la herramienta hay que enfocar el microscopio observando la imagen en el ordenador, cuando más nítida se vea la imagen mejor, así se podrán medir mejor los dientes. Una vez realizado el enfoque se saca una imagen de la escala también enfocada. Para cada herramienta el enfoque no se puede mover, en el caso de que se enfoque de nuevo hay que capturar también la escala con dicho enfoque. La escala permite saber la magnitud real que se ha sacado en la foto a un enfoque determinado.

- **Rotar el portaherramientas y capturar imágenes cada “X” grados.** Para seguir un procedimiento igual en todas las herramientas se deciden sacar 8 fotos de cada una de ellas. Dado que el portaherramientas tiene 8 agujeros en la parte roscada, se obtendrá una imagen cada vez que uno de estos se alinee con el microscopio. Por lo tanto, se captura una imagen cada 45°.
- **Analizar los dientes de cada imagen.** Tras haber capturado las imágenes necesarias, hay que medir el área de los dientes desgastados de cada imagen. Se procura que el diente desgastado esté de punta, de forma que se mida la magnitud real. En la figura 39 se muestra un ejemplo de captura de un diente, en esta imagen se puede medir el área desgastada del diente desgastado.



Ilustración 39: Ejemplo de captura de diente

- **Calcular volumen desgastado.** Una vez obtenidos los valores de las áreas de los dientes desgastados hay que diseñar un método con el cual se pueda obtener la diferencia de volumen entre el diente nuevo y el desgastado. En primer lugar hay que calcular el volumen del diente sin desgastar, para ello se captura una imagen de un diente de punta y se mide la base de dicho diente. También hay que capturar la herramienta de punta de forma que se pueda saber la altura de dicho diente.

De las herramientas utilizadas hay dos formas de dientes distintas. El primer tipo tiene dientes con forma piramidal, por tanto con el área de la base y la altura se conoce el volumen del diente. El segundo tipo tiene dientes de forma piramidal con base rectangular y punta en arista, conociendo el área de la base, la altura y la arista superior se conoce el volumen del diente. Los dos tipos de dientes, al sufrir desgaste, tienen forma de tronco piramidal que conociendo el área de diente desgastado, valor obtenido en el análisis del desgaste, se plantea un sistema de

ecuaciones a partir del cual se obtiene el volumen desgastado. A continuación se explica dicho planteamiento.

El sistema de ecuaciones que se plantea es el siguiente. Por un lado, el volumen total es igual a la suma de volúmenes de diente desgastado más volumen de diente perdido. Y por otro lado, la altura del diente sin desgastar es igual a la altura del diente desgastado más la altura del volumen de diente perdido. En la figura 40 se puede observar dicho sistema de forma geométrica.

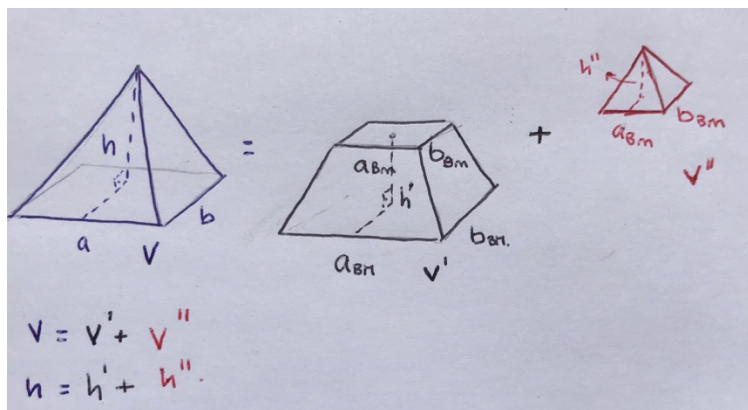


Ilustración 40: Sistema de ecuaciones

El volumen V depende de si la herramienta tiene dientes del tipo uno o del tipo dos, por tanto su valor varía en función de dichos dientes.

1. Dientes con forma piramidal. El cálculo de su volumen es directo a partir de la fórmula de volumen de una pirámide.

$$\frac{a \cdot b \cdot h}{3}$$

2. Dientes con forma piramidal y punta en arista. Para calcular el volumen de este tipo de dientes, se divide el diente tal y como se ve en la ilustración 41. Los valores de todas las medidas son conocidas, así que el volumen es conocido también.

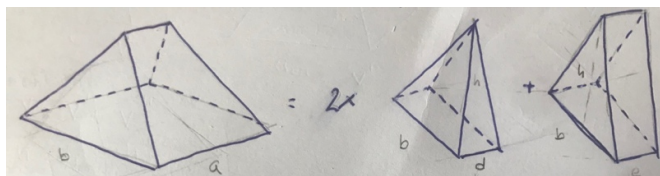


Ilustración 41: Cálculo volumen diente piramidal punta de arista

El volumen V' , que se corresponde con el del diente desgastado, tiene forma de tronco piramidal, del cual se desconoce la altura h' . Esta es la primera incógnita del sistema. El volumen del tronco es calculado a partir de la fórmula siguiente.

$$\frac{h}{3} (A_{BM} + A_{Bm} + \sqrt{A_{BM} \cdot A_{Bm}})$$

El volumen V'' es el volumen de diente perdido y tiene forma de pirámide, de la cual se desconoce su altura h'' . Esta es la segunda incógnita del sistema de ecuaciones que tiene la forma siguiente.

1. $V = V' + V''$
2. $h = h' + h''$

La resolución de dicho sistema nos proporciona los valores de h' y h'' con los cuales se puede calcular el volumen restante y el volumen perdido de cada diente.

Para cada herramienta se calculan un número determinado de dientes, por tanto de dichos desgastes se obtiene un promedio de desgaste por diente. Dado que la profundidad axial de pasada es conocida, por observación de la herramienta se cuentan el número de dientes que han mecanizado en cada operación. El volumen total de desgaste es la multiplicación del promedio de desgaste por diente por el número total de dientes que han mecanizado.

7.4 Método de análisis de los esfuerzos

Los datos sobre los esfuerzos son recogidos tanto por la mesa Kistler como por el portaherramientas Spyke. Ambos sistemas recolectan datos de esfuerzos cada milisegundo y los copian en una hoja de datos que puede ser importada a cualquier software de tratamiento de datos

En primer lugar se pueden intentar de filtrar y tratar dichos datos con Excel, pero debido a que cada experimento tiene entorno a 16.000 filas, puede que no sea la mejor manera de hacerlo. Por lo tanto, para el tratamiento de dichos

datos se utiliza un software que es capaz de graficar archivos con muchos datos, llamado SigView.

En este programa se importan los datos correspondientes a cada ensayo, y automáticamente se grafican los esfuerzos en función del tiempo. En estas gráficas se observa el comienzo del mecanizado y el final del mismo, de forma que realizando el promedio de los esfuerzos en cada instante, se obtiene el esfuerzo medio por experimento. Debido a que para la modelización del sistema solo se necesita la fuerza que se opone al avance de la herramienta, se calcula el promedio de esa fuerza para cada uno de los experimentos. En total se obtienen 16 fuerzas medias para cada herramienta y para cada pieza de macizado y 8 para cada herramienta y cada pieza tanto de núcleo honeycomb como CFRP.

7.5 Método de modelización de leyes de corte y desgaste

Una vez analizados el desgaste y los esfuerzos de cada experimento se puede realizar la estimación de las leyes de corte y desgaste. Ambas leyes se corresponden con dos formulas que ajustan el comportamiento de la herramienta en función de unas variables determinadas por el usuario. Cabe destacar que dichas variables son los parámetros de corte utilizados para la realización de los ensayos. El tratamiento de datos en este apartado depende en todo momento de los datos obtenidos en las dos tareas previamente explicadas, en el caso de que exista algún error en la modelización habrá que comprobar la validez de los datos obtenidos, tanto de esfuerzos como de desgaste.

7.5.1 Leyes de corte y desgaste

Las fórmulas que se utilizan han sido expuestas y explicadas en el estado del arte. Por un lado hay una fórmula que determina el desgaste inmediato y por otro lado hay otra fórmula que determina la fuerza de oposición al avance que existe.

- **Ley de desgaste.** La ecuación relaciona el desgaste inmediato de la herramienta en cualquier momento del mecanizado con el desgaste inicial de dicha herramienta y el sumatorio del esfuerzo por longitud

equivalente de la herramienta. Tal y como se ve en las fórmulas existen unos valores que hay que calcular.

$$W_i = W_0 + A_0 \cdot \gamma_i$$

$$\gamma_i = \sum_{j=1}^i F_{aj} \cdot L_{cj}$$

Los valores de ambas fórmulas tienen el siguiente significado y procedencia.

- **Wi:** Desgaste instantáneo de la herramienta. Este valor es el que se obtiene del análisis de desgaste a partir de la diferencia de volumen de cada experimento.
- **Faj:** Fuerza de avance. Es el valor que se obtiene del análisis de esfuerzos explicado anteriormente.
- **Lcj:** Longitud equivalente. La longitud equivalente es el perímetro de herramienta que mecaniza durante todo el rato en cada barrido. Depende totalmente de la profundidad de pasada axial. Por ejemplo, en la operación de ranurado de macizado ($a_e = 6\text{mm}$), el perímetro de la herramienta que está en continuo contacto con la pieza mecanizada es la mitad del perímetro total. En la operación de recantado de macizado ($a_e = 3\text{mm}$), el perímetro de la herramienta en continuo contacto es de un cuarto del perímetro total. Y en el caso del recantado de la pieza de carbono ($a_e = 5\text{mm}$), se ha de realizar el cálculo correspondiente para saber el porcentaje de perímetro que está mecanizando.
- **Wo:** Desgaste inicial de la herramienta. Este parámetro se calcula junto con A_0 mediante un sistema de ecuaciones.
- **Ao:** Velocidad de desgaste de la herramienta. El sistema de ecuaciones que se plantea requiere de los valores de desgaste instantáneo acumulado ($\sum W_i$) y del sumatorio de la fuerza de avance por la longitud equivalente (γ_i). Para cada herramienta hay tantos valores para estos como experimentos realizados,

escogiendo dos de todos los que hay se puede plantear un sistema de ecuaciones que permita calcular los valores de W_o y de A_o .

- **Ley de corte.** La ecuación relaciona la fuerza de avance con el desgaste instantáneo del experimento anterior al que se estudia y también influyen los parámetros de mecanizado, tal y como se muestra en las siguientes fórmulas.

$$F_{ai} = K_S \cdot a_e^{a_1} \cdot F^{a_2} \cdot V_c^{a_3} \cdot W_{i-1}^{a_4}$$

$$\frac{F_{ai}}{a_p} = K_S \cdot a_e^{a_1} \cdot F^{a_2} \cdot V_c^{a_3} \cdot W_{i-1}^{a_4}$$

$$F_{ai} = a_1 \cdot a_e + a_2 \cdot F + a_3 \cdot W_{i-1} + a_4 \cdot V_c$$

Los valores de la ecuación tienen el siguiente significado y procedencia.

- **F_{ai}:** Fuerza de avance a calcular. En la ecuación de ley de corte, la fuerza que se opone al avance es una de las variables que se calculan y estiman.
- **A_p:** Profundidad de pasada axial.
- **A_e:** Profundidad de pasada radial.
- **F:** Avance.
- **V_c:** Velocidad de corte.
- **W_{i-1}:** Desgaste del experimento anterior. En la ecuación de ley de corte, el desgaste es una de las variables que se calculan y estiman.

Los demás coeficientes que tiene la ecuación son valores que hay que calcular mediante un método de regresión y utilizando los datos experimentales de desgaste y esfuerzos.

7.5.2 Cálculo de los coeficientes

La determinación de las leyes de corte y desgaste termina con el cálculo de los coeficientes que tienen como exponente cada uno de los parámetros de corte y una constante, todo ello de la fórmula de ley de corte. Para esta resolución se requiere de un software estadístico de tratamiento de datos llamado Lumiere. Los pasos a seguir para el cálculo de los coeficientes son los siguientes.

1. Copiar de la hoja Excel correspondiente los datos correspondientes a los ensayos de cada herramienta.
2. Asignar un nombre en el software, a cada una de los parámetros que hay en dicho Excel. Hay tantas variables como columnas.
3. Generar una regresión múltiple, en la cual se seleccionan las variables que se quieren analizar. En este caso, a un lado de la ecuación se escoge el valor que está a la izquierda de la ecuación y posteriormente se escogen por otro lado las variables que están a la derecha de la ecuación.
4. Con dicho software se analizan los coeficientes obtenidos. Así como su validez estadística. Es importante comparar modelos para cada herramienta, de forma que se obtenga el mejor de ellos.

7.5.3 Validez de los modelos

El cálculo de los coeficientes es el aspecto más importante, ya que a partir de este cálculo se definen los modelos que se van a tener en cuenta para las leyes. Es importante destacar que se modificarán todos los datos posibles de la ley de corte para obtener unos coeficientes que aseguren el modelo más válido posible. Para analizar la validez de estos modelos se observan los siguientes aspectos estadísticos.

- Confianza y riesgo de los coeficientes calculados. Es un parámetro determinante de cada coeficiente, en el caso de que uno de los coeficientes presente una confianza muy pequeña se anula dicho coeficiente y se observa que confianza tienen los demás en ausencia de este. Se dan por válidos coeficientes que tengan confianzas mayores que el 90%, o lo que es lo mismo, que den riesgos menores del 10%.

- Coeficiente de regresión y el de Fisher. El modelo será más válido cuando el coeficiente de regresión más se acerque a la unidad, y cuanto mayor valor tenga el coeficiente de Fisher.
- Análisis gráfico de la desviación del error. Para observar la calidad del modelo también se hace un análisis de la desviación del error, de forma que se pueda evaluar si este valor sigue una distribución normal.

Los dos primeros aspectos comentados son determinantes a la hora de aceptar o rechazar el modelo. El último se añade con el fin de obtener, por comparación, el mejor modelo posible una vez se ha aceptado como válido. En el caso de que ninguno de los aspectos estudiados asegure una modelización correcta del sistema se modifican las variables y se presenta otro modelo que si sea válido.

7.5.4 Análisis de los resultados

Previo al análisis exhaustivo de los resultados obtenidos a partir de la modelización de los esfuerzos y desgastes, es importante comentar el procedimiento de ensayos llevado a cabo debido a las incidencias que han surgido y con el fin de aclarar cuanto porcentaje se ha completado del diseño teórico de los experimentos. Además también se narran las incidencias del ensayo de calibración realizado antes del ensayo de mecanizado

7.5.5 Ensayo de calibración

Los ensayos de calibración se realizaron sin ningún tipo de incidencia. Se mecanizaron probetas de carbono con una herramienta multidiente SGS y se obtuvieron los datos de los esfuerzos tanto del portaherramientas Spyke como de la mesa Kistler. Tras un tratamiento y un análisis de los datos se realizó la transformación de coordenadas polares a coordenadas cartesianas de los valores de esfuerzos del portaherramientas Spyke. Tras esa transformación, no se obtuvo ninguna relación válida entre las fuerzas medidas por la mesa Kistler y las fuerzas del portaherramientas Spyke. Y por lo tanto, con la vista puesta en el ensayo de mecanizado general, se decidió utilizar tan solo los datos provenientes de la mesa Kistler para capturar los esfuerzos sufridos por la herramienta.

7.5.6 Ensayo de mecanizado

A continuación se realiza una breve descripción de los ensayos, y de las incidencias ocurridas tanto con los materiales como con las herramientas.

- **Macizado.** Como incidencia se ha detectado que una de las probetas utilizadas para realizar el mecanizado tenía zonas sin macizar. Es decir, la infiltración de la resina en el panal de abeja de aramida no se había hecho adecuadamente. Además con la probeta defectuosa se ha tenido una rotura de la herramienta Kendu. Debido a la largura del mango de dicha herramienta, que estaba en voladizo en la parte del portaherramientas, este ha partido en el barrido número 6. Dado que la rotura no ha supuesto ningún daño a la zona multidente de la herramienta, se ha vuelto a colocar la fresa en el portaherramientas (ahora con el mango disminuido y dejando menos voladizo) y se han realizado los barridos restantes.
- **Carbono.** Con el carbono no ha ocurrido ninguna incidencia, se han mecanizado las 12 probetas sin ninguna incidencia destacable.
- **Honeycomb.** Las herramientas no resultan adecuadas para el mecanizado de este material. El diámetro de la fresa es muy pequeño en comparación con el diámetro de las celdas del núcleo. Por lo tanto, no se realizaron ensayos sobre las probetas de honeycomb y por consecuencia no existe análisis de los resultados de este material.

Como resumen cabe destacar que al final solo se han utilizado 6 herramientas en vez de 9, ya que el material de honeycomb no ha sido analizado. Para cada una de las 6 herramientas se han realizado todos los ensayos previstos, 16 barridas para el macizado y 8 barridas en el material de carbono. Además todas las imágenes de los ensayos se pueden observar en los anexos.

A continuación se va a realizar un desglose del análisis de los resultados. A estos resultados se ha llegado realizando el procedimiento anteriormente explicado, por un lado analizando los esfuerzos y por otro lado analizando los desgastes.

7.5.6.1 Herramienta “Tivoly”

7.5.6.1.1 Material “Macizado”

Tal y como se describe en el diseño de ensayos, la fresa Tivoly ha realizado 16 barridas sobre la probeta de macizado. No se ha producido ningún evento

destacable en estas operaciones. Las fuerzas medidas por la mesa Kistler se filtran y se organizan en una tabla Excel, y los desgastes observados tras la medición de volúmenes se colocan en otra tabla Excel.

En primer lugar y mediante la ley de desgaste se calculan los valores de W_0 y de A_0 , correspondientes con el desgaste inicial de la herramienta y la velocidad de desgaste de la misma. En segundo lugar se introducen en el software Lumiere la fórmula de la ley de corte y se calculan los coeficientes. En el caso de este experimento, la modelización no presenta ningún problema y tanto las leyes de corte y desgaste son plenamente válidas. Los resultados de dichos análisis son los siguientes.

Por un lado la ley de desgaste:

$$W_i = W_0 + A_0 \cdot \sum_{j=1}^i F_{aj} \cdot L_j$$

Y las variables calculadas correspondientes son:

- $W_0 = 5,0094 \times 10^{-4}$
- $A_0 = 8,02 \times 10^{-6}$

Por otro lado, la ley de corte:

$$\frac{F_{ai}}{a_p} = K_S \cdot a_e^{a1} \cdot F^{a2} \cdot V_c^{a3} \cdot W_{i-1}^{a4}$$

Y los coeficientes calculados con la confianza y el riesgo correspondiente se pueden observar en la tabla 13.

Coeficientes	Valor	Confianza (%)	Riesgo (%)
K_S	0,1414	94,49	5,51
$a1$	0,6959	100	0
$a2$	0,9478	100	0
$a3$	-0,8442	100	0
$a4$	-0,0964	95,8	4,20

Tabla 13: Coeficientes Macizado Tivoly

Una vez calculados los coeficientes hay que comprobar si son o no válidos. En la misma tabla se comprueba que la confianza y el riesgo están dentro de los valores permitidos. Por tanto se miran ahora los coeficientes de regresión y de Fisher.

Coefficiente de regresión = 0,9788

Coefficiente de Fisher = 59,62

Se comprueba que dichos valores cumplen los rangos establecidos para estos aspectos estadísticos. Además se comprueba en el gráfico de la desviación que el error sigue una distribución normal, esto puede observarse en los anexos.

Una vez dadas por validas las leyes modelizadas de corte y desgaste y teniendo en cuenta los variables calculadas y estos coeficientes, estas quedan de la siguiente forma:

$$W_i = 5,0094 \times 10^{-4} + 8,02 \times 10^{-6} \cdot \sum_{j=1}^i F_{aj} \cdot L_j$$

$$F_{ai} = a_p \left[\frac{0,1414 \cdot a_e^{0,6959} \cdot F^{0,9478}}{V_c^{0,8442} \cdot W_{i-1}^{0,0964}} \right]$$

7.5.6.1.2 Material “Carbono”

En el caso del carbono, se han realizado 8 barridas en 4 probetas exactamente iguales, lo que conlleva 2 barridas por probeta. Tras los barridos no se aprecia ninguna incidencia destacable. Al igual que en el caso del macizado, las fuerzas medidas por la mesa Kistler se filtran y se colocan en la hoja de Excel. El volumen de desgaste obtenido también se organiza en otra hoja Excel de forma que sea más fácil en análisis de los datos.

Debido a que el valor de W_o para la herramienta Tivoly ya se ha calculado para el caso del macizado no es necesario recalcularla. Sin embargo la velocidad de desgaste de la herramienta no es la misma puesto que ahora se mecaniza otro material, se calcula por tanto A_o . Después de este cálculo se introduce en el software Lumiere la fórmula de la ley de corte y se calculan los coeficientes.

En el caso de este experimento, la modelización presenta problemas en cuanto a los coeficientes. Se ha tratado de conseguir un modelo de esfuerzos que nos sea válido y sea del estilo del modelo teórico, pero los resultados no han sido satisfactorios, así que la ley de corte ha sido modificada ligeramente.

Por un lado la ley de desgaste:

$$W_i = W_o + A_o \cdot \sum_{j=1}^i F_{aj} \cdot L_j$$

Y las variables calculadas correspondientes son:

- $W_o = 5,0094 \times 10^{-4}$
- $A_o = 4,9689 \times 10^{-5}$

Por otro lado, la ley de corte tiene la siguiente forma:

$$F_{ai} = a_1 \cdot a_e + a_2 \cdot F + a_3 \cdot W_{i-1} + a_4 \cdot F \cdot V_c$$

Y los coeficientes calculados con la confianza y el riesgo correspondiente se pueden observar en la tabla 14.

Coeficientes	Valor	Confianza (%)	Riesgo (%)
a1	-1,9490	79,08	20,92
a2	0,1157	96,96	3,04
a3	-6142,50	97,70	2,30
a4	-0,0002	92,90	7,10

Tabla 14: Coeficientes Carbono Tivoly

Una vez calculados los coeficientes hay que comprobar si son o no válidos. En la misma tabla se comprueba que la confianza y el riesgo de tres de los coeficientes están dentro de los valores permitidos. Sin embargo el coeficiente correspondiente con la profundidad de pasada radial tiene un riesgo muy alto, pese a ello, se da por válido el modelo ya que no se ha conseguido ningún

modelo mejor. Posteriormente se miran los coeficientes de regresión y de Fisher.

Coeficiente de regresión = 0,9788

Coeficiente de Fisher = 22,84

Se comprueba que dichos valores cumplen los rangos establecidos para estos aspectos estadísticos. El coeficiente de regresión se acerca mucho a la unidad y el coeficiente de Fisher, a pesar de no ser alto, es un valor grande. Además se comprueba en el gráfico de la desviación que el error sigue una distribución normal, esto puede observarse en los anexos.

Una vez dadas por validas las leyes modelizadas de corte y desgaste y teniendo en cuenta los variables calculadas y estos coeficientes, estas quedan de la siguiente forma:

$$W_i = 5,0094 \times 10^{-4} + 4,9689 \times 10^{-5} \cdot \sum_{j=1}^i F_{aj} \cdot L_j$$

$$F_{ai} = -1,9490 \cdot a_e + 0,1157 \cdot F - 6142,5 \cdot W_{i-1} - 0,0002 \cdot F \cdot V_c$$

7.5.6.2 Herramienta “WNT”

7.5.6.2.1 Material “Macizado”

Tal y como se describe en el diseño de ensayos, la fresa WNT ha realizado 16 barridas sobre la probeta de macizado. No se ha producido ningún evento destacable en estas operaciones. Las fuerzas medidas por la mesa Kistler se filtran y se organizan en una tabla Excel, y los desgastes observados tras la medición de volúmenes se colocan en otra tabla Excel.

En primer lugar y mediante la ley de desgaste se calculan los valores de W_0 y de A_0 , correspondientes con el desgaste inicial de la herramienta y la velocidad de desgaste de la misma. En segundo lugar se introducen en el software Lumiere la fórmula de la ley de corte y se calculan los coeficientes.

En el caso de este experimento, la modelización presentan problemas tanto en la constante como en el coeficiente de profundidad de pasada radial, su presencia en el modelo provoca que la confianza de los demás coeficientes sea menor. Por lo tanto se estudia el modelo sin tener en cuenta esos parámetros que lo único que hacen es entorpecer la modelización. Los resultados de dichos análisis son los siguientes.

Por un lado la ley de desgaste:

$$W_i = W_o + A_o \cdot \sum_{j=1}^i F_{aj} \cdot L_j$$

Y las variables calculadas correspondientes son:

- $W_o = 3,143 \times 10^{-3}$
- $A_o = 6,90 \times 10^{-6}$

Por otro lado, la ley de corte:

$$\frac{F_{ai}}{a_p} = F^{a1} \cdot V_c^{a2} \cdot W_{i-1}^{a3}$$

Y los coeficientes calculados con la confianza y el riesgo correspondiente se pueden observar en la tabla 15.

Coeficientes	Valor	Confianza (%)	Riesgo (%)
a1	0,7612	100	0
a2	-1,0202	100	0
a3	-0,2549	97,07	2,93

Tabla 15: Coeficientes macizado WNT

Una vez calculados los coeficientes hay que comprobar si son o no válidos. En la misma tabla se comprueba que la confianza y el riesgo están dentro de los

valores permitidos. Por tanto se miran ahora los coeficientes de regresión y de Fisher.

Coeficiente de regresión = 0,99008

Coeficiente de Fisher = 214,30

Se comprueba que dichos valores cumplen los rangos establecidos para estos aspectos estadísticos, el coeficiente de regresión es casi 1 y el coeficiente de Fisher es muy alto. Además se comprueba en el gráfico de la desviación que el error sigue una distribución normal, esto puede observarse en los anexos.

Una vez dadas por validas las leyes modelizadas de corte y desgaste y teniendo en cuenta los variables calculadas y estos coeficientes, estas quedan de la siguiente forma:

$$W_i = 3,143 \times 10^{-3} + 6,90 \times 10^{-6} \cdot \sum_{j=1}^i F_{aj} \cdot L_j$$

$$F_{ai} = a_p \left[\frac{F^{0,7612}}{V_c^{1,0202} \cdot W_{i-1}^{0,2549}} \right]$$

7.5.6.2.2 Material “Carbono”

En el caso del carbono, se han realizado 8 barridas en 4 probetas exactamente iguales, lo que conlleva 2 barridas por probeta. Tras los barridos no se aprecia ninguna incidencia destacable. Al igual que en el caso del macizado, las fuerzas medidas por la mesa Kistler se filtran y se colocan en la hoja de Excel. El volumen de desgaste obtenido también se organiza en otra hoja Excel de forma que sea más fácil en análisis de los datos.

Debido a que el valor de W_0 para la herramienta WNT ya se ha calculado para el caso del macizado, no es necesario recalcularla. Sin embargo la velocidad de desgaste de la herramienta no es la misma puesto que ahora se mecaniza otro material, se calcula por tanto A_0 . Después de este cálculo se introduce en el software Lumiere la fórmula de la ley de corte y se calculan los coeficientes.

En el caso de este experimento, la modelización no presenta problemas en cuanto a los coeficientes y se ha podido realizar el modelizado con todos los coeficientes.

Por un lado la ley de desgaste:

$$W_i = W_o + A_o \cdot \sum_{j=1}^i F_{aj} \cdot L_j$$

Y las variables calculadas correspondientes son:

- $W_o = 3,143 \times 10^{-3}$
- $A_o = 1,069 \times 10^{-5}$

Por otro lado, la ley de corte tiene la siguiente forma:

$$F_{ai} = K_S \cdot a_e^{a1} \cdot F^{a2} \cdot V_c^{a3} \cdot W_{i-1}^{a4}$$

Y los coeficientes calculados con la confianza y el riesgo correspondiente se pueden observar en la tabla 16.

Coeficientes	Valor	Confianza (%)	Riesgo (%)
K_S	0,1674	98,98	1,02
$a1$	-2,0031	99,72	0,28
$a2$	3,8928	99,37	0,63
$a3$	-2,1675	99,19	0,81
$a4$	-4,8236	99,26	0,74

Tabla 16: Coeficientes carbono WNT

Una vez calculados los coeficientes hay que comprobar si son o no válidos. En la misma tabla se comprueba que la confianza y el riesgo de los 5 coeficientes están dentro de los valores permitidos. No obstante, para comprobar la validez de este modelo es necesario mirar los coeficientes de regresión y de Fisher.

Coefficiente de regresión = 0,9834

Coefficiente de Fisher = 22,16

Se comprueba que dichos valores cumplen los rangos establecidos para estos aspectos estadísticos. El coeficiente de regresión se acerca mucho a la unidad y el coeficiente de Fisher, es un valor grande. Además se comprueba en el gráfico de la desviación que el error sigue una distribución normal, esto puede observarse en los anexos.

Una vez dadas por validas las leyes modelizadas de corte y desgaste y teniendo en cuenta los variables calculadas y estos coeficientes, estas quedan de la siguiente forma:

$$W_i = 3,143x 10^{-3} + 1,069 x 10^{-5} \cdot \sum_{j=1}^i F_{aj} \cdot L_j$$

$$F_{ai} = \frac{0,1674 \cdot F^{3,8928}}{a_e^{2,0031} \cdot V_c^{2,1675} \cdot W_{i-1}^{4,8236}}$$

7.5.6.3 Herramienta “KENDU”

7.5.6.3.1 Material “Macizado”

Tal y como se describe en el diseño de ensayos, la fresa WNT ha realizado 16 barridas sobre la probeta de macizado. Durante este experimento han ocurrido dos sucesos no esperados y que han modificado los resultados de forma razonable. En primer lugar, en el material existía una maña infiltración de la resina, por tanto, durante el mecanizado, la herramienta ha obtenido valores que no se corresponden con valores de mecanizado del macizado. Además de esto, realizando el sexto barrido la herramienta Kendu se ha partido por su zona del mango, la cual estaba en voladizo sobre el portaherramientas. Debido a que todavía quedaba parte del mango, suficientemente largo como para agarrar la pieza, se ha proseguido con el experimento. En los datos no se observan variaciones del antes y del después de la rotura de la herramienta.

Las fuerzas medidas por la mesa Kistler se filtran y se organizan en una tabla Excel, y los desgastes observados tras la medición de volúmenes se colocan en otra tabla Excel.

En primer lugar y mediante la ley de desgaste se calculan los valores de W_0 y de A_0 , correspondientes con el desgaste inicial de la herramienta y la velocidad de desgaste de la misma. En segundo lugar se introducen en el software Lumiere la fórmula de la ley de corte y se calculan los coeficientes.

En el caso de este experimento, la modelización presentan problemas tanto en la constante como en el coeficiente de profundidad de pasada radial, su presencia en el modelo provoca que la confianza de los demás coeficientes sea menor. Por lo tanto se estudia el modelo sin tener en cuenta esos parámetros que lo único que hacen es entorpecer la modelización. Los resultados de dichos análisis son los siguientes.

Por un lado la ley de desgaste:

$$W_i = W_0 + A_0 \cdot \sum_{j=1}^i F_{a_j} \cdot L_j$$

Y las variables calculadas correspondientes son:

- $W_0 = 7,229 \times 10^{-4}$
- $A_0 = 1,648 \times 10^{-6}$

Por otro lado, la ley de corte:

$$\frac{F_{ai}}{a_p} = F^{a1} \cdot V_c^{a2} \cdot W_{i-1}^{a3}$$

Y los coeficientes calculados con la confianza y el riesgo correspondiente se pueden observar en la tabla 17.

Coeficientes	Valor	Confianza (%)	Riesgo (%)
$a1$	0,5536	89,27	10,73
$a2$	-1,2567	98,61	1,39
$a3$	-0,5533	87,67	12,93

Tabla 17: Coeficientes macizado Kendu

Una vez calculados los coeficientes hay que comprobar si son o no válidos. Dado que es un experimento en el que han ocurrido sucesos que no se podían predecir e inesperados, se dan por válidos dichos coeficientes. Por tanto se miran ahora los coeficientes de regresión y de Fisher.

Coefficiente de regresión = 0,847

Coefficiente de Fisher = 11,0102

Se observa que los valores de los coeficientes no son todo lo buenos que deberían. El coeficiente de regresión está lejos de la unidad y el coeficiente de Fisher es bastante bajo. A pesar de ello, se acepta el modelo debido a que estas irregularidades son propias de los incidentes que han ocurrido durante este experimento. En el gráfico de desviación del error se observa como este sigue una distribución normal, esto se puede comprobar en los anexos.

Una vez dadas por validas las leyes modelizadas de corte y desgaste y teniendo en cuenta los variables calculadas y estos coeficientes, estas quedan de la siguiente forma:

$$W_i = 7,229 \times 10^{-4} + 1,648 \times 10^{-6} \cdot \sum_{j=1}^i F_{aj} \cdot L_j$$

$$F_{ai} = a_p \left[\frac{F^{0,5536}}{V_c^{1,2567} \cdot W_{i-1}^{0,5533}} \right]$$

7.5.6.3.2 Material “Carbono”

En el caso del carbono, se han realizado 8 barridas en 4 probetas exactamente iguales, lo que conlleva 2 barridas por probeta. Tras los barridos no se aprecia ninguna incidencia destacable. Las fuerzas medidas por la mesa Kistler se filtran y se colocan en la hoja de Excel. El volumen de desgaste obtenido también se organiza en otra hoja Excel de forma que sea más fácil en análisis de los datos.

Debido a que el valor de W_0 para la herramienta Kendu ya se ha calculado para el caso del macizado, no es necesario recalcularla. Sin embargo la velocidad de desgaste de la herramienta no es la misma puesto que ahora se mecaniza otro

material, se calcula por tanto A_o . Después de este cálculo se introduce en el software Lumiere la fórmula de la ley de corte y se calculan los coeficientes.

En el caso de este experimento, la modelización presenta problemas en la constante y en el coeficiente de desgaste. La presencia de estos coeficientes en el modelo provoca que la confianza de los demás coeficientes sea menor. Por lo tanto se estudia el modelo sin tener en cuenta esos parámetros que lo único que hacen es entorpecer la modelización. Los resultados de dichos análisis son los siguientes.

Por un lado la ley de desgaste:

$$W_i = W_o + A_o \cdot \sum_{j=1}^i F_{aj} \cdot L_j$$

Y las variables calculadas correspondientes son:

- $W_o = 3,143 \times 10^{-3}$
- $A_o = 9,25 \times 10^{-6}$

Por otro lado, la ley de corte tiene la siguiente forma:

$$F_{ai} = a_e^{a1} \cdot F^{a2} \cdot V_c^{a3}$$

Y los coeficientes calculados con la confianza y el riesgo correspondiente se pueden observar en la tabla 18.

Coeficientes	Valor	Confianza (%)	Riesgo (%)
$a1$	2,5839	99,74	0,26
$a2$	1,2923	99,13	0,87
$a3$	-1,7384	99,50	0,50

Tabla 18: Coeficientes carbono Kendu

Una vez calculados los coeficientes hay que comprobar si son o no válidos. En la misma tabla se comprueba que la confianza y el riesgo de los 3 coeficientes están dentro de los valores permitidos. No obstante, para comprobar la validez de este modelo es necesario mirar los coeficientes de regresión y de Fisher.

Coeficiente de regresión = 0,9945

Coeficiente de Fisher = 151,008

Se comprueba que dichos valores cumplen los rangos establecidos para estos aspectos estadísticos. El coeficiente de regresión se acerca mucho a la unidad y el coeficiente de Fisher, es un valor grande. Además se observa en el gráfico de la desviación que el error sigue una distribución normal, esto puede observarse en los anexos.

Una vez dadas por validas las leyes modelizadas de corte y desgaste y teniendo en cuenta los variables calculadas y estos coeficientes, estas quedan de la siguiente forma:

$$W_i = 7,229 \times 10^{-4} + 9,25 \times 10^{-6} \cdot \sum_{j=1}^i F_{aj} \cdot L_j$$

$$F_{ai} = \frac{a_e^{2,5839} \cdot F^{1,2923}}{V_c^{1,7384}}$$

Cabe destacar que este último caso es el más inusual de todos, dado que en la formula de la ley de corte, la fuerza no depende del desgaste. Esto es debido a que la herramienta no ha sufrido el suficiente desgaste, y serían necesarios más experimentos.

Los datos relacionados con las temperaturas a la que estaban sometidos los materiales en la operación de mecanizado no han llegado a tiempo, es por ello por lo que en este informe no se pueden analizar los resultados teniendo en cuenta las temperaturas. Queda pendiente para futuros informes poder complementar estos resultados con los correspondientes a las temperaturas.

8. DESCRIPCIÓN DE TAREAS Y GANTT

En este apartado se realiza la descripción de las tareas explicando brevemente en que consisten. Dichas tareas son reflejadas posteriormente en un diagrama Gantt que ayuda durante el proyecto a una correcta planificación del trabajo.

8.1 Descripción de tareas

- Tarea 1: Adquisición de información.
 - Descripción: Esta tarea consiste en la recopilación de información sobre la automatización de procesos de mecanizado de materiales compuestos en el sector aeronáutico. Además se obtiene información de los materiales compuestos a mecanizar en el proyecto y de las herramientas óptimas para las operaciones.
 - Duración: 2 semanas hasta que se comienza con la siguiente tarea, y se prolonga hasta el final del proyecto.
 - Subtareas:
 - Recopilación de información
 - Redacción de apartados correspondientes
- Tarea 2: Análisis de alternativas
 - Descripción: Esta tarea consiste en describir, analizar y tomar una decisión sobre cual es la mejor alternativa de herramientas para el mecanizado de los tres materiales.
 - Duración: 2 semanas
 - Subtareas:
 - Búsqueda de herramientas adecuadas.
 - Análisis y ponderación de las alternativas
- Tarea 3: Preparación de ensayo de mecanizado

- Descripción: Esta tarea consiste en diseñar los ensayos en función de las condiciones del taller y de las herramientas y materiales seleccionados. Se toman decisiones que son plenamente relevantes para el ensayo de mecanizado final. Tarea que finaliza el día antes del ensayo en cuestión.
- Duración: 5 semanas
- Subtareas:
 - Diseño de experimentos
 - Montaje de probetas
- Tarea 4: Preparación de ensayo de calibración
 - Descripción: En esta tarea se seleccionan las herramientas y los materiales a usar para el ensayo de calibración de los sistemas de medición de esfuerzos. Tarea que finaliza el día antes del ensayo en cuestión
 - Duración: 1 semana.
- Hito 1: Ensayo de calibración
 - Descripción: Se realiza el ensayo de calibración previamente diseñado y planeado. Para este hito deben estar finalizadas todas las tareas previas excepto la tarea 4 que no es relevante para este hito.
 - Duración: 1 día
- Tarea 5: Análisis de ensayo de calibración
 - Descripción: En esta tarea se realiza el análisis de los datos obtenidos en el ensayo de calibración de los sistemas de esfuerzos. Se sacan conclusiones que son determinantes para la tarea de preparación del ensayo de calibración
 - Duración: 2 semanas

- Hito 2: Ensayo de mecanizado
 - Descripción: Se realiza el ensayo de mecanizado con los 3 materiales y los 3 tipos de herramientas. Para el comienzo de los ensayos todas las tareas previas deben de estar finalizadas.
 - Duración: 1 día

- Tarea 6: Análisis de ensayo de mecanizado
 - Descripción: En esta tarea se realiza el análisis de los datos obtenidos en el ensayo de mecanizado.
 - Duración: 5 semanas y media
 - Subtareas:
 - Análisis del desgaste
 - Análisis de los esfuerzos

- Tarea 7: Modelización de leyes de corte y desgaste
 - Descripción: En esta tarea se modeliza a partir del software Lumiere las leyes de corte y desgaste. Para el comienzo de esta tarea debe de estar finalizada la tarea correspondiente con el análisis del ensayo de mecanizado. Se obtienen los datos finales que se utilizan para sacar las conclusiones.
 - Duración: 3 semanas

- Tarea 8: Elaboración de documentos
 - Descripción: En esta última tarea se debe elaborar la memoria del proyecto de acuerdo a la normativa detallada por la ETSI. Para ello se realiza a parte de lo previamente detallado, un presupuesto aproximado de este proyecto así como las conclusiones y todos los demás apartados a los que se debe hacer referencia.
 - Duración: 2 semanas
 - Subtareas:
 - Redacción de la memoria

- Realización de correcciones y comprobaciones

8.2 Diagrama Gantt

Nombre	Fecha de inicio	Fecha de fin
<ul style="list-style-type: none"> • Tarea 1: Adquisición de información 	20/05/19	25/09/19
<ul style="list-style-type: none"> • Sub-tarea 1.1: Recopilación de información 	20/05/19	3/06/19
<ul style="list-style-type: none"> • Subtarea 1.2: Redacción de apartados 	20/05/19	25/09/19
<ul style="list-style-type: none"> • Tarea 2: Análisis de alternativas 	4/06/19	17/06/19
<ul style="list-style-type: none"> • Sub-tarea 2.1: Búsqueda de herramientas 	4/06/19	10/06/19
<ul style="list-style-type: none"> • Sub-tarea 2.1: Ponderación de alternativas 	11/06/19	17/06/19
<ul style="list-style-type: none"> • Tarea 3: Preparación ensayo de mecanizado 	10/06/19	15/07/19
<ul style="list-style-type: none"> • Sub-tarea 3.1: Diseño de experimentos 	10/06/19	28/06/19
<ul style="list-style-type: none"> • Sub-tarea 3.2: Montaje de probetas 	1/07/19	15/07/19
<ul style="list-style-type: none"> • Tarea 4: Preparación ensayo de calibración 	17/06/19	24/06/19
<ul style="list-style-type: none"> • Hito 1: Ensayo de calibración 	25/06/19	25/06/19
<ul style="list-style-type: none"> • Tarea 5: Análisis de ensayo de calibración 	25/06/19	8/07/19
<ul style="list-style-type: none"> • Hito 2: Ensayo de mecanizado 	16/07/19	16/07/19
<ul style="list-style-type: none"> • Tarea 6: Análisis ensayo de mecanizado 	16/07/19	19/08/19
<ul style="list-style-type: none"> • Sub-tarea 6.1: Análisis del desgaste 	16/07/19	1/08/19
<ul style="list-style-type: none"> • Sub-tarea 6.2: Análisis de esfuerzos 	2/08/19	19/08/19
<ul style="list-style-type: none"> • Tarea 7: Modelización de leyes 	26/08/19	13/09/19
<ul style="list-style-type: none"> • Tarea 8: Elaboración de documentos 	16/09/19	25/09/19
<ul style="list-style-type: none"> • Sub-tarea 8.1: Redacción de memoria 	16/09/19	20/09/19
<ul style="list-style-type: none"> • Sub-tarea 8.2: Correcciones y comprobaciones 	23/09/19	25/09/19

Ilustración 42; Tareas y fechas

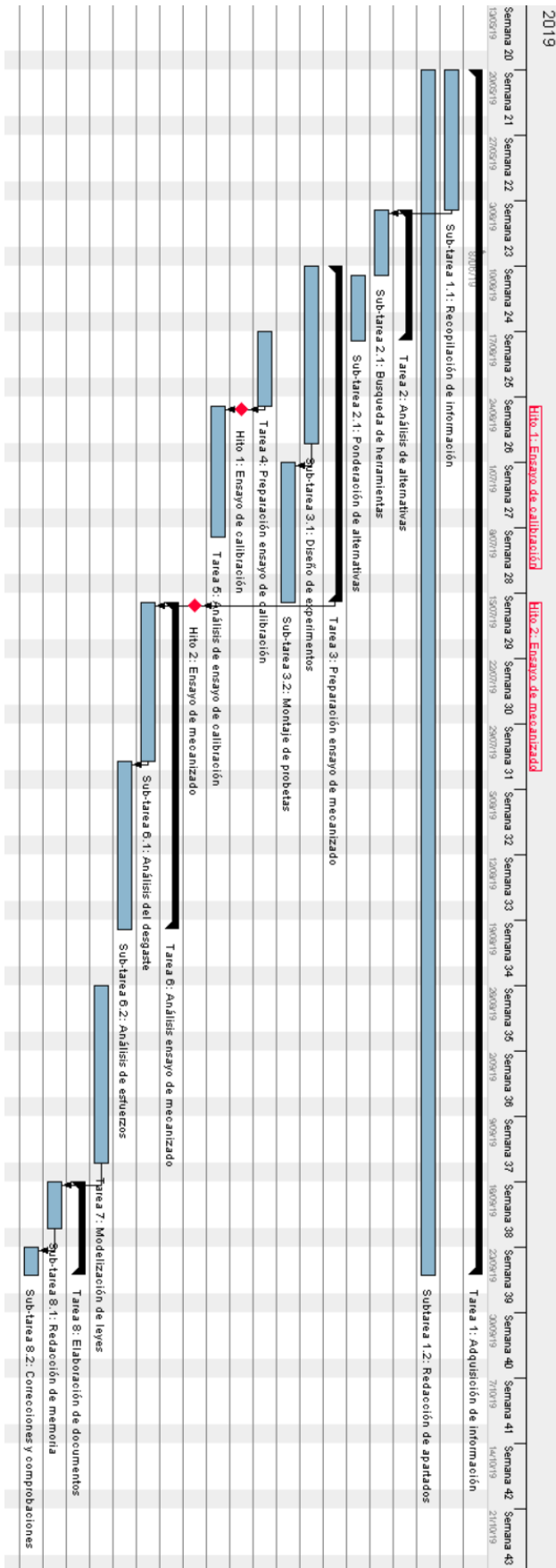


Ilustración 43: Diagrama Gantt

9. ASPECTOS ECONÓMICOS. PRESUPUESTO

9.1 Horas internas

- Ingeniero junior
 - Dedicación diaria: 4 horas
 - Número de días: 93 días
 - Coste horario: 40 €/hora
- Ingeniero técnico
 - Dedicación diaria: 10 horas
 - Número de días: 2 días
 - Coste horario: 50 €/hora
- Ingenieros superiores Tecnalía:
 - Dedicación diaria: 10 horas
 - Número de días: 2 días
 - Coste horario: 80 €/hora
- Ingeniero superior CTA:
 - Dedicación diaria: 10 horas
 - Número de días: 1 día
 - Coste horario: 80 €/hora
- Ingeniero superior UPV:
 - Dedicación diaria: 2 horas
 - Número de días: 93 días
 - Coste horario: 100 €/hora
- Operarios de máquina Tecnalía:
 - Dedicación diaria: 10 horas
 - Número de días: 2 días
 - Coste horario: 30 €/hora

Horas internas	Cantidad	Unidad	Nº unidades	Coste unitario (€/h)	Coste (€)
Ingeniero Junior	1	h	372	40	14.880,00 €
Ingeniero Técnico	1	h	20	50	1.000,00 €
Ingeniero Superior Tecnalia	2	h	20	80	1.600,00 €
Ingeniero superior CTA	1	h	10	80	800,00 €
Ingeniero superior UPV	1	h	186	100	18.600,00 €
Operario tecnalia	1	h	20	30	600,00 €
			SUBTOTAL		37.480,00 €
Tras aplicación de beca UPV a Ingeniero Junior (Coste = 1500€)			TOTAL		24.100,00 €

Tabla 19: Presupuesto horas internas

9.2 Amortizaciones

- PC
 - Coste: 1.500,00€
 - Periodo de amortización: 1,5 años (200 días/año)
 - Horas de trabajo diarias: 4 horas
 - Coste horario: 1,25€
 - Uso: 210 horas

- Licencia Lumiere
 - Coste: 12.000,00€
 - Periodo de amortización: 6 años (80 días/años)
 - Horas de trabajo diarias: 2 horas
 - Coste horario: 12,50€
 - Uso: 16 horas

- Licencia SigView
 - Coste: 8.000,00€
 - Periodo de amortización: 5 años (60 días/año)
 - Horas de trabajo diarias: 2 horas
 - Coste horario: 13,33€
 - Uso: 24 horas

Amortizaciones	Unidad	Nº unidades	Coste unitario	Coste
PC	h	210	1,25 €	262,50 €
Licencia Lumiere	h	16	12,50 €	200,00 €
Licencia Sigview	h	24	13,33 €	320,00 €
			TOTAL	782,50 €

Tabla 20: Presupuesto amortizaciones

9.3 Gastos

- Microscopio: 17,99€
- Herramientas
 - Coste unitario: 70,00€
 - Cantidad: 4
- Material de mecanizado
 - Macizado
 - Coste unitario: 16,00€
 - Unidades: 3
 - CFRP
 - Coste unitario: 2,35€
 - Unidades: 12
 - Núcleo
 - Coste unitario: 11,00€
 - Unidades; 12
- Viajes a Tecnalia
 - Gasolina Bilbao-Donosti
 - Precio de la gasolina (€/L): 1,4€/L
 - Consumo (L/100km): 7,5L/100km
 - Distancia por viaje (km): 106km
 - Peaje: 13,65€

Gastos	Nº unidades	Coste unitario	Coste
Microscopio	2	17,99 €	35,98 €
Herramienta Kendu	4	70,00 €	280,00 €
Materiales			
Macizado	3	16,00 €	48,00 €
Carbono	12	2,35 €	28,22 €
Honeycomb Nomex	12	11,00 €	132,00 €
Viajes			
Gasto gasolina Bilbao-Donosti	4	11,13 €	44,52 €
Gasto peaje Bilbao-Donosti	4	13,65 €	54,60 €
TOTAL			623,32 €

Tabla 21: Presupuesto gasto



9.4 Resumen del presupuesto

Concepto			
Horas internas		24.100,00 €	
Amortizaciones		782,50 €	
Gastos		623,32 €	
COSTES DIRECTOS			25.505,82 €
Indirectos	8%	2.040,47 €	
SUBTOTAL			27.546,29 €
Imprevistos	11%	3.030,09 €	
TOTAL			30.576,38 €

Tabla 22: Resumen presupuesto

10. CONCLUSIONES

Hoy en día, las operaciones de mecanizado de materiales compuestos son de vital importancia en la producción de aeroestructuras. Debido al uso de nuevos materiales, en especial a los de carácter compuesto, se desarrollan técnicas desde distintos enfoques. Una de las más innovadoras es la automatización de las operaciones de mecanizado. Para llevar a cabo esta automatización es necesario completar una serie de tareas y por tanto tomar unas decisiones y llegar a unas conclusiones.

Por tanto, en este apartado se plantean las decisiones y conclusiones finales posteriores al análisis de los resultados que se han obtenido en los ensayos. En primer lugar se sacan las conclusiones correspondientes al primer ensayo realizado, el ensayo de calibración. Una vez dicho ensayo es estudiado, las consecuencias repercuten al método de ensayo utilizado en el experimento de mecanizado, por tanto se exponen después las conclusiones obtenidas del ensayo final de las herramientas y materiales seleccionados.

10.1 Ensayo de calibración

Este ensayo consiste en mecanizar distintas placas de material compuesto, en este caso CFRP, con una fresa SGS. Se capturan las fuerzas de forma analítica con tres sistemas de medición de fuerzas diferentes. El fin principal es la transformación de las coordenadas de las fuerzas medidas por el sistema de medición correspondiente al portaherramientas Spyke de coordenadas polares a coordenadas cartesianas. Una vez hecha la transformación se comprueba si entre las fuerzas medidas por el Spyke y las fuerzas medidas por el sistema de la mesa Kistler existe una concordancia. En caso positivo, se calcula dicha concordancia. Es posible que el nexo entre fuerzas sea una constante o también es posible que la relación esté determinada mediante una ecuación. La relación existente permite que en el posterior ensayo de mecanizado, la fuerza se pueda obtener de dos fuentes diferentes y de tal forma tener datos más exactos si cabe. En el caso de que no exista ninguna relación el sistema que se utiliza en el ensayo final es la mesa Kistler. Una vez realizado el ensayo se pueden obtener las siguientes conclusiones.

- **Sistema Servoguide.** En cuanto al sistema de medición de fuerzas propio del centro de mecanizado CNC se observa en los resultados lo siguiente. Como ventaja cabe destacar que es el único sistema que proporciona datos del ángulo de posición de la herramienta. El inconveniente

principal es que las respuestas que captura este sistema tienen una frecuencia determinada y no se puede variar.

- **Sistema dinamómetro Kistler.** Las mediciones realizadas con la mesa Kistler proporcionan un archivo de fuerzas para cada experimento a una frecuencia de 1ms. Se realiza un filtrado de las fuerzas a partir del promedio de estas fuerzas, y para cada experimento se obtiene un valor. Los valores obtenidos son todos lógicos si son positivos. En los casos en los que el promedio es nulo o se aproxima a un valor nulo, se corrige con el valor de desplazamiento con respecto al eje de abscisas de estos valores.
- **Sistema portaherramientas Spyke.** En el caso del sistema portaherramientas Spyke, también se obtiene un archivo para cada experimento. La frecuencia de este sistema es variable y se pone también a 1ms. Los datos obtenidos están en coordenadas polares, por tanto, se diseña un sistema de transformación.

A la hora de calcular la transformación de coordenadas se necesita saber el ángulo de posición de la herramienta para cada valor de fuerza capturado por el sistema Spyke. El único sistema que representa el valor angular es el Servoguide, por lo tanto, se acoplan ambos sistemas. Aquí aparece el primer problema que presenta la calibración. Ambos sistemas están a diferentes frecuencias, por tanto no es tan fácil acoplar uno con el otro. La frecuencia del Servoguide es de 0,625ms y la frecuencia del portaherramientas Spyke es de 1ms. El segundo problema que se presenta en la calibración es que por método de observación es muy difícil obtener el primer valor de fuerza que se opone al avance ya que se poseen miles de valores para cada experimento. Es por ello por lo que acoplar los sistemas se complica mucho. Se concluye, por tanto, que el sistema de medición de fuerzas que se va a utilizar para los ensayos de mecanizado es el sistema dinamométrico mesa Kistler.

10.2 Ensayo de mecanizado

A partir de este ensayo se obtienen los resultados más relevantes del trabajo. El ensayo consiste en el mecanizado de 3 materiales diferentes con 3 herramientas diferentes. El fin principal es la obtención de los esfuerzos a los que se someten las fresas, y posteriormente medir el desgaste de estas para cada material. Después, a partir de los datos obtenidos realizar una modelización de las leyes de corte que permita comparar el comportamiento de las herramientas mecanizando los materiales, y concluir cual es la más óptima para cada uno de ellos. Tras los ensayos y después de analizar los resultados se pueden sacar las siguientes conclusiones.

10.2.1 Material Honeycomb

En el caso del material de núcleo de panal de abeja, el mecanizado se realizó en último lugar en el ensayo de mecanizado final. El ensayo está diseñado para mecanizar 4 probetas con cada herramienta. Previo al comienzo del experimento, se observa que el diámetro de las celdas del honeycomb es mayor que el diámetro de la herramienta, tal y como se observa en la figura 44. Por ese motivo se intuyó que el funcionamiento pudiera no ser bueno. En la realización de la primera barrida se obtiene la conclusión en cuanto al material y la herramienta.

Para medir las fuerzas que actúan en la herramienta en el mecanizado de honeycomb son necesarias herramientas cuyo diámetro de fresa sea mayor que el diámetro de la celda del panal de abeja. De lo contrario, la fresa recorre espacios de aire en el cual recantea ningún material y por tanto se obtienen valores de fuerzas nulas. En el caso del ensayo realizado, se mecanizó con la herramienta Tivoly y se llegó a dicha conclusión, debido a que el diámetro de las 3 herramientas era de 6mm, en este punto se dejó de mecanizar este material.



Ilustración 44: Honeycomb comparado con fresa

Es por ello por lo que para próximos ensayos se proponen nuevas fresas de diámetro mayor que sean capaces de mecanizar Honeycomb de forma adecuada. Las propuestas se pueden ver en el apartado correspondiente de los anexos del trabajo.

En cuanto a los dos materiales restantes en los ensayos no hubo ningún inconveniente como el comentado para el Honeycomb, es por ello por lo que ambos se estudian igual y se toman conclusiones de forma análoga para cada uno de los materiales. En fin principal es concluir que herramienta es la más óptima para el mecanizado de cada uno de los materiales, para llegar a esa decisión se diferentes aspectos como son el desgaste inicial y final, la magnitud de los esfuerzos durante los experimentos y la velocidad de desgaste de cada herramienta. Con la modelización realizada de las leyes de corte y de desgaste se comprueba la validez de los resultados obtenidos y se obtienen las conclusiones finales.

10.2.2 Material Macizado

El mecanizado de este material se completó con éxito con cada una de las herramientas, a pesar de que con la herramienta Kendu hubo algún que otro problema. Para ello comparamos en primer lugar el desgaste inicial y desgaste final de las herramientas antes y después de realizar las 16 barridas. El desgaste se mide en volumen por tanto las unidades son milímetros cúbicos. Además también se compara la velocidad de desgaste de cada una de las herramientas.

Herramienta	Desgaste inicial (Wo)	Desgaste final	Diferencia	Velocidad de desgaste (Ao)
Tivoly	$5,0094 \times 10^{-4}$	$7,604 \times 10^{-3}$	$7,103 \times 10^{-3}$	$8,02 \times 10^{-6}$
WNT	$3,143 \times 10^{-3}$	$7,076 \times 10^{-3}$	$3,933 \times 10^{-3}$	$6,90 \times 10^{-6}$
Kendu	$7,229 \times 10^{-4}$	$1,091 \times 10^{-3}$	$3,681 \times 10^{-4}$	$1,648 \times 10^{-6}$

Tabla 23: Comparación herramientas macizado

En la tabla 23. se observa que la herramienta con menor desgaste inicial es la herramienta Tivoly. La que más desgaste inicial tiene es la herramienta WNT y la herramienta Kendu tiene un desgaste inicial muy similar al de la fresa Tivoly, pero menor. En cuanto al desgaste final, en este caso existen diferencias más notables. La herramienta que menor desgaste final tiene es la herramienta Kendu, la herramienta que más se desgasta final tiene es la Tivoly y muy cerca está la herramienta WNT.

A pesar de dichos valores, la comparación a de realizarse mirando la columna correspondiente a la diferencia en la tabla 23. Es la diferencia entre el desgaste final y el inicial el parámetro que indica cuál es la herramienta que menos se desgasta durante el mecanizado. En este caso la herramienta Kendu es la que menos volumen de diente ha perdido y por tanto la más resistente al desgaste por abrasión de sus dientes mecanizando el macizado. Seguida de la Kendu se

posiciona la herramienta WNT, y por último la herramienta que mayor desgaste sufre es la Tivoly. Estos resultados han de corroborarse con la velocidad de desgaste calculada para cada herramienta. Se observa como coincide que la herramienta con menor desgaste también tiene una velocidad de desgaste menor. Esta relación puede observarse en la figura 45., en la cual de forma gráfica se representa la evolución del desgaste de cada herramienta con el paso de las barridas. Se concluye que la herramienta que menor desgaste sufre en el caso de las operaciones de mecanizado con material de macizado es la herramienta Kendu, y la que más desgaste sufre es la herramienta Tivoly.

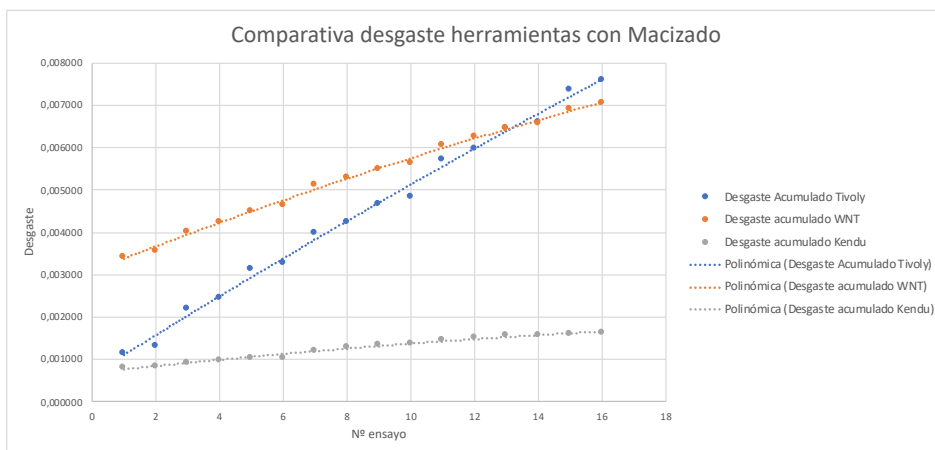


Ilustración 45: Comparación gráfica del desgaste de las herramientas

Además del desgaste, cabe destacar que se pueden analizar el valor de la fuerza de avance que sufre cada herramienta con el transcurso de las barridas. Como se puede observar en la figura 46. la herramienta que mayores esfuerzos sufre coincide con la herramienta que mayor volumen de diente pierde. Y la herramienta que proporciona valores esfuerzo menores es la que menos desgaste sufre. Por lo tanto, los resultados obtenidos de medición de esfuerzos y medición de desgaste son lógicos.

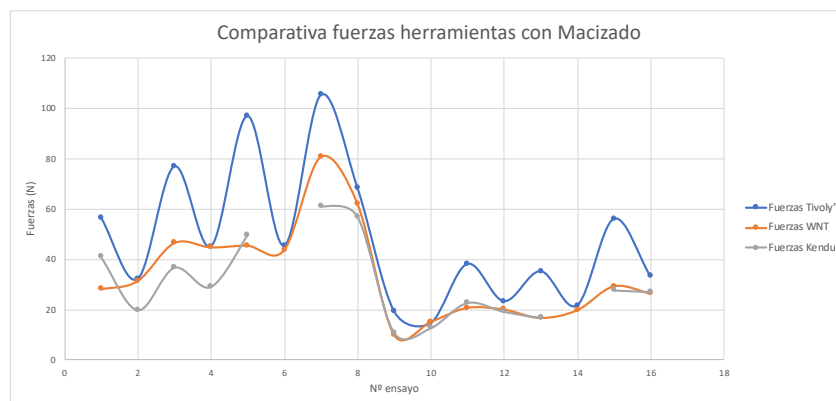


Ilustración 46: Comparación gráfica de las fuerzas

Una vez estudiados los esfuerzos medidos y el desgaste observado por separado, es necesario comprobar si existe una relación real entre la fuerza y el desgaste, que dependa de los parámetros de corte que se han variado en cada ensayo. Esta comprobación es la que da validez a los resultados previamente obtenidos. Para realizarla se calculan las leyes de corte de cada una de las herramientas por una regresión múltiple, aquella ley de corte que presente problemas o no relacione de forma correcta la fuerza con el desgaste mediante los parámetros será menos válida que aquella la cual no presente ningún problema.

Se resumen las leyes de corte con sus respectivos parámetros de validez en la tabla 24. Los parámetros son el coeficiente de regresión que indica cuanto de buena es la regresión. El coeficiente de Fisher el cual indica según su magnitud, la confianza que tiene dicho modelo y la comprobación de si el residuo de comparar la fuerza medida y la calculada sigue una distribución normal o no.

Herramienta	Ley de corte	Coefficiente de regresión	Coefficiente de Fisher	¿Distribución normal?
Tivoly	$F_{ai} = a_p \left[\frac{0,1414 \cdot a_e^{0,6959} \cdot F^{0,9478}}{V_c^{0,8442} \cdot W_{i-1}^{0,0964}} \right]$	0,9788	59,62	Sí
WNT	$F_{ai} = a_p \left[\frac{F^{0,7612}}{V_c^{1,0202} \cdot W_{i-1}^{0,2549}} \right]$	0,99008	214,3	Sí
Kendu	$F_{ai} = a_p \left[\frac{F^{0,5536}}{V_c^{1,2567} \cdot W_{i-1}^{0,5533}} \right]$	0,847	11,0102	Sí

Tabla 24: Resumen leyes de corte para macizado

Por un lado, tal y como se puede observar en el resumen de la tabla 47. el modelizado que más seguridad aporta es el modelizado de la herramienta WNT, ya que posee un valor muy cercano a la unidad del coeficiente de regresión y un coeficiente de Fisher muy alto, por lo tanto la confianza en dicho modelo es muy buena. Por otro lado el modelizado de la herramienta Kendu posee un valor muy bajo de coeficiente de Fisher lo que indica una confianza baja, y el coeficiente de regresión no está dentro de los límites aceptables. Sin embargo, los residuos de las tres modelizaciones siguen una distribución normal, tal y como se puede observar en los anexos correspondientes.

La herramienta Tivoly obtiene un modelo válido en cuanto al coeficiente de regresión y el coeficiente Fisher. Por tanto, la relación entre fuerza y desgaste sigue la ley que se muestra en la tabla. Se observa que la relación existente entre la fuerza y el desgaste es inversamente proporcional. Este problema puede ser ocasionado por el número reducido de barridas realizadas, que no han permitido que la herramienta se desgaste lo suficiente. Aun así, el coeficiente que está en el exponente del desgaste en la ley de corte, es el más cercano a ser un valor positivo de los tres, por tanto, es el modelo que más cerca está de mostrar una relación proporcional entre desgaste y fuerza.

La mala modelización de la herramienta Kendu es lógica. Tal y como ya se ha comentado, la probeta de macizado que se utilizó durante los ensayos no tenía la resina bien infiltrada en las celdas del refuerzo de panel de abeja Nomex. Por tanto, se deduce que los desgastes tan pequeños que se han obtenido con esta herramienta pueden ser datos engañosos, y se concluye que se debe repetir el ensayo con esta herramienta para poder así medir bien el desgaste y los esfuerzos sufridos.

La herramienta WNT tiene la mejor modelización de ley de corte, pero a pesar de ello, la relación que existe entre la fuerza de avance y el desgaste es inversamente proporcional. Este suceso no es para nada lógico, ya que ante mayores esfuerzos, mayor debe de ser el desgaste. Este fenómeno ocurre en la modelización de las 3 herramientas, el motivo principal es por que no se han realizado el suficiente número de ensayos como para desgastar la herramienta suficiente y obtener una ley de corte que defina dicho comportamiento.

Adicionalmente, la herramienta Kendu, queda descartada de esta decisión por los problemas con la probeta. Sin embargo, el buen comportamiento y el pequeño desgaste que presenta indica que puede llegar a ser una herramienta muy adecuada si se realiza la operación de mecanizado en condiciones normales.

Teniendo en cuenta todo lo comentado anteriormente se concluye que la herramienta que mejor resultados ha dado a la hora de realizar las operaciones de mecanizado en el material de macizado es la herramienta WNT, a pesar de ello, para el cálculo correcto de las leyes de corte es necesario realizar más ensayos con los cuales se obtengan más datos que permitan el cálculo correcto en la modelización.

10.2.2 Material Carbono CFRP

El mecanizado del material CFRP se completó con éxito con cada una de las herramientas, a pesar de que con la herramienta Kendu hubo algún que otro problema. Para ello comparamos en primer lugar el desgaste inicial y desgaste final de las herramientas antes y después de realizar las 8 barridas. El desgaste se mide en volumen por tanto las unidades son milímetros cúbicos. Además también se compara la velocidad de desgaste de cada una de las herramientas.

Herramienta	Desgaste inicial (Wo)	Desgaste final	Diferencia	Velocidad de desgaste (Ao)
Tivoly	$5,0094 \times 10^{-4}$	$8,255 \times 10^{-3}$	$7,754 \times 10^{-3}$	$4,969 \times 10^{-5}$
WNT	$3,143 \times 10^{-3}$	$7,104 \times 10^{-3}$	$3,961 \times 10^{-3}$	$1,069 \times 10^{-5}$
Kendu	$7,229 \times 10^{-4}$	$3,422 \times 10^{-3}$	$2,699 \times 10^{-3}$	$9,25 \times 10^{-6}$

Tabla 25: Comparación herramientas ante Carbono

En la tabla 48. se observa que la herramienta con menor desgaste inicial es la herramienta Tivoly. La que más desgaste inicial tiene es la herramienta WNT y la herramienta Kendu tiene un desgaste inicial muy similar al de la fresa Tivoly, pero menor. Los desgastes iniciales de las herramientas son iguales que en el caso del material de macizado, ya que la herramienta es la misma. En cuanto al desgaste final, en este caso existen diferencias más notables. La herramienta que menor desgaste final tiene es la herramienta Kendu, la herramienta que más se desgasta final tiene es la Tivoly y muy cerca está la herramienta WNT.

A pesar de dichos valores, la comparación a de realizarse mirando la columna correspondiente a la diferencia en la tabla . Es la diferencia entre el desgaste final y el inicial el parámetro que indica cuál es la herramienta que menos se desgasta durante el mecanizado. En este caso la herramienta Kendu es la que menos volumen de diente ha perdido y por tanto la más resistente al desgaste por abrasión de sus dientes mecanizando el macizado. Seguida de la Kendu se posiciona la herramienta WNT, y por último la herramienta que mayor desgaste sufre es la Tivoly. Estos resultados han de corroborarse con la velocidad de desgaste calculada para cada herramienta. Se observa como coincide que la herramienta con menor desgaste también tiene una velocidad de desgaste menor. Esta relación puede observarse en la figura 49., en la cual de forma gráfica se representa la evolución del desgaste de cada herramienta con el paso de las barridas. Se concluye que la herramienta que menor desgaste sufre en el caso de las operaciones de mecanizado con material de macizado es la herramienta Kendu, y la que más desgaste sufre es la herramienta Tivoly.

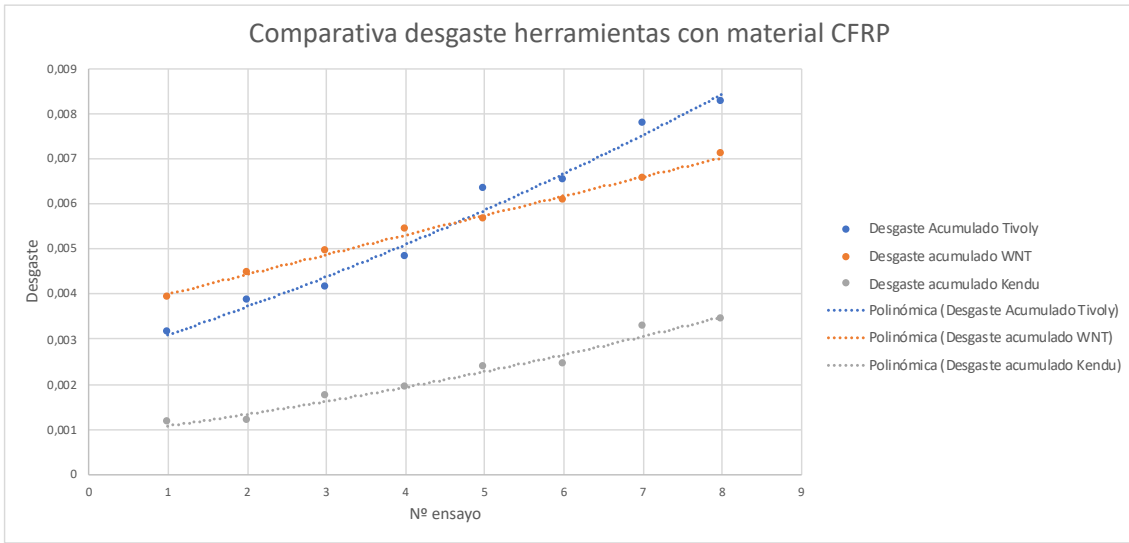


Ilustración 47: Comparativa gráfica desgaste herramientas

Además del desgaste, cabe destacar que se pueden analizar el valor de la fuerza de avance que sufre cada herramienta con el transcurso de las barridas. Como se puede observar en la figura 50 . la herramienta que mayores esfuerzos sufre no coincide con la herramienta que mayor volumen de diente pierde. Y la herramienta que proporciona valores esfuerzo menores tampoco es la que menos desgaste sufre. Por lo tanto, los resultados obtenidos de medición de esfuerzos y medición de desgaste no son lo lógicos que deberían.

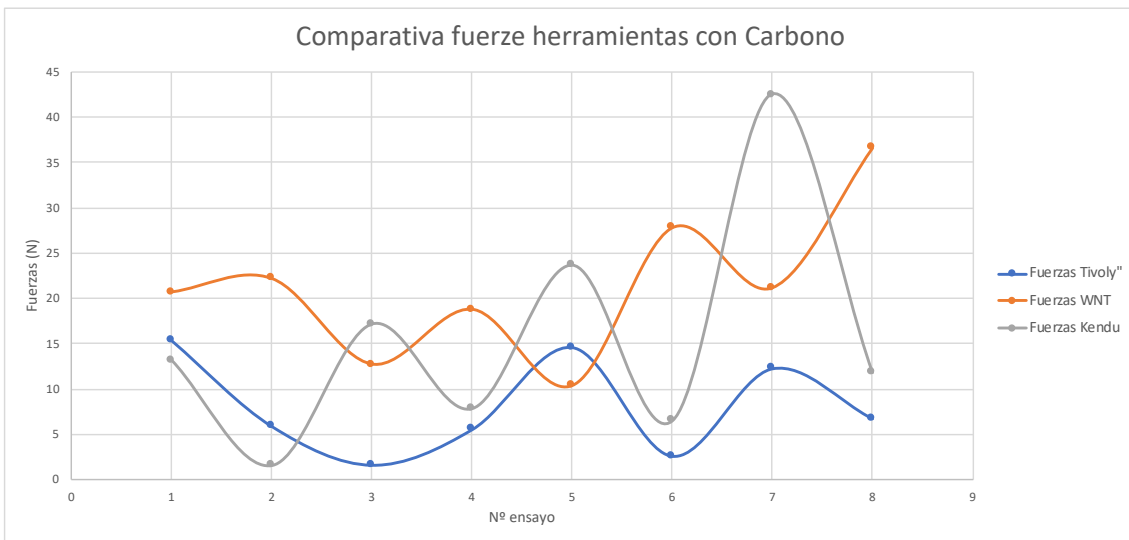


Ilustración 48: Comparativa gráfica fuerza herramientas

Una vez estudiados los esfuerzos medidos y el desgaste observado por separado, es necesario comprobar si existe una relación real entre la fuerza y el desgaste, que dependa de los parámetros de corte que se han variado en cada ensayo. Esta comprobación es la que da validez a los resultados previamente obtenidos. Para realizarla se calculan las leyes de corte de cada una de las herramientas por una regresión múltiple, aquella ley de corte que presente problemas o no relacione de forma correcta la fuerza con el desgaste mediante los parámetros será menos válida que aquella la cual no presente ningún problema.

Se resumen las leyes de corte con sus respectivos parámetros de validez en la tabla 26. Los parámetros son el coeficiente de regresión que indica cuanto de buena es la regresión. El coeficiente de Fisher el cual indica según su magnitud, la confianza que tiene dicho modelo y la comprobación de si el residuo de comparar la fuerza medida y la calculada sigue una distribución normal o no.

Herramienta	Ley de corte	Coefficiente de regresión	Coefficiente de Fisher	¿Distribución normal?
Tivoly	$F_{ai} = -1,9490 \cdot a_e + 0,1157 \cdot F - 6142,5 \cdot W_{i-1} - 0,0002 \cdot F \cdot V_c$	0,9788	22,84	Sí
WNT	$F_{ai} = \frac{0,1674 \cdot F^{3,8928}}{a_e^{2,0031} \cdot V_c^{2,1675} \cdot W_{i-1}^{4,8236}}$	0,9834	22,16	Sí
Kendu	$F_{ai} = \frac{a_e^{2,5839} \cdot F^{1,2923}}{V_c^{1,7384}}$	0,9945	151,003	Sí

Tabla 26: Resumen leyes de corte carbono

Por un lado, tal y como se puede observar en el resumen de la tabla 26. el modelizado que más seguridad aporta es el modelizado de la herramienta Kendu, ya que posee un valor muy cercano a la unidad del coeficiente de regresión y un coeficiente de Fisher muy alto, por lo tanto la confianza en dicho modelo es muy buena. Por otro lado, el modelizado de las herramientas Tivoly y WNT posee un valor de coeficiente de regresión que están cerca de la unidad, los coeficiente de Fisher son ambos muy similares y aportan una confianza alta-media. Adicionalmente, los residuos de las tres modelizaciones siguen una

distribución normal, tal y como se puede observar en los anexos correspondientes.

Se puede observar que la relación que existe entre la fuerza de avance y el desgaste es inversamente proporcional. Este suceso no es para nada lógico, ya que ante mayores esfuerzos, mayor debe de ser el desgaste. Este fenómeno ocurre en la modelización de las 3 herramientas, el motivo principal es por que no se han realizado el suficiente número de ensayos como para desgastar la herramienta suficiente y obtener una ley de corte que defina dicho comportamiento.

La herramienta Tivoly obtiene un modelo válido en cuanto al coeficiente de regresión y el coeficiente Fisher. Cabe destacar que, después de haber probado muchos métodos de leyes de corte para el modelizado de esta herramienta en el software Lumiere, se ha tenido que optar por una ley en la cual los parámetros de corte se relacionan aritméticamente. Dicha relación se hace mediante sumas en vez de productos. Por tanto, la relación entre fuerza y desgaste sigue la ley que se muestra en la tabla. Se observa que la relación existente entre la fuerza y el desgaste es inversamente proporcional, ya que el coeficiente que multiplica al parámetro de desgaste es negativo. Este problema puede ser ocasionado por el número reducido de barridas realizadas, que no han permitido que la herramienta se desgaste lo suficiente.

En cuanto a la herramienta WNT, tiene un coeficiente de regresión cercano a la unidad, lo cual indica que el modelo es válido. Sin embargo, el coeficiente de Fisher no tiene un valor muy alto a pesar de que según los datos estadísticos, la confianza en dicho modelo está dentro de los márgenes de validez. Además el modelo incluye todos los parámetros de corte variables en el experimento, esto es un aspecto muy positivo para la modelización. Adicionalmente, la herramienta Tivoly, queda descartada de esta decisión porque la modelización es la menos exacta de las 3.

Teniendo en cuenta todo lo comentado anteriormente se concluye que la mejor herramienta, según la modelización es la Kendu. Sin embargo, el modelo de la ley de corte de dicha herramienta no presenta una relación entre la fuerza y el desgaste, esto es debido a que la fresa no ha sufrido el suficiente desgaste, y serían necesarios más experimentos. El modelizado y la ley de corte de la herramienta WNT es la más óptima según estos ensayos es por ello, por lo que se decide que la mejor opción es esta como herramienta para el mecanizado de CFRP.

Una vez analizadas las herramientas y sacadas las conclusiones de los ensayos, toda las decisiones se pueden resumir en lo siguiente.

- **Ensayo de calibración.** En cuanto al ensayo de calibración se concluye que para el ensayo de mecanizado se utilizará únicamente la mesa Kistler.

- **Material Honeycomb.** Tras la realización de los ensayos se concluye que para el mecanizado de núcleo Honeycomb, se deben analizar herramientas alternativas cuyo diámetro sea mayor que el diámetro de la celda del panal de abeja.

- **Material Macizado.** Tras los ensayos de mecanizado se concluye que la herramienta WNT es la más óptima para mecanizar el material compuesto de macizado.

- **Material Carbono.** Tras los ensayos e mecanizado se concluye que la herramienta WNT es la más óptima para mecanizar el material compuesto de CFRP.

El análisis de los datos de temperaturas recolectados por el CTA en los ensayos de mecanizado no han llegado a tiempo para ser analizado en este informe. Cabe destacar, por último, que es necesario realizar más ensayos para poder optimizar de forma correcta las leyes de corte y desgaste, dado que los pocos ensayos realizados no permiten llegar a unas conclusiones finales del trabajo. A pesar de ello, los resultados obtenidos con las herramientas WNT y Kendu son mejores que con la herramienta Tivoly, por lo tanto, esta tercera herramienta podría descartarse para los experimentos futuros.



Fuentes de información

[1] Franck Girot, diapositivas universidad de Cádiz curso 2012-2013 : “Simulación numérica del mecanizado de materiales compuestos y modelización del desgaste de las herramientas” (2012)

[2] Franck Girot, diapositivas universidad de Cádiz curso 2011-2012 : “Mecanizado de materiales compuestos de fibra de carbono, de vidrio o de aramida” (2011)

[3] Martin Meindlhumer, Konstantin Horejsi y Martin Schager “Manufacturing and Costs of Current Sandwich and Future Monolithic Designs of Spoilers” (2019)

[4] D. Iliescu, A. Fernandez, E. Gutiérrez-Orrantia, N. Lopez de Lacalle and F. Girot “Modeling and Tool Wear in Routing of CFRP” (2016)

[5] Mohamed Jaafar; “Étude expérimentale et simulation numérique de l’usinage des matériaux en nids d’abeilles: application au fraisage des structures Nomex® et Aluminium” (2019)

[6] Klocke, F., *Manufacturing Processes 1*, Springer, ISBN: 978-3-642-11978-1, 2011.

[7] Sheikh-Ahmad, J.Y., *Machining of Polymer Composites*, Springer, ISBN: 978-0-387-35539-9, 2009.

ANEXO I: Ensayo Calibración

En este apartado se adjuntan las imágenes correspondientes a las probetas que se utilizaron en el ensayo de calibración así como los sistemas de medición de fuerzas que se analizaban.

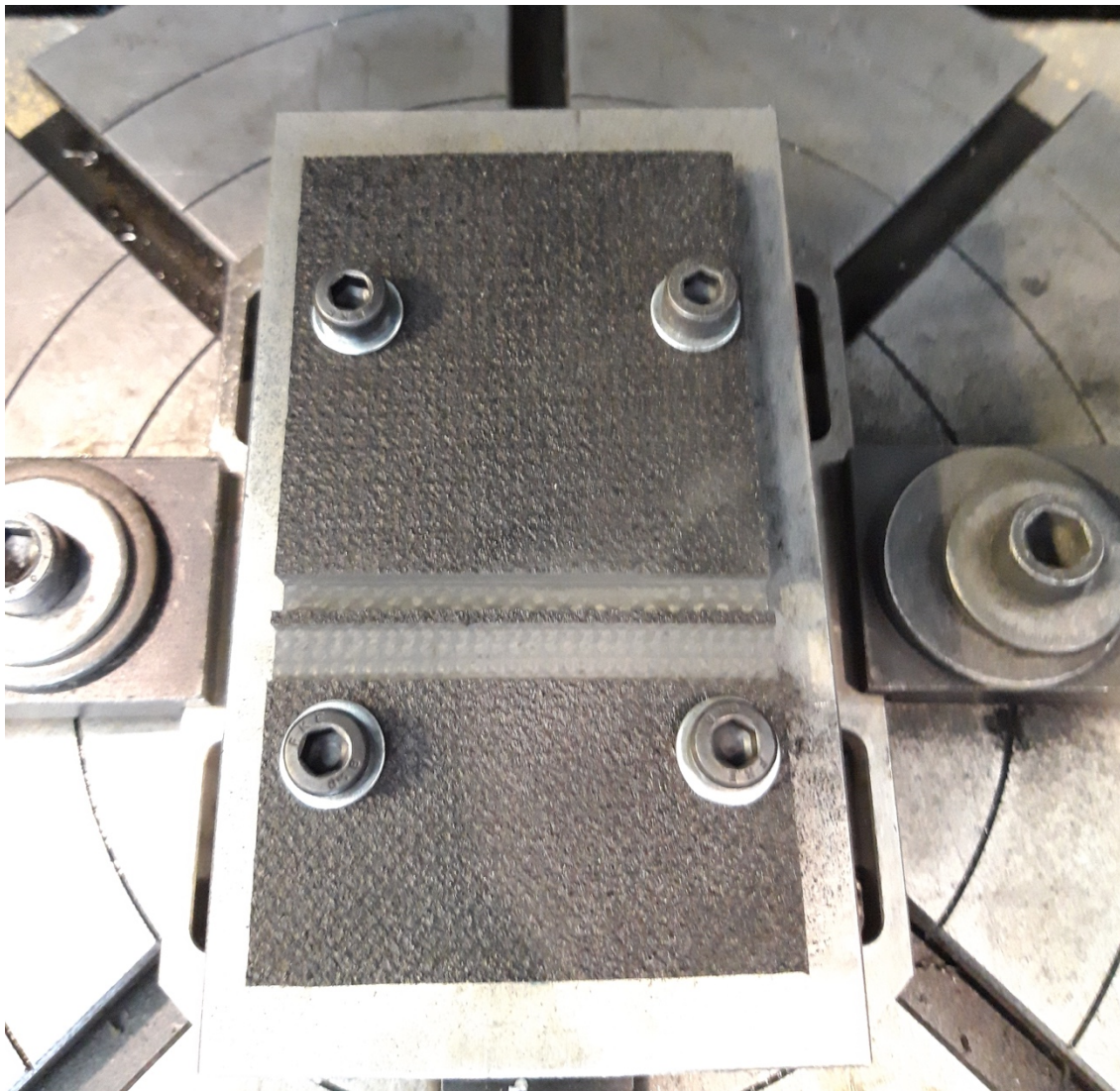


Ilustración 49: Probeta con ranurados realizados



Ilustración 50: Sistema completo. Probeta carbono, portaherramientas Spyke y mesa Kistler



Ilustración 51: Probeta tras el mecanizado.

ANEXO II: Ensayo de mecanizado

En este apartado se muestran las imágenes correspondientes al ensayo de mecanizado. Se adjuntan tanto las herramientas como los materiales antes y después de realizar las operaciones.



Ilustración 52: Herramienta Tivoly



Ilustración 53: Herramienta WNT



Ilustración 54: Herramienta Kendu



Ilustración 55: Probeta carbono previo mecanizado



Ilustración 56: Probeta de carbono posterior al mecanizado

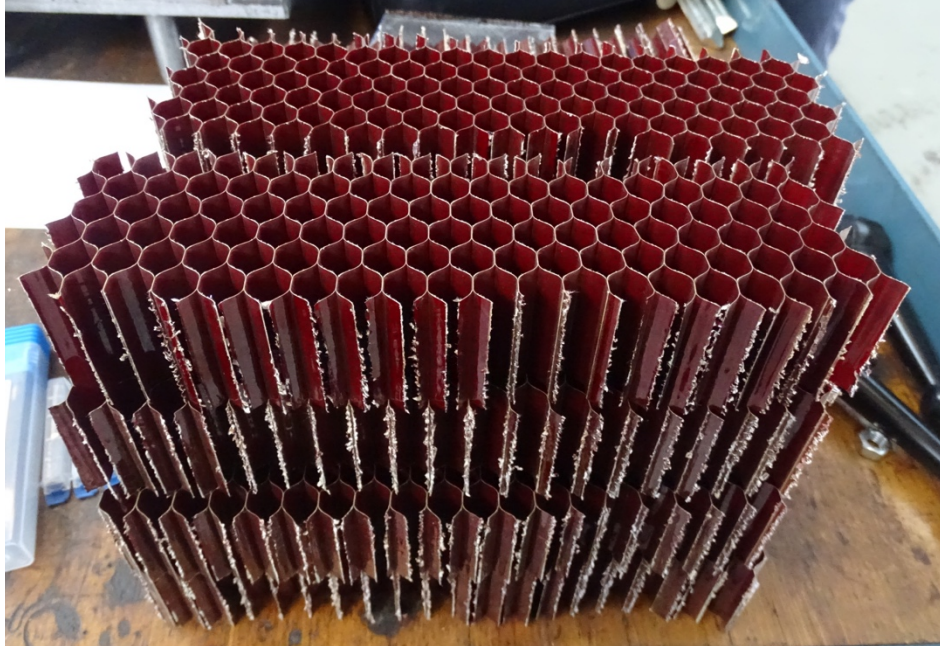


Ilustración 57: Probetas de Honeycomb previo al mecanizado



Ilustración 58: Probeta de honeycomb posterior al mecanizado



Ilustración 59: Probeta macizado durante el mecanizado

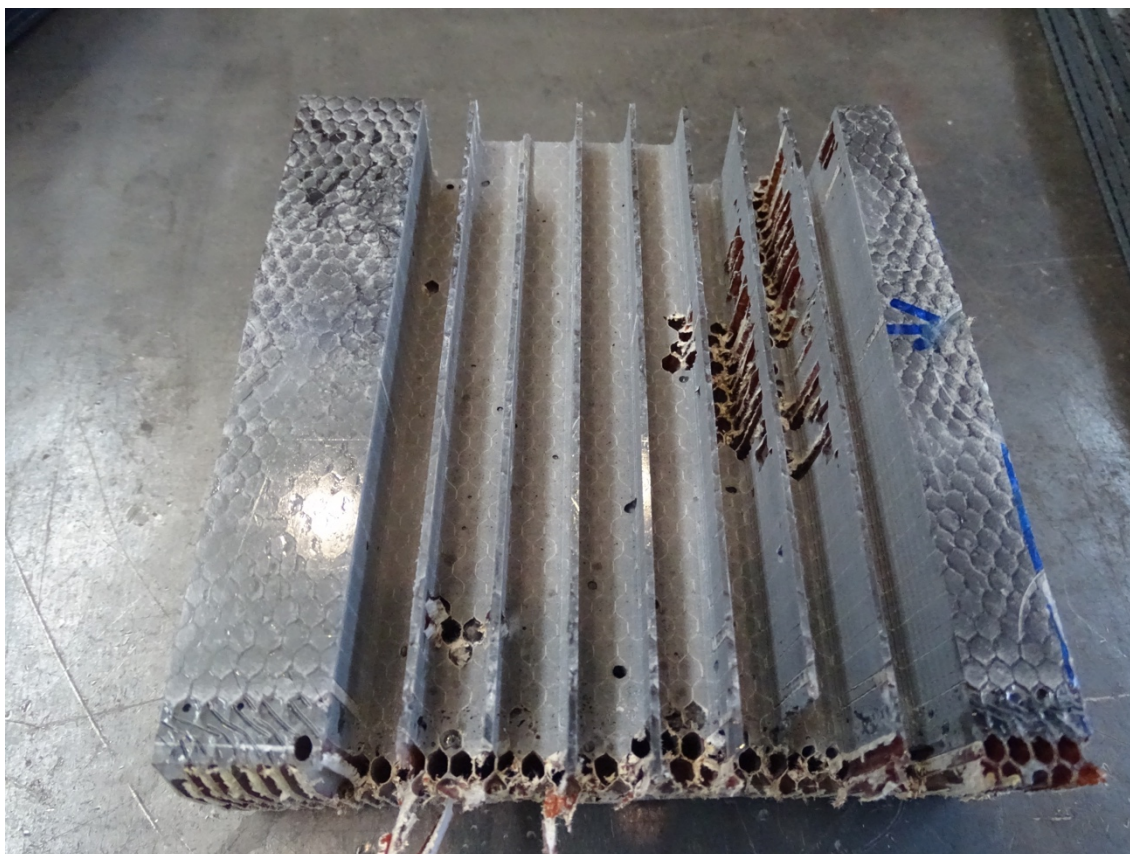


Ilustración 60: Probeta de macizado usada para KENDU en la que se observa la mala infiltración de la resina



Ilustración 61: Herramienta Kendu rota en la prueba de macizado

ANEXO III: Imágenes distribución normal de los modelos

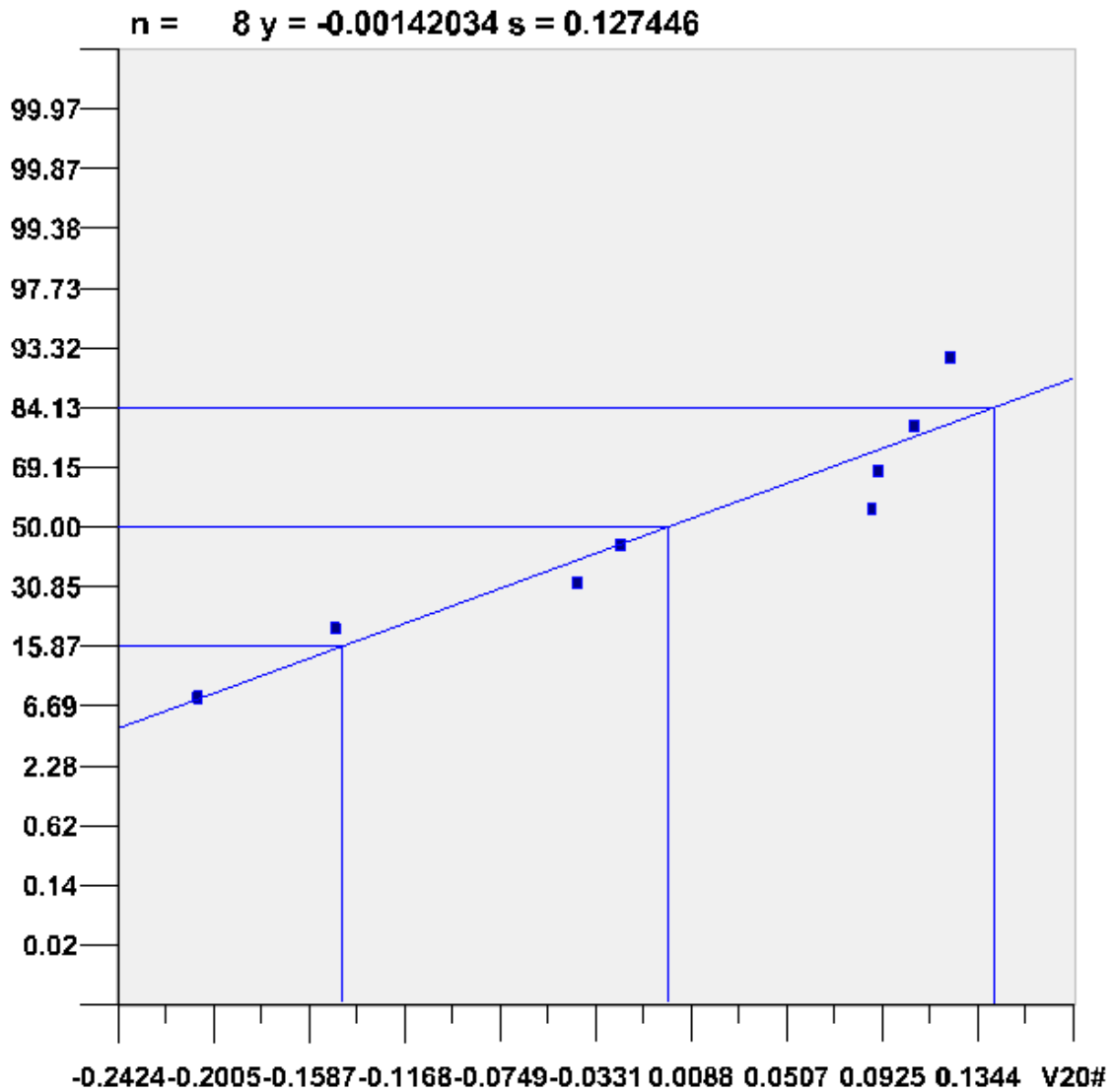


Ilustración 62: Distribución normal herramienta Kendu material Carbono

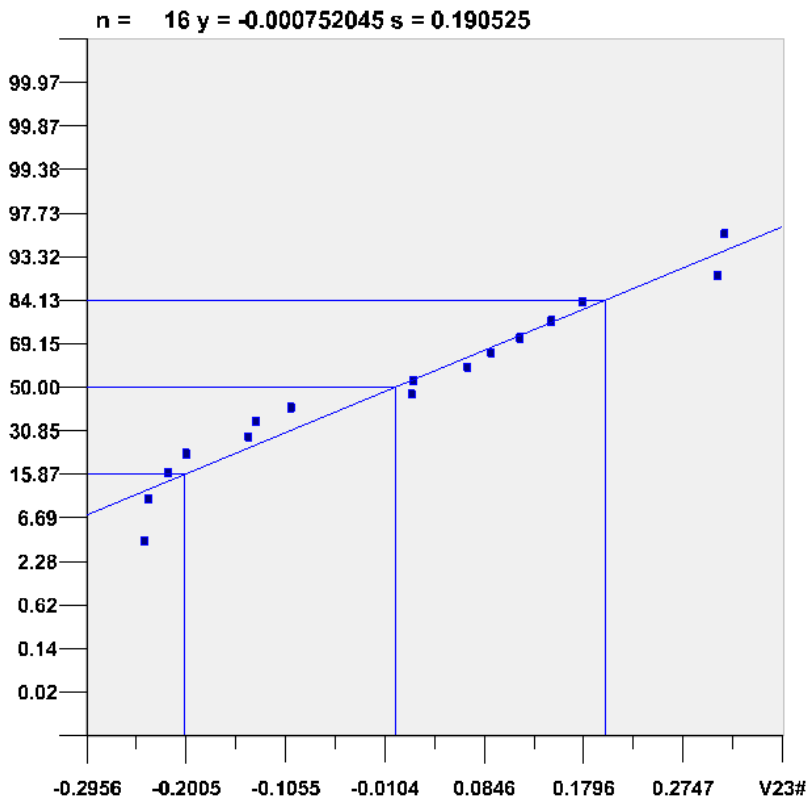


Ilustración 63: Distribución normal herramienta Kendu material macizado

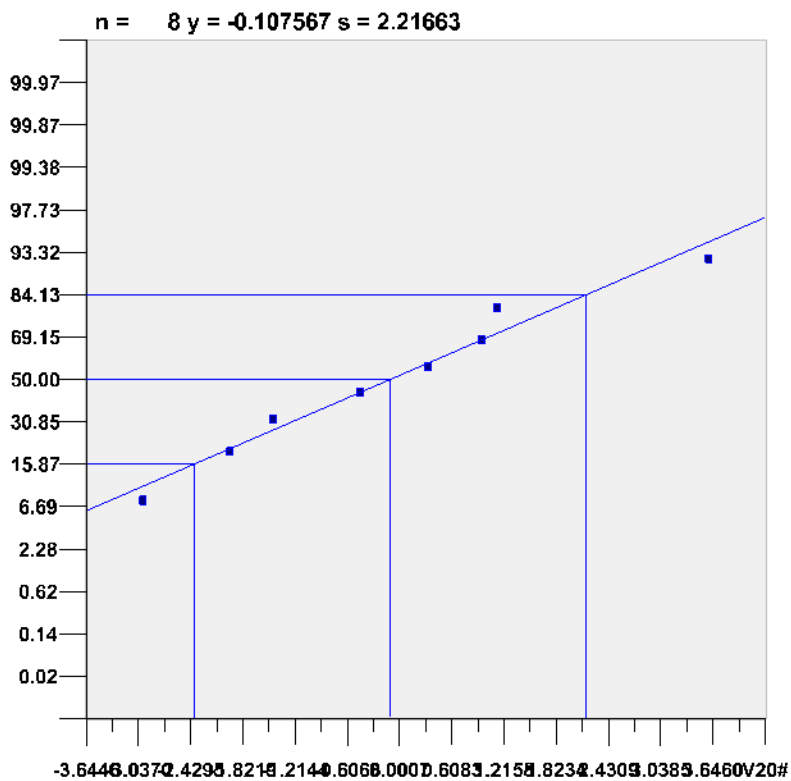


Ilustración 64: Distribución normal herramienta Tivoly material Carbono

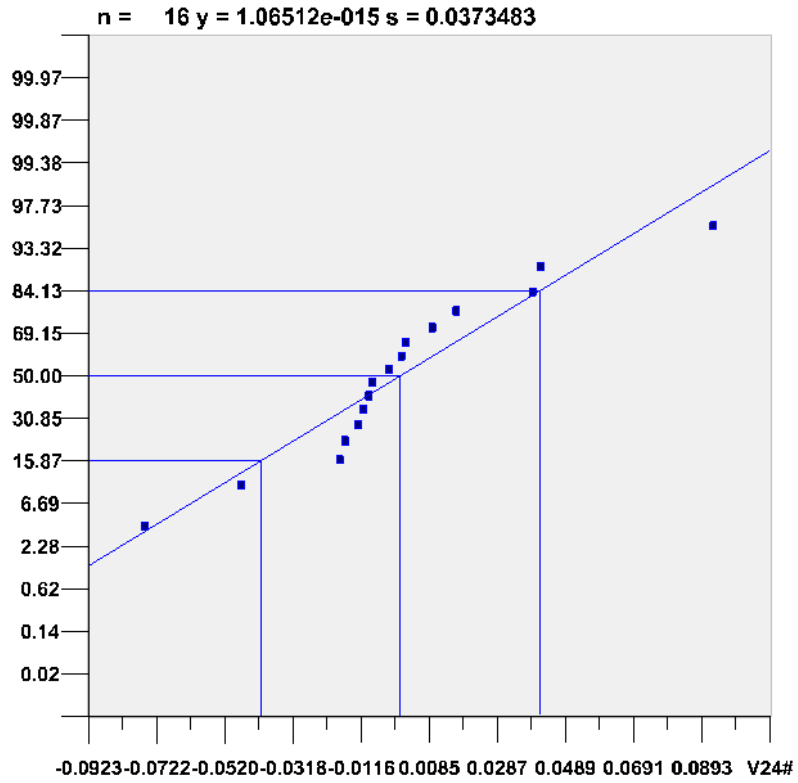


Ilustración 65: Distribución normal herramienta Tivoly material Macizado

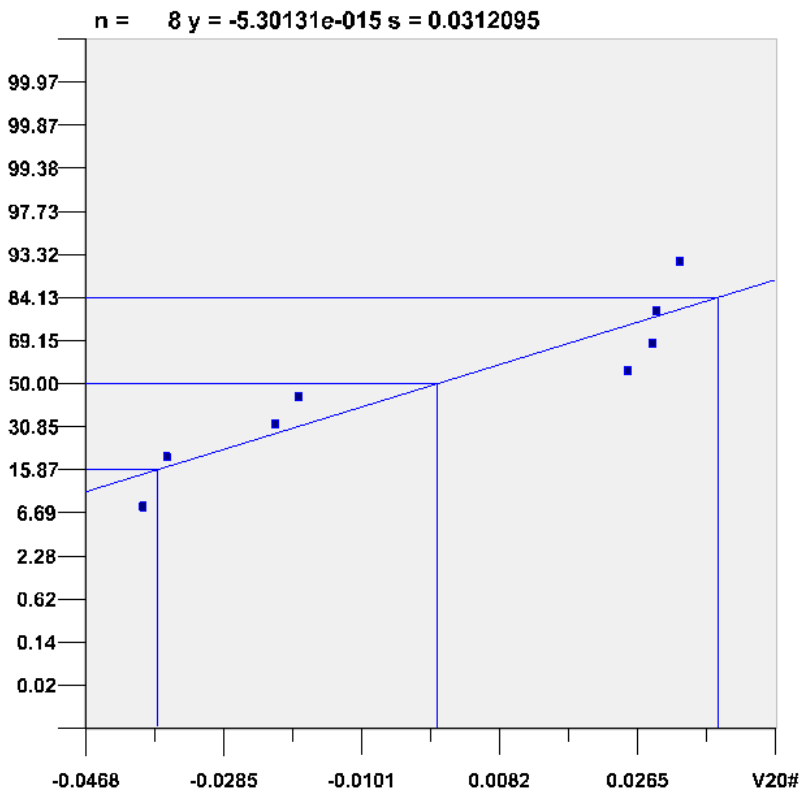


Ilustración 66: Distribución normal herramienta WNT material Carbono

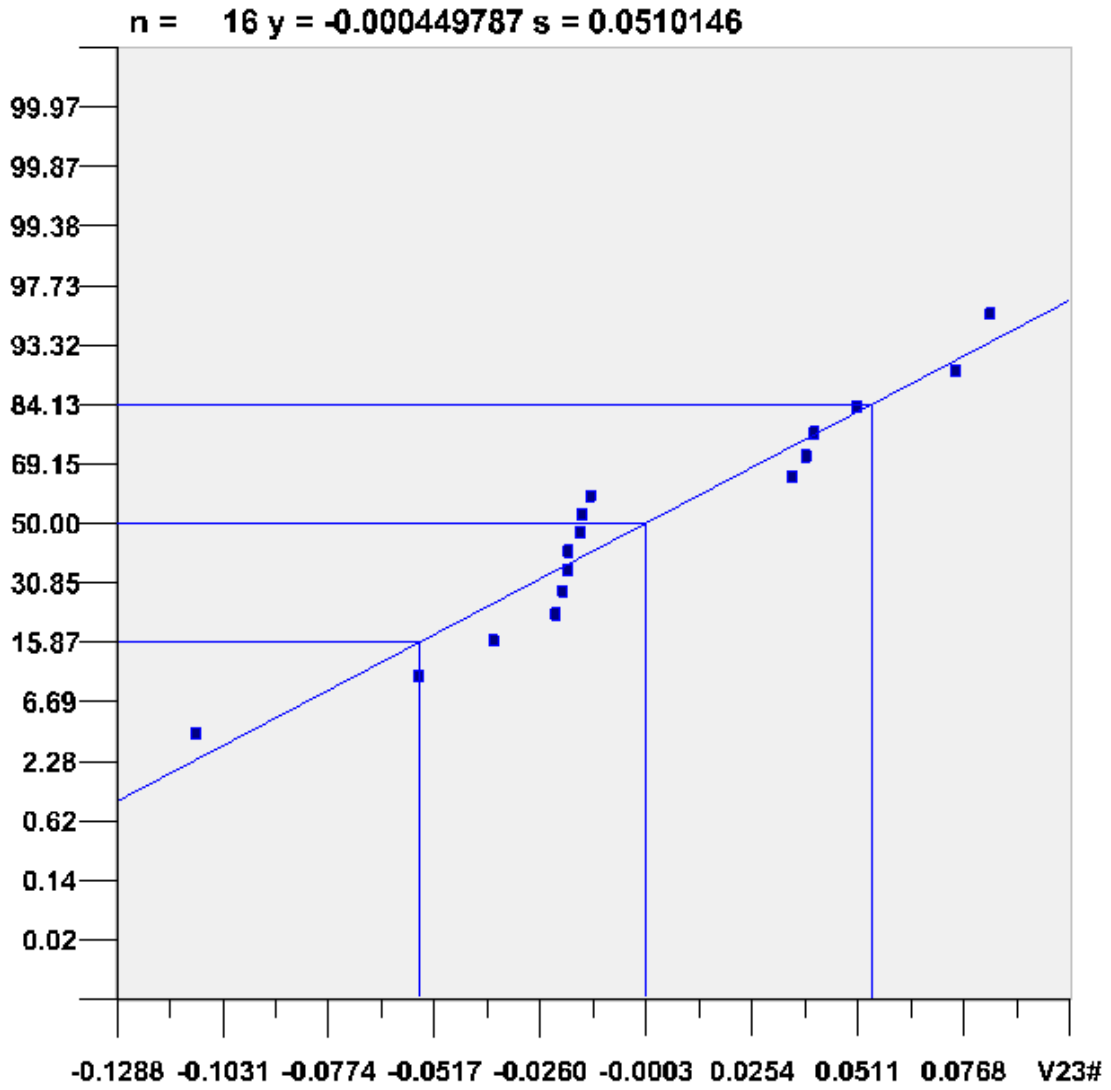


Ilustración 67: Distribución normal herramienta WNT material macizado

ANEXO IV: Interfaz de Lumiere

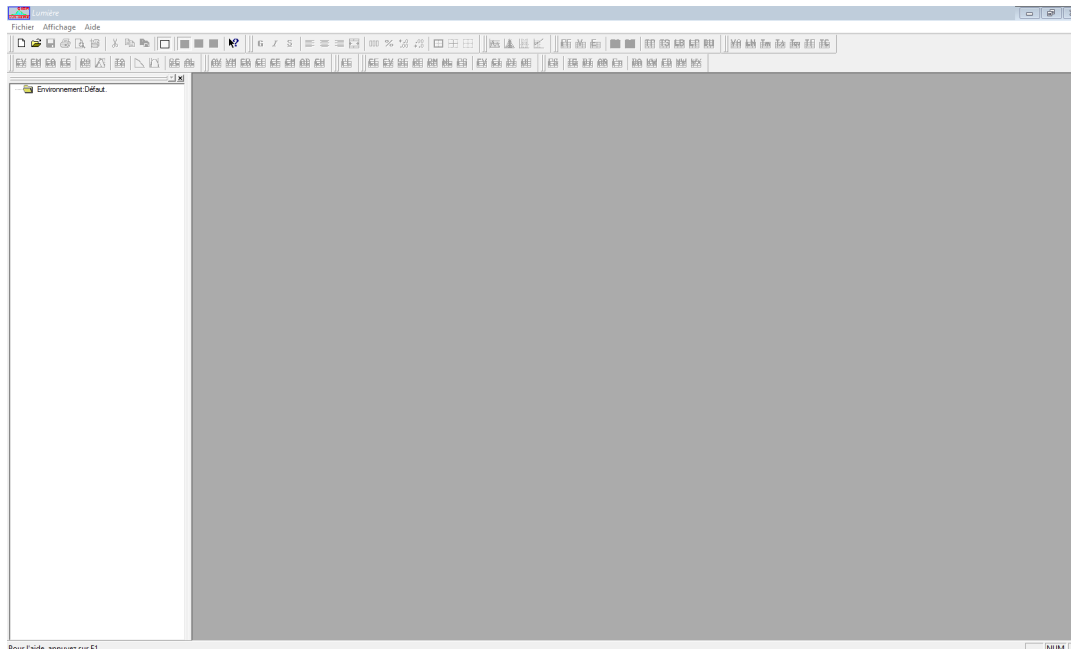


Ilustración 68: Interfaz general software Lumiere

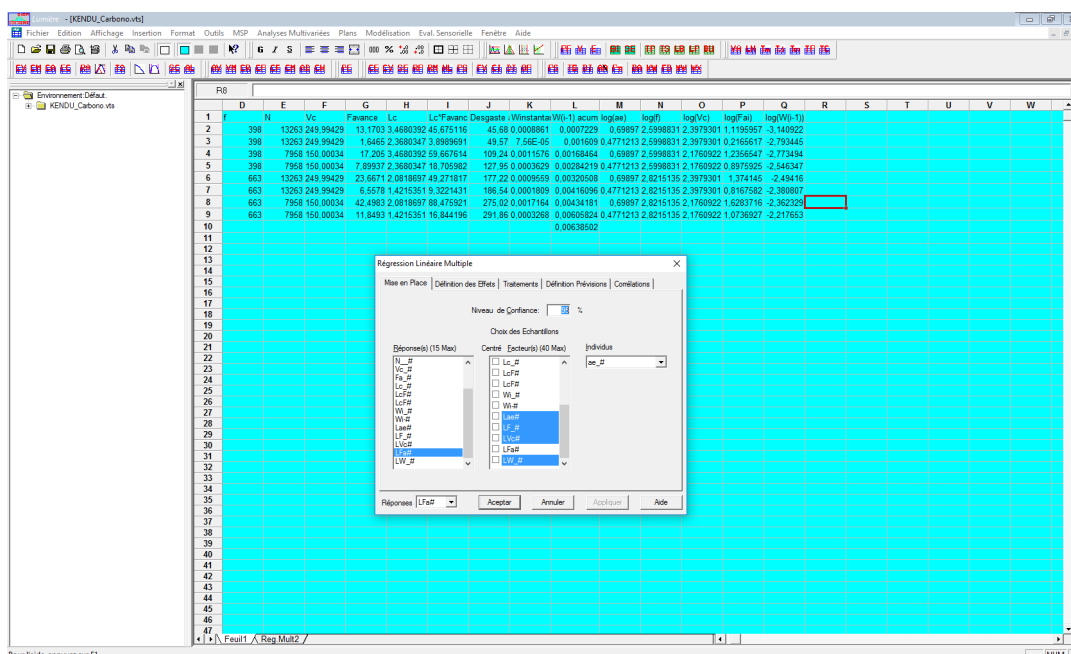


Ilustración 69: Selección de variables para la Regresión múltiple

The screenshot shows the KENDU software interface. The main window displays a data table with columns labeled D through W and rows numbered 1 through 47. A dialog box titled 'Gestion des Variables' is open, showing a table of variable definitions. The dialog box has tabs for 'Définition', 'Modèles', 'Unités', 'Quarstativ en Qualitative', 'Produit Qualitat', and 'Synthese'. The 'Définition' tab is active, showing a table with columns 'Référence', 'Nom', 'Intitulé', and 'Unité i Alph'. The table contains the following data:

Référence	Nom	Intitulé	Unité i Alph
001 A	N _p	V01	
002 B	ap	V02	
003 C	am	V03	
004 D	f	V04	
005 E	N _l	V05	
006 F	Vc	l01	
007 G	Fa	V06	
008 H	Lc	V07	
009 I	LcF	V08	
010 J	LcF	V09	
011 K	W _i	V10	
012 L	W _i	V11	
013 M	Lae	Lae	
014 N	LF	LF	

Ilustración 70: Definición de variables

ANEXO V: Alternativas para fresado de Honeycomb

Las alternativas que se proponen están fabricadas por un especialista en el sector como es ONSRUD. Se plantean dichas alternativas para futuros ensayos.

