



ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA

MASTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DE FABRICACIÓN

PROPUESTA METODOLÓGICA PARA EL  
ESTUDIO DEL MECANIZADO DE PIELES  
METÁLICAS

AUTORA: IRENE DEL SOL ILLANA

Puerto Real, julio 2015



ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA

MASTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DE FABRICACIÓN

**PROPUESTA METODOLÓGICA PARA EL  
ESTUDIO DEL MECANIZADO DE PIELES  
METÁLICAS**

TUTOR: MARIA MARCOS BÁRCENA  
COTUTORA: ASUNCIÓN RIVERO RASTRERO

AUTORA: IRENE DEL SOL ILLANA

Puerto Real, julio 2015



---

# Índice

---



## Capítulo 1. Introducción

1.1. Contexto .....	1.1
1.2. Objetivos .....	1.3
1.3. Alcance.....	1.4
1.4. Organización de la memoria.....	1.4
1.5. Referencias bibliográficas.....	1.5

## Capítulo 2 Estado del arte

2.1 Introducción .....	2.1
2.2 Características de las piezas .....	2.1
2.3 Materiales .....	2.4
2.4 Fresado químico de pieles .....	2.5
2.5 Fresado de aluminio .....	2.6
2.5.1 Fresado de alta velocidad .....	2.7
2.5.2 HSM en piezas de pequeños espesores .....	2.9
2.6 Integridad superficial.....	2.15
2.6.1 Propiedades Macrogeométricas .....	2.17
2.6.2 Propiedades Microgeométricas .....	2.17
2.6.3 Propiedades Físico-químicas .....	2.19
2.7 Herramientas .....	2.21
2.8 Utillaje de amarre .....	2.22
2.8.1 Evolución del diseño del utillaje de amarre y amortiguación.....	2.22
2.8.2 Equipos para el fresado de pieles .....	2.23
2.9 Conclusiones .....	2.28
2.10 Bibliografía .....	2.29

## Capítulo 3 Metodología

3.1.	Introducción .....	3.1
3.2.	Codificación de ensayos .....	3.2
3.3.	Diseño del utillaje .....	3.3
3.4.	Diseño de las probetas .....	3.5
3.5.	Caracterización de las herramientas .....	3.7
3.6.	Selección de las estrategias de mecanizado .....	3.8
3.7.	Selección de los parámetros de corte .....	3.9
3.8.	Monitorización .....	3.9
3.9.	Monitorización del espesor mediante la medición por sensor láser .....	3.12
3.9.1.	Breves Antecedentes .....	3.12
3.9.2.	Principio de medida del láser .....	3.13
3.9.3.	Metodología para las pruebas iniciales .....	3.13
3.9.4.	Metodología para el ensayo de validación .....	3.14
3.10.	Protocolo de realización del ensayo de mecanizado de pieles .....	3.19
3.11.	Análisis de los resultados .....	3.20
3.11.1.	Análisis de fuerzas, vibraciones y mediciones de espesor .....	3.20
3.11.2.	Protocolo evaluación probetas .....	3.21
3.12.	Conclusiones .....	3.27
3.13.	Referencias .....	3.27

## Capítulo 4. Resultados y discusión

4.1.	Introducción .....	4.1
4.2.	Análisis de fuerzas .....	4.1
4.3.	Relación de vibraciones .....	4.10
4.4.	Macrogeometría .....	4.11
4.4.1.	Rectitud .....	4.11
4.4.2.	Ondulación superficial .....	4.11



4.4.3. Defectos estéticos .....	4.12
4.5. Evaluación dimensional .....	4.13
4.5.1. Radio de acuerdo de contorno.....	4.15
4.5.2. Radio de acuerdo en las esquinas.....	4.15
4.5.3. Profundidad del mecanizado .....	4.16
4.5.4. Dimensiones de las cajas.....	4.17
4.6. Microgeometría .....	4.18
4.7. Comprobación utillaje .....	4.21
4.8. Monitorización del espesor mecanizado.....	4.23
4.8.1. Ensayo de identificación de problemas en la medición .....	4.23
4.8.2. Ensayos de identificación de la presencia de viruta durante el mecanizado.....	4.24
4.8.2.1. <i>Identificación de la viruta en la señal registrada</i> .....	4.24
4.8.3. Ensayo para la evaluación de la cantidad de viruta .....	4.30
4.8.4. Desarrollo de una aplicación de filtrado on-line de las señales .....	4.30
4.9. Conclusiones .....	4.33
4.9.1. Análisis de las señales monitorizadas.....	4.33
4.9.2. Evaluación de las probetas .....	4.34
4.9.3. Monitorización del espesor mediante un sensor láser .....	4.36
4.10. Referencia bibliográficas .....	4.37

## Capítulo 5. Resultados y discusión

5.1. Introducción .....	5.1
5.2. Conclusiones .....	5.1
5.3. Líneas y trabajos futuros .....	5.2

## Anexos



# Capítulo 1

---

## Introducción

---



## 1.1. Contexto

Este trabajo se centra en la búsqueda de alternativas eco-sostenibles para el mecanizado de estructuras de esbeltez elevada. El principal objetivo es desarrollar una metodología que permita definir las condiciones de mecanizado de pieles aeronáuticas para ser aplicado como alternativa a los procesos de fresado químico actualmente empleados.

El trabajo se desarrolla dentro de una de las líneas de investigación del grupo TEP-027 centrada en la optimización de los procesos de mecanizado en la industria aeronáutica, dentro de una colaboración con la División de Industria y Transporte de la Fundación Tecnia.

Esta línea de investigación se encuadra dentro del proyecto Factoría del Futuro (Factories of the Future, FoF) del horizonte 2020, el cual estudia la importancia de la fabricación dentro de la economía y la propone como un factor clave a nivel europeo para superar los retos sociales del primer quinto del S XXI [1].

El horizonte 2020 pretende mostrar la capacidad de Europa de alcanzar un desarrollo sostenible en el que se contemple incluso el crecimiento. Para ello utiliza entre una de sus bases la inversión en la investigación y desarrollo de los procesos de fabricación para mantener la competitividad del continente.

Una de las medidas de asegurar la competitividad y productividad de los sistemas es la búsqueda de su sostenibilidad utilizando sistemas de fabricación ágiles y flexibles tanto económica como medio-ambientalmente.

La sostenibilidad no se observa únicamente desde el punto de vista del desarrollo tecnológico enfocado a alcanzar una mayor competitividad, si no que implica tener en cuenta los aspectos económicos, medio ambientales y sociales de forma interrelacionada [2]. Un ejemplo es el propuesto por Franhouffer en el que la evaluación de un proyecto se realiza a partir de su viabilidad en función de la eficiencia energética, económica y medio ambiental, sin olvidar que cumpla siempre con los criterios de funcionalidad.

Concretamente el mecanizado de pieles forma parte de la prolongación de un programa de investigación a nivel europeo llamado Clean Sky JTI [3]. Este programa recibió inversión tanto de la industria como de la Comisión Europea entre 2008-2013 para desarrollar mejoras tecnológicas de rápida implantación en el mercado. De esta forma, se pretende introducir la *ecotecnología* de un modo rápido en la industria de la aviación, la cual tiene 10 años de desarrollo del producto y 30 de

vida media del mismo. Es un proyecto por tanto que se enmarca en el horizonte 2020, y sirve como herramienta para alcanzar los siguientes objetivos:

- Reducción del 50% de las emisiones reduciendo drásticamente el consumo de combustible.
- Reducción del 80% de las emisiones NOx
- Reducción del 50% del ruido emitido
- Conseguir un ciclo de vida del producto ecológico: diseño, fabricación, mantenimiento y retirada/reciclaje.

Este trabajo se centra en el último objetivo, concretando en la búsqueda de la fabricación ecológica del producto y apostando por el uso del aluminio en las estructuras como material fácilmente reciclable y que facilita por tanto la retirada sostenible del producto.

Las pieles metálicas se utilizan como elementales de grandes estructuras en la industria aeronáutica. Estos elementales al ser de grandes dimensiones y pequeño espesor pueden sufrir macro-deformaciones estructurales y geométricas que afectan, principalmente, a la funcionalidad de la pieza. La solución existente para mecanizar estos elementos se reduce principalmente al fresado químico, tecnología cuyos principales inconvenientes son el tratamiento y gestión de los residuos químicos generados, y el tamaño necesario de las instalaciones donde los baños se duplican en función de los tratamientos previos que se deban realizar a la pieza.

Los antecedentes encontrados se centran en el proyecto GAP (Green Advanced Panels), un proyecto para el mecanizado de paneles de doble curvatura que consiguió reducir los costes de fabricación a un 50% debido a la reducción horario de los operarios necesarios –el proceso de fresado químico es un proceso mayoritariamente manual–, reducción del 57% del consumo energético, reducción del 50% del ciclo de producción y a la reducción de los costes asociados a los costes medio ambientales derivados de la tecnología de fresado químico [4], [5].

Pese a los buenos resultados obtenidos en este proyecto, la técnica no está ampliamente implantada pues los costes iniciales de la maquinaria necesaria son muy elevados y los riesgos de generar piezas inútiles son muy elevados debido a las deficientes tolerancias dimensionales obtenidas, consecuencia de las características del proceso.

Por ello, en el trabajo se analizará esta solución, el mecanizado de alta velocidad, como alternativa al mecanizado de pieles metálicas, exponiendo una aproximación al estado del arte de este tema y desarrollando una metodología que permita analizar las características del mecanizado de pieles de aluminio. Para finalizar se presenta el estudio preliminar realizado que permite validar la metodología inicial y desarrollar una para el estudio y optimización del proceso a largo plazo. Este estudio es de nivel TRL 4 dentro de la clasificación de la transferencia tecnológica de la investigación. La validación de la tecnología se realiza de forma experimental en el laboratorio, especialmente a la hora de

analizar los resultados obtenidos. Aunque el nivel de transferencia puede aumentar rápidamente una vez se caractericen y delimiten los factores más influyentes en el mecanizado. Los ensayos se ha realizado en un equipo industrial por lo que el mecanizado en sí mismo podría pertenecer a un nivel TRL 5.

**Tabla 1**– Clasificación de los niveles de transferencia tecnológica de la investigación (TRL, Technologies Readiness Levels) para el horizonte 2020 [6]

<b>TRL 1</b>	<b>Observación de principio básicos</b>
<b>TRL 2</b>	Formulación de conceptos tecnológicos
<b>TRL 3</b>	Pruebas experimentales de los conceptos
<b>TRL 4</b>	Validación tecnológica en laboratorio
<b>TRL 5</b>	Validación tecnológica en un entorno relevante (industrial en el caso de tecnologías claves para su directa implementación)
<b>TRL 6</b>	Demostración tecnológica en un entorno relevante (industrial en el caso de tecnologías claves para su directa implementación)
<b>TRL 7</b>	Sistemas de demostración de prototipos en un entorno operacional
<b>TRL 8</b>	Sistema completado y cualificado
<b>TRL 9</b>	Sistema probado en un su entorno de operación (fabricación competitiva en el caso de tecnologías claves para su directa implementación o en espacio)

## 1.2. Objetivos

El objetivo de este trabajo es encontrar una alternativa ecoeficiente al fresado químico, proceso utilizado industrialmente para el mecanizado de pieles aeronáuticas y paredes delgadas.

Aunque el Mecanizado de Alta Velocidad (High Speed Machining, HSM) se utiliza para la fabricación de estructuras monolíticas aeronáuticas, para las cuales se parte de grandes bloques de material, donde se elimina el 95% del peso inicial de la pieza para llegar a estructuras de paredes delgadas, en este caso el objetivo es mecanizar directamente piezas delgadas que luego serán utilizadas como pieles. Las operaciones pueden ser cajeados o cortes (eliminación) de zonas, buscando en todo momento aligerar el peso de la estructura. Se ha de tener en cuenta que estas piezas pueden haber sido sometidas a procesos de deformación plástica y que la geometría de partida en los paneles avanzados suele ser complicada.

## 1.3. Alcance

Inicialmente se realizará una aproximación al estado del arte del mecanizado de pieles metálicas. En función a los estudios analizados se presentará de una metodología para el estudio preliminar del mecanizado donde se evaluarán distintas estrategias de mecanizado y varias velocidades de corte diferentes, a espesor de piel, profundidad de corte y avance constante. Además se realiza una

comparación de herramientas y un estudio previo del utillaje necesario para realizar los ensayos. Dentro de esta metodología se incluye la propuesta de un protocolo de evaluación de las probetas.

Respecto a la realización de los ensayos preliminares serán evaluados mediante la monitorización online de las fuerzas registradas en el proceso, las vibraciones mono axiales de la pieza y la profundidad de corte mediante medición láser. Para validar la medición de la profundidad de corte se realizarán pruebas de medición láser sobre una pieza ortoédrica de gran espesor, de forma que las variables de posición derivadas de las características de la pieza se eliminen.

El otro tipo de evaluación que se realiza es off-line y se basa en el estudio de la probeta analizando los perfiles geométricos y de rugosidad, y los espesores reales mecanizados.

A partir de los resultados obtenidos y del análisis de las dificultades encontradas durante este mecanizado, se propone una metodología a largo plazo en el estudio del mecanizado de pieles. En esta metodología se incluirán otros estudios no desarrollados en este TFM, como el control del desgaste de la herramienta y las desviaciones microgeométricas de las superficies desarrolladas. La modelización empírica de las variables de salida también queda fuera de este trabajo, si bien se incluirá en la metodología general propuesta.

### 1.4. Organización de la memoria

La memoria está estructurada en cinco capítulos. El Capítulo 2 se ha dedicado al estudio del proceso de mecanizado de alta velocidad (HSM, High Speed Machining) aplicado al mecanizado de estructuras esbeltas. En este capítulo se analizan las dificultades encontradas por diferentes autores en es campo y se resumen los sistemas de utillaje de amarre empleados industrialmente para este tipo de mecanizado. En el Capítulo 3, se expone la propuesta metodológica para el estudio del mecanizado de pieles metálicas, concretando las características del proceso y se describen los ensayos llevados a cabo. A continuación, se exponen y discuten los resultados obtenidos. Finalmente en el Capítulo 5 se resumen las conclusiones del trabajo y se proponen una serie de líneas de trabajo futuras.

### 1.5. Referencias bibliográficas

- [1] European Commission, "Factories of Future." EFFRA, Bruselas (Bélgica), p. 55, 2013.
- [2] J. Bertling, M. Fischer, and A. Gerstenmeier, "Sustainability Report 2014," Munich (Germany), 2014.
- [3] Clean Sky, "Mission & Objectives | Clean Sky." [Online]. Available: <http://www.cleansky.eu/content/article/mission-objectives>. [Accessed: 08-Jun-2015].



- [4] Airbus, "Airbus evaluates the mechanical milling of fuselage panels in a European programme | Airbus Press release." [Online]. Available: <http://www.airbus.com/presscentre/pressreleases/press-release-detail/detail/airbus-evaluates-the-mechanical-milling-of-fuselage-panels-in-a-european-programme/>. [Accessed: 08-Jun-2015].
- [5] European Commission, "ENVIROMENT Life Programme." [Online]. Available: [http://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=home.createPage&s\\_ref=LIFE05ENV/F/000062&area=2&yr=2005&n\\_proj\\_id=2858&cfid=687868&cftoken=d8b5e6e77f9d52ef-F97BDE32-BE96-365D-F79874977610BC5F&mode=print&menu=false#Top](http://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=home.createPage&s_ref=LIFE05ENV/F/000062&area=2&yr=2005&n_proj_id=2858&cfid=687868&cftoken=d8b5e6e77f9d52ef-F97BDE32-BE96-365D-F79874977610BC5F&mode=print&menu=false#Top). [Accessed: 03-Jun-2015].
- [6] European Commission, "G . Technology readiness levels ( TRL )," 2014.



## Capítulo 2

---

### Estado del arte

---

## 2. Estado del arte

---

## 2.1 Introducción

Actualmente existen muchos estudios a nivel europeo centrados en la mejora del rendimiento medio ambiental en los procesos de fabricación. Cada vez las leyes son más restrictivas con la interacción de un proceso de fabricación con el medio ambiente, pero la sustitución de éstos depende del rendimiento general del proceso contemplando tres vías más, la económica, la energética y la funcional.

Este trabajo estudia los aspectos que influyen concretamente en el rendimiento funcional del proceso y se propone una metodología para su estudio. Sin embargo, es necesario conocer y caracterizar el proceso antes de definir la metodología. En consecuencia, este capítulo se dedicará al análisis del proceso y los aspectos que intervienen en el mismo.

Para ello se describirán las características de las piezas a mecanizar, los materiales utilizados y las opciones de mecanizado, tanto la existente como la propuesta como alternativa ecológica, el fresado de alta velocidad. A partir de esta base, se estudiarán las características del fresado de alta velocidad contemplando las herramientas utilizadas hasta ahora y la evolución del utillaje de amarre tanto a nivel de laboratorio como industrial.

En cuanto a la evaluación funcional de los resultados, se expone el concepto de integridad superficial que servirá como base para el desarrollo del protocolo de evaluación de las pieles. Protocolo en el cual, se pretende asegurar la calidad de las piezas con respecto a los requisitos de diseño y su puesta en servicio.

En resumen, este capítulo tiene por objetivo mostrar una visión completa del proceso de mecanizado de pieles metálicas para poder posteriormente describir los puntos que se consideran esenciales para su estudio.

## 2.2 Características de las piezas

En este apartado se definen las características de las pieles aeronáuticas y sus requisitos industriales. Las pieles aeronáuticas son elementales, piezas básicas conformadas o incluso con tratamientos y taladros, preparadas para la realización de montajes. Son fabricados a partir de paneles metálicos que recubren la estructura del avión facilitando la aerodinámica de la nave (Figura 2.1) y constituyendo una parte fundamental del fuselaje del avión, de las alas, del cono de cola, del cuerpo central, etc. [1].

Estas piezas pueden clasificarse como estructuras de esbeltez elevada, cuya relación entre el espesor y el resto de dimensiones relevantes está entre seis y diez. A las pieles se le realizan operaciones de deformación plástica y/o mecanizado para adaptarlas a la geometría deseada. A su vez, para reducir

el gasto de combustible asociado al peso de la estructura, se le mecanizan cavidades a la pieza, de pequeño espesor y geometría sencilla, dejando costillas para no afectar estructuralmente al comportamiento de la pieza.

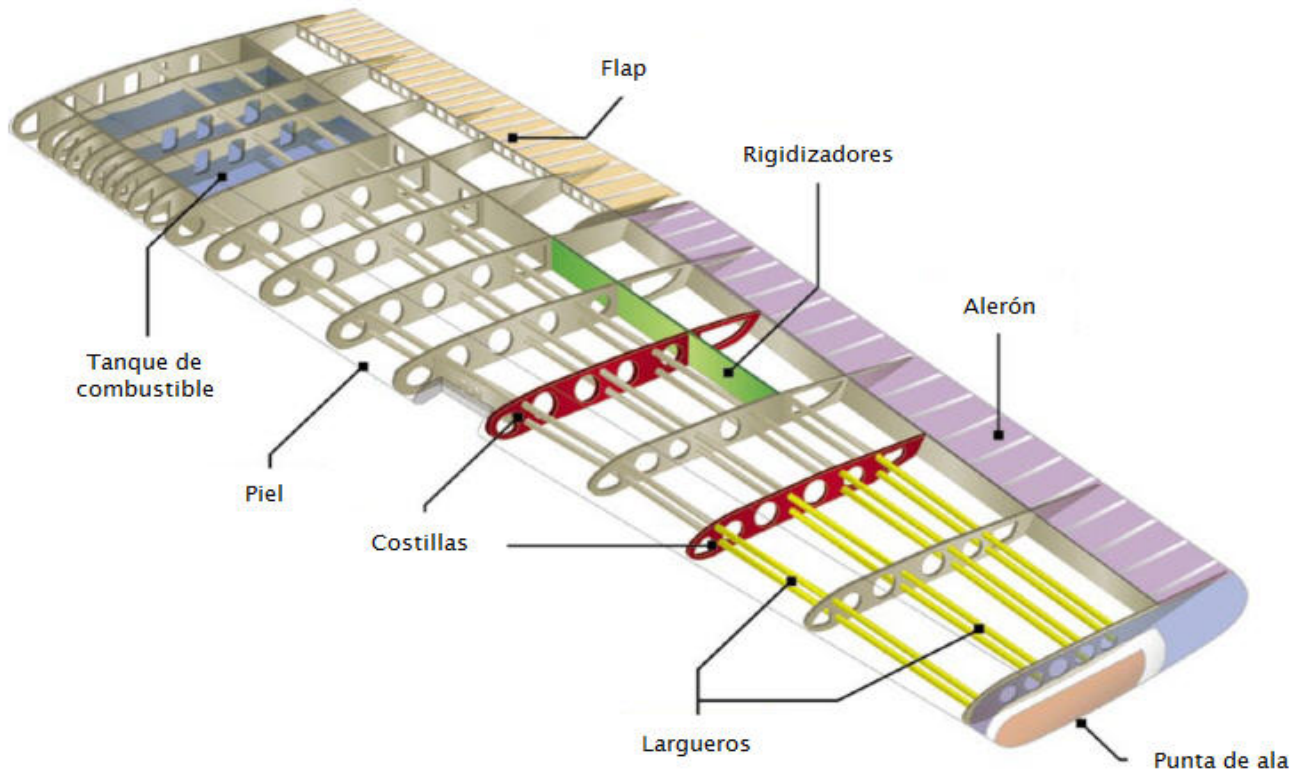


Figura 2.1– Estructura del ala de un avión. Adaptada de [2]

Estas cavidades presentan distintas geometrías siempre y cuando sea en 2D por cada etapa, aunque estas suelen tener formas sencillas, paralelepípedos y en algunos casos rebajes circulares. El valor del espesor mecanizado es variable según el del material de partida pero en ningún caso se recomienda mecanizar más de 13 mm con esta tecnología [3,4]. En cuanto a las dimensiones de la piel en la que se realizan estos cajeados varían desde paneles de 150x150mm de superficie con un espesor final de incluso 1 mm [5] hasta piezas de varios metros de longitud con mecanizados de 8–10 mm.

Con respecto a las características de validación, son piezas que no suelen requerir por diseño tolerancias estrictas ya sean dimensionales (entre  $\pm 0,080$  mm y  $\pm 0,200$  mm de espesor final), de forma (rectitud alrededor de 0.05 mm o planitud aproximada de 0.15mm) o de acabado superficial (de 3,2 a 10  $\mu$ m de Ra, según el espesor mecanizado) en la zona mecanizada [3].

Sin embargo, sí suelen incluir en las hojas de verificación una gran cantidad de requisitos relacionados con las dimensiones y cantidad de daños superficiales, aparición de grietas o picaduras; medidas mínimas de radios de redondeo en los cantos o de aristas vivas, y características químicas finales como el máximo ataque intergranular [3].

El material empleado habitualmente en la fabricación de pieles metálicas es el aluminio, aunque existen piezas realizadas en titanio o magnesio y, en otras industrias, en acero.

Dentro de las operaciones de mecanizado, las más utilizadas en estas piezas son: recantado, fresado (aligerar peso), taladrado, etc. Especialmente, en las operaciones de fresado destinadas a aligerar peso en la estructura, se ha empleado tradicionalmente el fresado químico. Esta técnica consiste en el mecanizado introduciendo la pieza en una solución química controlada, ácida o básica fuerte [6]. Debido a la naturaleza del proceso existen diferentes inconvenientes relacionados con el acabado de la pieza, la calidad dimensional y superficial, y la no interferencia negativa con el medio ambiente. Es una tecnología que debido a los productos químicos necesarios requiere un tratamiento específico de los residuos. Éste, a su vez, es cada vez más restrictivo y costoso a la hora de cumplir con la legislación medio ambiental vigente. Por otro lado, presenta otros problemas como la gran necesidad de espacio en las instalaciones dedicadas a esta actividad (Figura 2.2) o el tiempo de operación necesario, implica muchas operaciones previas al fresado químico que son difícilmente automatizables y que no aportan valor añadido directamente al producto [6].



Figura 2.2 - Baños de limpieza de una línea de fresado químico

Por estos motivos, en este trabajo se propone una alternativa a la tecnología empleada para mecanizar este tipo de estructuras basada en el empleo de alternativas más convencionales que minimicen los problemas asociados al fresado químico.

En el contexto de lo anteriormente expuesto, no se han encontrado apenas estudios relacionados con el mecanizado de pieles, incluyendo tanto el fresado químico como el convencional o el de alta velocidad. Sin embargo, en los últimos diez años ha aumentado considerablemente el número de publicaciones dedicadas al mecanizado de piezas monolíticas, utilizadas ampliamente en la aeronáutica para reducir el peso al evitar las uniones [7]. Estas piezas tienen una ratio *buy-to-fly* que puede alcanzar el 5% generando al final piezas de esbeltez elevada, al generar paredes y suelos de bajo espesor (aprox. 1 mm).

El mecanizado de estas piezas lleva asociado el estudio de la mejora del proceso con el fin de reducir los costes industriales del mismo y eliminar aquellos defectos generados por la baja rigidez característica de estas piezas. Por ello, en este capítulo se estudiará la bibliografía dedicada al mecanizado estructuras monolíticas. Ésta servirá como referencia al esperarse comportamientos similares en la dinámica y la estática de las pieles (vibraciones, flexión, etc.). A estos estudios se le

añade la posible existencia en las pieles de tensiones residuales previas derivadas de las operaciones realizadas a la pieza con anterioridad (forja, deformación plástica, etc.).

### 2.3 Materiales

Las aleaciones ligeras son aquellas que sustituyen al acero en aquellas aplicaciones en las cuales es importante un ahorro de peso. Estas aleaciones se clasifican en función del material base utilizado, aluminio, magnesio y titanio, que suele presentar propiedades específicas mayores que el acero, convirtiéndose en materiales aptos para su sustitución. En la Tabla 2.1 se presenta una relación de las propiedades mecánicas de los materiales mencionados anteriormente.

**Tabla 2.1**– Propiedades mecánicas de las aleaciones ligeras y del acero

Aleación	Densidad $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	M. Young E (GPa)	Lím. Elástico $\sigma_{lim}$ (MPa)	E/ $\rho$	$\sigma_{lim}/\rho$
Al	2.7	71	25–600	26	9–220
Mg	1.7	45	70–270	25	40–160
Ti	4.5	120	170–1280	27	38–280
Aceros	7.9	210	220–1600	27	28–200

Debido a su aplicación en el sector del transporte, el uso de estos materiales está ligado a pieza de bajo peso. Especialmente, en el caso de las estructuras aeronáuticas suelen fabricarse piezas a partir de aleaciones ligeras a las que a su vez se le realizan rebajes para reducir aún más su peso. Un caso concreto de este tipo de piezas son las pieles metálicas, paneles a los que se le han realizado vaciados y que servirán principalmente para cubrir partes exteriores de las aeronaves, paneles de alas, fuselaje, etc.

Existen pieles fabricadas tanto en acero como en aleaciones ligeras (titanio, magnesio y aluminio) aunque las más comunes son las de aluminio. En la bibliografía consultada se han encontrado estudios de mecanizado de pieles de acero y titanio pero el material más empleado en este tipo de piezas es el aluminio y por tanto este estudio se centrará en él. A su vez, dentro de las aleaciones de aluminio las más empleadas para pieles son las aleaciones de forja tratables térmicamente, en concreto las catalogadas como aleaciones “*avionables*”, y especialmente las pertenecientes a las series UNS A92XXX y UNS A97XXX.

Las aleaciones de la serie 7XXX, concretamente en las aleaciones UNS A97075, UNS A97050 y UNS A97045, suelen emplearse componentes fabricados a partir de piezas monolíticas. Este tipo de piezas se utilizan en componentes estructurales que requieren una rigidez elevada. Para su obtención es necesario estudiar tanto el mecanizado de las paredes de la pieza, que son las partes que presentarán mayores problemas ante las vibraciones, como el de los suelos.

Las aleaciones de la serie UNS A97XXX añaden al aluminio contenidos variables de Zn, Mg y Cu. De ellas, la más importante de esta serie es la UNS A97075, cuya composición aproximada se encuentra



en la Tabla 2.2. Ésta, cuando se le aplica un tratamiento térmico del tipo T6, solución temple y maduración artificial, alcanza resistencias a tracción de 504 MPa [8]. Otro ejemplo de esta serie es la aleación UNS A97050, una aleación Al-Zn-Mg-Cu-Zr, desarrollada para combinar la alta resistencia mecánica con la resistencia al fallo por esfuerzo-corrosión y con la buena resistencia a la fractura, especialmente en secciones delgadas. Puede alcanzar según el tratamiento térmico durezas superiores a las de las aleaciones convencionales de alta resistencia o una resistencia a la corrosión como las de las UNS A97075 o UNS A97178. Ambas son aleaciones básicas en la fabricación de componentes estructurales en la industria aeronáutica y por ello la mayor parte de los artículos estudiados analizan su comportamiento frente al mecanizado.

**Tabla 2.2 – Composición química en % de la aleación de aluminio UNS A97075 [9]**

%	Cr	Fe	Cu	Mn	Mg	Si	Zn	Ti	Otros	Al
<b>Mín.</b>	0,18	-	1,20	-	2,1	-	5,10	-	-	-
<b>Máx.</b>	0,28	0,50	2,00	0,30	2,9	0,40	6,10	0,20	0,15	Resto

Sin embargo, el estudio realizado en este trabajo se centra en una aleación de la serie UNS A92XXX, en concreto, en la UNS A92024, la más utilizada de esta serie. Esta aleación se utiliza principalmente para la fabricación de fuselajes de aviones donde la reducción de espesor se realiza sobre paneles muy finos y suele presentar geometría simples en 2D.

Esta aleación tiene como principal elemento aleante el Cu, que es acompañado por pequeñas cantidades de Mg, la composición total se muestra en la Tabla 2.3. Es una aleación muy resistente a la corrosión y sus propiedades varían en función del tratamiento térmico que se le aplique, por ejemplo si se trata de una UNS A92024- T3 o T4 el material aumenta considerablemente la dureza, pero con un T6 o T8 se obtiene una mayor resistencia a la tracción, hasta 442 MPa [8]. Otra ventaja es que se dispone de ella en múltiples formatos ya que su uso está muy extendido.

**Tabla 2.3 – Composición química en % de la aleación de aluminio UNS A92024 [9]**

%	Cr	Fe	Cu	Mn	Mg	Si	Zn	Ti	Otros	Al
<b>Mín.</b>	-	-	3,80	0,30	1,2	-	-	-	-	-
<b>Máx.</b>	0,10	0,50	4,90	0,90	1,8	0,50	0,25	0,15	0,15	Resto

## 2.4 Fresado químico de pieles

El fresado químico conocido en inglés como Chemical Milling (CM), chem milling, chemical machining, chemical contouring o chemietching, es un proceso de fabricación que consiste en la eliminación química de material de piezas estructurales mediante una disolución ácida o alcalina, selectiva y controlada. Las zonas que no son atacadas se protegen con cinta adhesiva, pinturas o polímeros resistentes a los productos químicos utilizados en el baño y fáciles de pelar una vez realizado el ataque, esta etapa recibe el nombre de enmascarado [6]. Generalmente, se utiliza como método de mejora del proceso y no como proceso base, para conseguir piezas de gran resistencia con respecto a su peso. Para realizar este proceso se siguen las etapas descritas en la Figura 2.3.



Figura 2.3 – Etapas del FQ. Adaptado de [10]

Durante el proceso de fresado químico se busca una corrosión por ataque uniforme. Esta tiene lugar con la misma intensidad en toda la superficie expuesta. Para ello es importante que la capa de óxido formada de forma natural se pierda y permita el contacto de sustancias ácidas o bases con el metal dando lugar al ataque del mismo. Microscópicamente, el ataque tiene lugar de forma aleatoria sobre la superficie, pero macroscópicamente se produce una pérdida de la capa de material “uniforme”. Esta capa se desprende de la pieza modificando lentamente el espesor del material de partida. Este proceso se puede realizar con materiales como el acero, níquel, titanio, aleaciones de cobre y magnesio, silicio o aluminio [6].

## 2.5 Fresado de aluminio

El fresado es una operación de mecanizado por arranque de viruta convencional. El mecanismo de arranque en esta tecnología es mecánico y los esfuerzos los realiza una herramienta afilada al entrar en contacto interrumpidamente con la pieza [10]. La herramienta suele ser multifilo y presenta varios dientes de corte. Además, su eje de rotación es perpendicular a la velocidad de avance. Este tipo de mecanizado se emplea para realizar múltiples operaciones con una alta tasa de productividad. Algunas de estas operaciones son el fresado periférico, el planeado, fresado frontal, el mecanizado de engranajes, ranurado, cajado, fresado de contornos, etc. [10].

Las condiciones de corte se determinan en función de la velocidad de corte y el avance principalmente. La velocidad de corte ( $V_c$ ) depende de la velocidad de giro del husillo ( $S$ ) y del diámetro de la herramienta ( $D$ ). Para calcularla se utiliza la ecuación (2.1).

$$S = \frac{V_c}{\pi D} \quad (2.1)$$

El avance marca el desplazamiento de la herramienta en función de algún parámetro o variable del mecanizado. En este caso se expresa en función del avance o desplazamiento por diente ( $f_z$ ) medido en mm/diente. Se relaciona con las revoluciones del husillo ( $N$ ) en rpm y el número de dientes ( $Z$ ) siguiendo la ecuación (2.2), para obtener el avance ( $f$ ) en mm/min.

$$f = N \cdot Z \cdot f_z \quad (2.2)$$

Los otros dos parámetros de principal influencia en el proceso son la profundidad de corte ( $a_p$ ) y la distancia entre pasadas ( $a_e$ ).

En las Tablas 2.4 y 2.5 se compendian las condiciones de corte recomendadas en [10] para el fresado de aleaciones de aluminio.

**Tabla 2.4** – Parámetros de corte recomendados para el fresado de aleaciones de aluminio con una herramienta de carburo de wolframio según la distancia entre pasadas

$a_e$ (mm)	Vc (m/min)	f (mm/diente)	Diámetro (mm)	Material de la hta
0,5	395	0,075	10	K20
1,5	305	0,102	10	K20

**Tabla 2.5** – Parámetros de corte recomendados para el fresado de aleaciones de aluminio con una herramienta de carburo de wolframio según la profundidad de corte

$a_p$ (mm)	Vc (m/min)	f (mm/diente)	Diámetro (mm)	Material de la hta
1	610	0,25	10	K10-K20
4	550	0,52	10	K10-K20

### 2.5.1 Fresado de alta velocidad

El mecanizado de alta velocidad o High Speed Machining (HSM) se describe en términos relativos pero considerando normalmente el mecanizado a una velocidad de giro al menos un 50% superior a la del mecanizado convencional [11]. Sin embargo, se pueden encontrar otras definiciones, por ejemplo, El-Hofy [12] define el HSM como el mecanizado de un material por encima de la velocidad a la cual la cizalladura se desarrolla totalmente fuera de la zona de cizalladura primaria. Asimismo, lo divide en tres rangos diferentes: alta (600–1800 m/min) muy alta (1800–18000m/min) y ultra alta (<18000m/min).

En ambos casos el objetivo es el mismo aumentar la tasa de arranque incrementando la velocidad de giro y el avance pero sin reducir la calidad o la precisión de la pieza. La principal consecuencia de esta técnica es la reducción del tiempo de operación disminuyendo los plazos de entrega y abaratando costes. Industrialmente se utiliza para mecanizar materiales refractarios o en mecanizados con una alta tasa de arranque [12].

El desarrollo histórico del HSM [12] comienza entre 1924 y 1931, cuando Salomón realiza una serie de test en aluminio llegando a alcanzar 16500 m/min en la velocidad de corte donde encuentra un determinado valor a partir del cual la temperatura del proceso desciende aunque la teoría ha sido motivo de falsas conjeturas sobre lo esperado en esta técnica y esta disminución de la temperatura no es aplicable a todos los materiales ni alcanza los rangos esperados por Salomón. En 1958 Vaugh estudió la importancia de una serie de variables que afectan a la “*maquinabilidad*” del material estudiando el tamaño y tipo de máquina, la herramienta de corte, la potencia disponible, el material y los parámetros de corte empleados.

En los años 70 unos experimentos llevados a cabo por la United State Navy demostraron que era económicamente viable introducir el HSM en la industria para mejorar la productividad y actualmente esta técnica se incluye entre las clasificadas como High Performance Machining empleándose para realizar operaciones de acabados de aceros y aluminio, mecanizado de piezas, y el mecanizado de moldes de acero.

Las principales características del proceso se enumeran a continuación.

1. Las fuerzas disminuyen al incrementar la velocidad de corte hasta un mínimo, que depende del material [12]. Después de este mínimo las fuerzas comienzan a crecer ligeramente.
2. La temperatura en la interfaz viruta-herramienta aumenta, aproximándose a la temperatura de fusión del material. En el análisis de esta se debe tener en cuenta que formación de la Viruta [12] es continua en metales con estructura BCC/FCC, alta difusión térmica y baja dureza, tales como aleaciones de aluminio y aceros de baja aleación.
3. El desgaste se debe principalmente a la disolución química y parcialmente a la alta velocidad de difusión. Por lo que se recomienda escoger herramientas estables químicamente a las temperaturas de fusión del material, facilitar la transición de la difusión en los regímenes de desgaste de la herramienta y aislar la herramienta de la pieza.

El defecto que aparece en las piezas es la rebaba generada por el proceso de corte. Generalmente es un proceso que se realiza en seco ya que con las herramientas actuales no es necesaria la lubricación, se reduce el impacto medio ambiental de la operación y el efecto del lubricante puede verse disminuido por las temperaturas alcanzadas en el proceso y si no es lubricación interna por la creación de una pantalla debida a la velocidad de giro de la herramienta que impide al lubricante llegar a la zona de contacto. Por otra parte se reduce el coste de la operación, el lubricante puede llegar a representar un 15-20% del coste total del proceso.

En rasgos generales el HSM aumenta la precisión del mecanizado, especialmente en el mecanizado de membranas o malla (redes, paneles de abeja) finos al reducir las fuerzas de corte [12]. Además, mejora el acabado superficial, las tolerancias dimensionales (0,02 que son las proporcionadas por la máquina), reduce la formación de rebaba, el tamaño de la viruta es menor y puede endurecer superficialmente la pieza.

Por otro lado si se realiza un estudio previo de lóbulos de estabilidad se puede obtener un mecanizado estable sin chatter y las bajas fuerzas de corte generan deflexiones de la herramienta bajas y coherentes, simplificando de esta forma el utillaje.

Finalmente se trata de una técnica flexible ya que los cambios se realizan por sistemas CAD/CAM.

Sin embargo los límites de alta velocidad están relacionados con la maquinaria más que con la vida de la herramienta al mecanizar aluminio, se necesita un sistema CNC de transferencia rápida de datos y los costes de mantenimiento de la maquinaria son elevados (mayor desgaste de guías y husillos). Por último, debido al tamaño de la viruta es necesario un sistema de aspiración, por lo que los costes en energía se incrementan.

### 2.5.2 HSM en piezas de pequeños espesores

Debido a la alta productividad del proceso, por las tasas de arranque, la disminución de las fuerzas de corte aplicadas, acompañadas de una disminución de las tensiones residuales inducidas a la pieza, los acabados superficiales obtenidos el HSM es la tecnología escogida para mecanizar paredes y suelos delgados de aluminio. Esta tecnología se ha estudiado detenidamente para el mecanizado de estructuras monolíticas aeronáuticas, piezas que presentan en algunos puntos características similares a las pieles.

Sin embargo, se trata de una tecnología aplicada para el mecanizado de piezas de pequeño espesor que presenta dos bloques diferentes de inconvenientes propios: la deformación elástica –influenciada a su vez, por las fuerzas de corte, las fuerzas de agarre (clamping), la temperatura de corte y las tensiones internas propias de la pieza–, y los problemas dinámicos, asociados generalmente al chatter regenerativo. Ambos afectan directamente a las tolerancias dimensionales y de acabado superficial obtenidas en la pieza.

#### 2.5.2.1 Problemas estáticos

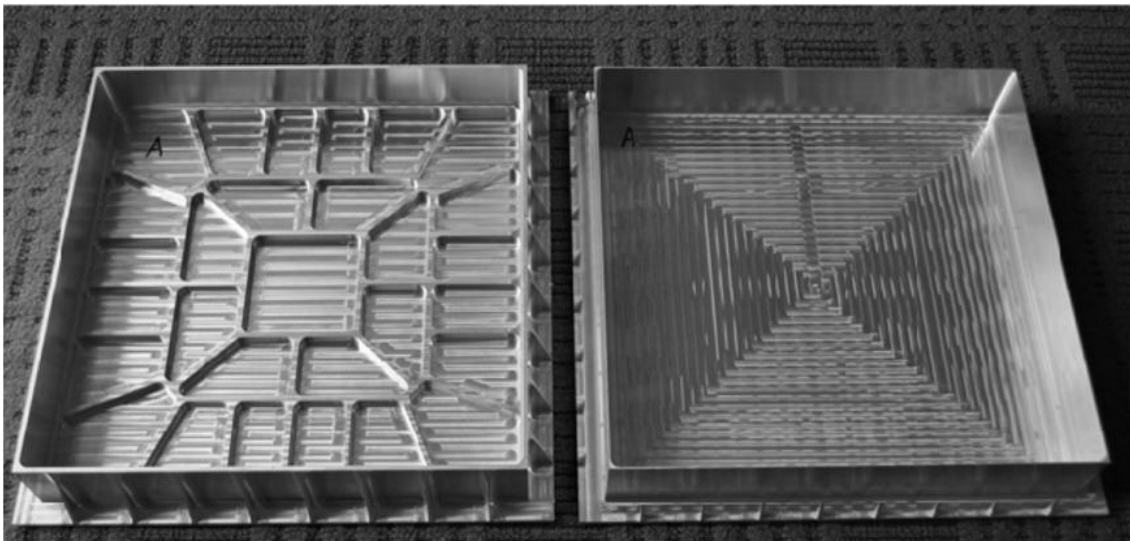
Son aquellos que engloban los problemas derivados de deformaciones de la pieza generadas durante el mecanizado. Estas flexiones disminuyen con el uso del HSM [7, 8], aunque su reducción puede no ser suficiente generando del mismo modo deformaciones. Éstas pueden estar debidas a una redistribución de tensiones residuales producidas durante el mecanizado o a la baja rigidez de la pieza, que a su vez disminuye durante el mecanizado [13]. Además se deben tener en cuenta las deformaciones relativas entre la herramienta y la pieza producidas por las fuerzas de corte, las características del proceso, los parámetros de mecanizado y el sistema de amarre.

Estos errores por flexión estática de la pieza o de la herramienta se traducen en geometrías finales distintas de las pretendidas inicialmente apareciendo habitualmente un exceso de material, o paredes y suelos de espesor variable [15]. Para disminuir estos efectos se suelen emplear dos métodos: estudiar las estrategias aplicadas intentando aumentar la rigidez del sistema o realizar simulaciones basados en modelos de comportamiento del sistema y aplicar sistemas de control adaptativo.

Existen diferentes formas de reducir la flexión de la pieza mediante la modificación de la estrategia de mecanizado, entre ellas están: aprovechar la rigidez proporcionada por el diseño, reducir las fuerzas mediante la modificación de trayectorias y utilizar sistemas de control adaptativo; sobre esto se amplía a continuación.

Aprovechando la rigidez de las zonas no mecanizadas (Figura 2.4) para reducir las deformaciones ocasionadas por el mecanizado [10, 11].

La creación de costillas durante el mecanizado, para ello se siguen unas estrategias específicas que permitan aumentar la rigidez de la pieza. En este caso no es una opción aplicable ya que las cajas a realizar son de dimensiones reducidas y uno de los objetivos es realizar el mecanizado en una sola pasada para minimizar los tiempos de operación.



**Figura 2.4** – Mecanizado de suelos y paredes delgadas utilizando estructuras rigidizadoras de sacrificio.  
Adaptado de [16]

Creando estrategias en cuyos caminos las fuerzas de mecanizado empleadas sean bajas. Estas fuerzas se controlan también mediante los parámetros de corte que afectan también a la aparición de vibraciones [18].

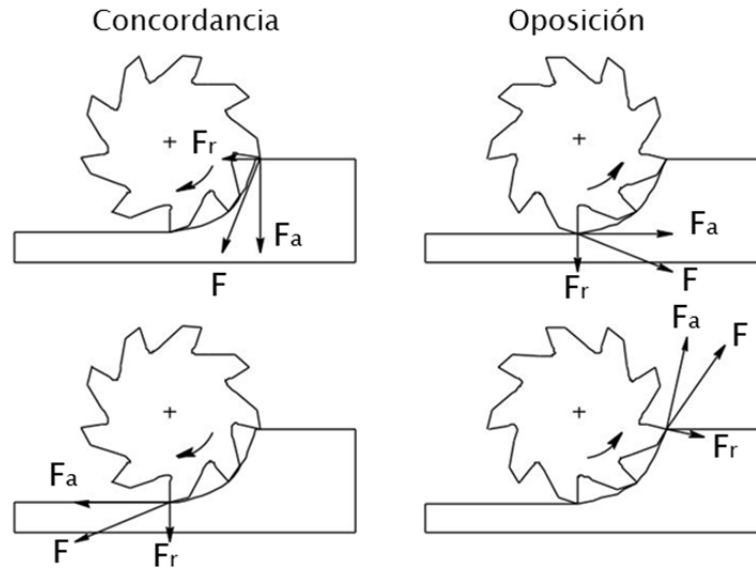
En cuanto a las estrategias propias de mecanizado, Popma [19] propone en su tesis una serie de resultados donde pone de manifiesto sobre todo el efecto del mecanizado en concordancia y en oposición. Los motivos que expone para defender el uso del mecanizado en concordancia frente al de oposición son que el mecanizado en oposición genera mayores vibraciones en la pieza al tirar de la zona más fina hacia la gruesa, sin embargo con estrategias en concordancia las fuerzas ejercidas empujan la pieza contra el utillaje reduciendo las vibraciones (Figura 2.5). Por tanto, la fuerza ejercida en el mecanizado en concordancia es más constante y mejora el acabado. Sin embargo, su estudio se aplica a paredes exclusivamente, mecanizado en el que las fuerzas que más intervienen son las axiales y no las tangenciales por lo que la aplicación de estos resultados en este estudio puede ser limitada.

Las trayectorias seguidas, Popma [19] propone realizar pasadas en zig-zag ya que al ser pasadas con menos cambios de cinemática deben dar una mayor estabilidad al corte, generan la misma cantidad de viruta, presentan menos cambios de dirección y afectan menos a la dinámica del sistema y favorecen una mayor constancia en la velocidad de avance.

Sin embargo, Campa [15] y Dvorak [20] proponen el uso de trayectorias en espiral de dentro hacia fuera, de forma que se mantenga constante la carga e viruta y se reduzca el chatter regenerativo al reducir la rigidez de la pieza al acercarse a las zonas menos amarradas y realizan el mecanizado en oposición.

El último método empleado es el uso de sistemas de control adaptativo[13–15] en los que se tienen en cuenta las deformaciones durante el mecanizado y corrijan las trayectorias de mecanizado. Estos presentan como inconveniente la diferenciación de las deformaciones permanentes, las térmicas y las

mecánicas recuperables. Para solventarlo J. Loehe y col. [24], proponen un sistema de medición óptico que permite diferenciar las flexiones de la pieza debidas a mecanismos mecánicos y térmicos.



**Figura 2.5** – Fuerzas en fresado en concordancia y en oposición.

Además, estos sistemas pueden realizarse de forma off-line utilizando simulaciones para controlar la flexión de la pieza. Para ello es necesario desarrollar modelos de comportamiento del sistema utilizando elementos finitos (Finite Elements Method, FEM). En estos modelos se definen las herramientas, fuerzas generadas –según modelos flexibles o estacionarios– y el comportamiento de la pieza en función de la eliminación del material [8,11,13-15,19-26]. En algún caso se utilizan también parámetros estadísticos basados en el comportamiento experimental de material y en función de los parámetros de corte empleados [33]. El sistema se termina definiendo las estrategias de mecanizado según los resultados obtenidos en las simulaciones y compensando las trayectorias para obtener los espesores deseados en el mecanizado de la pieza.

Los dos últimos casos se fundamentan en el estudio de las fuerzas ejercidas en el mecanizado. Para su predicción los métodos utilizados son:

- Cálculo por simulaciones y su posterior comprobación experimental: FEM de fuerzas estáticas [28,34,35], sistemas en base a voxler o artificial network aproachs [35,36] o sistemas flexibles de cálculo de fuerzas [37] que adaptan los resultados en función de la flexión de la pieza. Este último método se utiliza principalmente como modelo aproximativo del proceso y para reducir el número de ensayos necesarios a la hora de optimizar los parámetros de corte y las herramientas a utilizar.
- Diseño de modelos matemáticos predictivos con base en experimentales realizados [38].
- Medición off-line [39], permite medir las fuerzas reales ejercidas en la pieza durante el mecanizado utilizando sistemas dinamométricos para el cálculo de las fuerzas generadas en el mecanizado, es el método de aplicación directa a los sistemas adaptativos.

En las investigaciones de López de Lacalle y col. [39] se observa que según la rigidez de la pieza disminuye las fuerzas ejercidas se reducen. La aparición de chatter o vibraciones puede afectar también al valor de las fuerzas generadas.

Por otro lado el comportamiento de las fuerzas en las esquinas de los cajeados puede diferir del resto de las zonas, presentando picos que puede afectar a la calidad obtenida en el mecanizado. Por ello, Qiong y col. [38] proponen controlar la reducción de la velocidad del mecanizado al entrar en la esquina y aumentarla una vez se haya salido de esta terminado de mecanizar. El objetivo de este método es encontrar el punto de compromiso entre la efectividad y el acabado, eliminando a su vez la aparición de chatter, deformaciones y exceso de espesor mecanizado.

### *2.5.2.2 Problemas dinámicos*

El principal problema dinámico asociado a este proceso es la aparición de vibraciones regenerativas o chatter. Estas vibraciones aparecen cuando el golpeo de los filos de la herramienta produce que la viruta generada crezca de tamaño aumentando las fuerzas de corte. Este comportamiento se convierte en cíclico y se repite de forma periódica [9, 28]. Este fenómeno suele ir acompañado de una reducción de la calidad superficial y dimensional de la pieza mecanizada, así como de posibles roturas de herramienta o componentes mecánicos de la máquina.

Para reducir la generación de vibraciones se han propuesto metodologías que parten de la correcta elección de los parámetros de corte. Para ello, se han desarrollado diferentes modelos del estudio de los mismos, la mayoría de ellos centrados en el estudio de lóbulos de estabilidad obtenidos a partir de un análisis del comportamiento dinámico de la pieza durante el mecanizado. Estos estudios comienzan con la evaluación de la frecuencia natural del sistema en aquellas situaciones que se consideren críticas. A continuación, a partir de los datos analizados se generan los lóbulos de estabilidad en los cuales se presenta la velocidad de giro (frecuencia de golpeo de la herramienta dividida entre el número de dientes) frente a la profundidad de corte axial, un ejemplo de este tipo de gráficas está representado en el esquema de la Figura 2.6.

Este tipo de diagramas permite observar los intervalos de estabilidad del mecanizado para cada caso [28–31] y se suelen calcular en base a modelos matemáticos teniendo en cuenta tanto el material y su geometría, como las frecuencias naturales del sistema (máquina–herramienta–amarre) y los parámetros de corte empleados.

Estos diagramas son válidos para un momento determinado del mecanizado, por lo que su estudio se realiza en los instantes que se consideran críticos. En ellos se indican las inestabilidades a bajas velocidades (A) y a altas velocidades (C), donde se encuentra, en el caso del diagrama anterior, el sweet point o punto de mayor productividad [40]. Este sistema de análisis es una herramienta mediante la cual se escoge la velocidad de giro tomando como criterio que se encuentre en la zona blanca del diagrama para reducir la posibilidad de aparición de chatter.



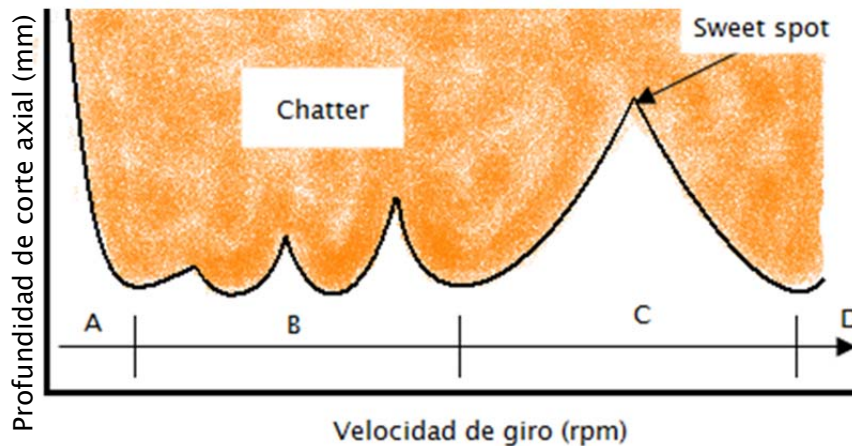


Figura 2.6 – Ejemplo de Diagrama de Lóbulos de estabilidad

A partir de esto, se debe escoger la geometría de herramienta correcta. En el caso del mecanizado de paredes, el uso de herramientas tóricas reduce las vibraciones [7], sin embargo, cuando se trata del mecanizado de suelos cuanto menor sea el radio de punta de las herramientas menores serán las vibraciones generadas. También es necesario escoger correctamente la geometría de la herramienta en función del material y el tipo de operación a realizar para controlar que la tasa de arranque no sea variable.

Una vez reducidas al máximo las vibraciones, y en el caso en el que sea necesario, se procede a la amortiguación de las vibraciones restantes. Existen dos sistemas principales de amortiguación, los sistemas pasivos y los activos. Los pasivos reducen las vibraciones producidas por la máquina y pueden ser amortiguadores de impacto, de fricción, materiales especiales con un mayor amortiguamiento interno o absorbentes mecánicos. También existen sistemas que incluyen una masa extra cerca del punto de máxima vibración para compensar la dinámica en el proceso. Los amortiguadores activos modifican el sistema de amarre induciendo fuerzas al mismo cuando las vibraciones aumentan. Con ellos, utilizando un sistema de control adaptativo, se aumenta la flexibilidad el sistema de amarre y favorecen el trabajo a diferentes velocidades a lo largo de la pieza.

Dentro de la documentación analizada se han observado distintos diseños para la amortiguación de vibraciones así como el uso de diferentes materiales. Woody y col. [44] proponen el uso de foam (espuma de poliuretano con memoria de forma) como material de amortiguación. Kolluru y col. [45] utilizan como material amortiguador el neopreno colocándolo en el sistema mediante unas piezas fijas situadas en puntos específicos para aumentar la rigidez de la pieza. En el análisis de este sistema se ha observado que la mayor influencia en la amortiguación la tienen los pesos superiores, por lo que la posición del material amortiguador es importante a la hora de definir el sistema de ajuste.

En los estudios realizados E. Díaz-Tena [18] y Rodríguez [46] se presenta como solución a las vibraciones el uso de materiales magnetorreológicos. Las principales limitaciones que presentan estos materiales es determinar previamente al mecanizado ciertos parámetros que aseguren la correcta amortiguación de la pieza. Estos parámetros son: la cantidad de fluido necesario, la distancia mínima

entre el utillaje base y la pieza, campo magnético a aplicar y el tamaño del “*pad*” que contiene el fluido. Los resultados de estos estudios permiten eliminar completamente las vibraciones durante el mecanizado.

Otra opción para amortiguar las vibraciones es recurrir al control adaptativo. Mediante un sistema de adquisición de señales de sonido que permita caracterizar las respuestas del sistema.

La última técnica empleada es el cambio continuo de la velocidad de giro reduciendo la aparición de chatter al romper la frecuencia constante de golpeo de la herramienta, aunque cabe destacar que su uso no está tan extendido en fresado ya que no siempre proporciona buenos resultados [40].

Como en el caso de los problemas estáticos, el proceso se estudia antes concienzudamente y su estudio se asiste con la realización simulaciones [29,30,35-39] que permitan aproximar lo máximo posible los lóbulos de estabilidad recogidos a los casos reales reduciendo el número de ensayos a prueba error. Esto es especialmente útil para la elección de parámetros y para determinar los instantes de mayor inestabilidad del sistema.

Estas simulaciones tratan sobre modelizaciones de las condiciones de corte para analizar las vibraciones obtenidas, los esfuerzos y la rugosidad final de la pieza. En ellas se incluyen las modelizaciones dinámicas para analizar el efecto de los elementos de amortiguación y generalmente su utilidad es la predicción de las vibraciones que tendrá el sistema[15].

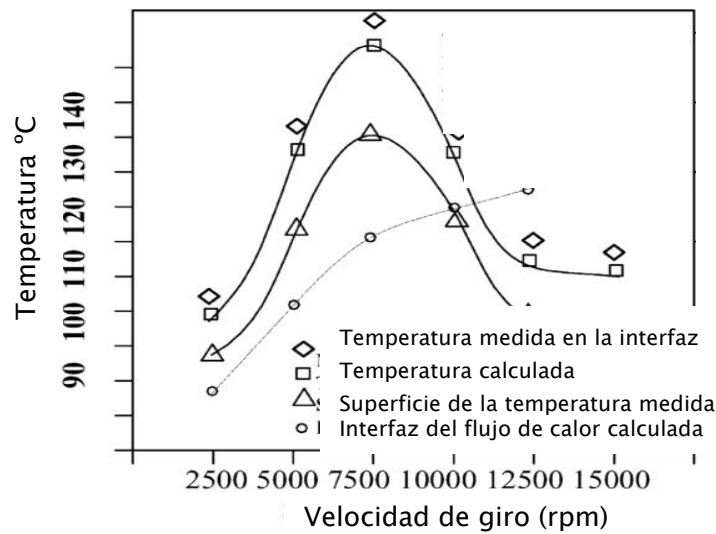
### **2.5.2.3 Temperatura**

La temperatura es un factor que afecta tanto a las dimensiones instantáneas de la pieza – dilatación de la pieza–, como a la combinación de las fuerzas de corte. Hay que analizarla en su conjunto dentro del proceso pero el único inconveniente que puede presentar es la exactitud de las simulaciones, especialmente en aquellas que evalúan la geometría final obtenida.

Esta característica del proceso está ligada al desgaste de la herramienta y a la aparición de tensiones residuales. Por ello, uno de los parámetros a controlar durante el mecanizado es la temperatura de corte, la cual depende a su vez de la velocidad del husillo (Figura 2.7).

Otro de los parámetros que influyen en la interfaz herramienta pieza es el espesor de la pieza. El caso de las pieles aeronáuticas se presenta como una ventaja, ya que la disipación del calor es mayor en este caso, aunque en la superficie pueden presentar de forma instantánea mayor temperatura y esto puede afectar a la integridad superficial de la pieza.

Igualmente, es necesario mantener constante la velocidad de avance para evitar la generación excesiva de temperatura y mantener alta la tasa de arranque [52]. A parte, la temperatura afecta a la herramienta y a las tensiones residuales generadas durante el mecanizado. Estos temas se tratarán en apartados posteriores.



**Figura 2.7** – Temperatura (°C) alcanzada en el mecanizado de una pared de aluminio de 3mm de espesor, medidos con un termómetro de infrarojos. Adaptada de [52]

## 2.6 Integridad superficial

El término integridad superficial aparece a partir de los años 70 donde W.P. Koster y col. [53] la definen como el concepto que cubre la caracterización y el control de todas las alteraciones posibles que se puedan producir en la capa superficial de la pieza durante el mecanizado, incluyendo los efectos en el funcionamiento en servicio de los componentes. Las variables que pueden afectar a la integridad superficial son: herramientas, material, condiciones de lubricación, las variables del proceso, los mecanismos de corte, vibraciones, desgaste de la herramienta, temperatura, etc.

Para analizarla y caracterizarla en los estudios de estos autores [53,54] se propone el análisis de la integridad superficial mediante el estudio de:

- Alteraciones Microestructurales
- Alteraciones de la Microdureza
- Generación de Tensiones Residuales
- Comportamiento a la Corrosión bajo tensión
- Comportamiento de Esfuerzo a Fatiga.

Asimismo, para la evaluación de todos los efectos, los autores proponen una serie de guías que permiten con pocos datos, evaluar la integridad superficial de los componentes críticos, en función del tipo de conjunto de datos y los ensayos realizados (ensayos de fatiga, mecánicos, deformaciones plásticas, etc.).

A su vez los estudios anteriores destacan el efecto de la vida de la herramienta en la integridad superficial y junto a ello, aconsejan que las condiciones de mecanizado escogidas sean aquellas que proporcionen una mayor vida de la herramienta o reduzcan la velocidad de desgaste de la misma. De esta forma, se reducen las alteraciones superficiales producidas por los cambios en la geometría de

la herramienta. La aportación de Griffiths [55] consiste en incluir en la definición de integridad superficial la relación existente entre ella y los mecanismos de corte. A partir de entonces, los estudios añaden el estudio de capas internas del material, como se observa en la definición propuesta por Atakhov [56]: “La integridad superficial en el sentido de la ingeniería puede ser definida por un conjunto de propiedades (superficiales y en profundidad) de la superficie ingenieril, que afecta al comportamiento de la superficie en servicio. Estas propiedades se incluyen inicialmente en el acabado superficial, la textura y el perfil; la resistencia a la fatiga, la corrosión y al desgaste; y las propiedades de adhesión y difusión. Cuando sea aplicable, se deben considerar otras propiedades físico-químicas del comportamiento en servicio.”

Este autor considera oportuno dividir los parámetros de la integridad superficial en:

- Parámetros Geométricos: Acabado superficial, textura, etc
- Parámetros Físicos: Microdureza, Tensiones Residuales, Microestructura
- Parámetros Químicos: Afinidad a la Oxidación, Adsorción, Polarización Superficial, etc.
- Parámetros Biológicos: Proliferación Celular, Fijación Celular

Y que la evaluación de estos parámetros debe realizarse teniendo en cuenta las condiciones de servicio de la pieza (fuerzas, temperaturas, tensiones de contacto y condiciones medioambientales).

Finalmente, en los estudios realizados por A. Gómez-Parra [57] se considera oportuno evaluar la integridad superficial a partir de las propiedades superficiales (microgeométricas, macrogeométricas y físico-químicas). Así mismo, los niveles de evaluación expuestos se recogen en la Tabla 2.6 y son los tomados como referencia para la propuesta metodológica de la evaluación de la probeta.

**Tabla 2.6 – Niveles de evaluación de la Integridad superficial en un proceso de torneado. Adaptado de [57]**

<b>Propiedades Microgeométricas</b>	<b>Propiedades Macrogeométricas</b>	<b>Propiedades Físico-Químicas</b>
Rugosidad Superficial	Cilindricidad	Microdureza
Microgrietas	Concentricidad	Transformaciones de Fases
Macrogrietas	Redondez	Deformaciones Plásticas
Ondulación Superficial	Rectitud	Tensiones Residuales
Partículas Adheridas	Paralelismo	Cambios de Fase del Material
	Oscilación Radial	
Desgarros Superficiales	Oscilación Total	Propiedades Mecánicas
		Resistencia a la Corrosión
		Resistencia a la Tracción
		Resistencia a la Fatiga

### 2.6.1 Propiedades Macrogeométricas

Los estudios que relacionan este campo con la integridad superficial son escasos, sin embargo, se considera necesario su estudio para relacionarlos con el comportamiento en servicio de la pieza, especialmente en situaciones de acoplamiento de piezas. En este caso se considera necesario analizar la rectitud, la planitud, la ondulación superficial y los defectos superficiales generados por el mecanizado obtenido así como evaluar su relación con los parámetros de corte empleados.

- Rectitud: El eje del cilindro debe estar comprendido en el interior de un cilindro cuyo diámetro sea el valor de la tolerancia.
- Planitud: La superficie superior del prisma debe estar comprendida entre dos planos paralelos entre sí y separados una distancia igual al valor de la tolerancia.
- Ondulación superficial: es la medida correspondiente a la evaluación de la forma del perfil de ondulación, refiriéndose a concavidad, convexidad u otro tipo de perfil. Es un parámetro complementario a la rectitud que da información geométrica de la superficie de forma cualitativa y no cuantitativa.

En cuanto a los defectos superficiales generados pueden ser picaduras de pequeñas dimensiones, arañosos o adhesiones de viruta. Estos se evaluarán si han sido producidos por el mecanizado y no por una incorrecta de la probeta. Los criterios de aceptación se basarán en los máximos definidos por los criterios de aceptación para las piezas de fresado químico que se describieron al inicio de este capítulo.

### 2.6.2 Propiedades Microgeométricas

Son aquellas que recogen todos los análisis basados en las técnicas de topografía superficial o las que históricamente se han relacionado con la calidad superficial, normas de rugosidad, etc. Además de las características mencionadas en la Tabla 2.6, Ginting y Nouari [58] proponen la evaluación de las siguientes características:

- Separación de la Superficie (Tearing Surface): efecto generado por el BUE que puede producir arañosos.
- Formación de Capa de Viruta (Chip Layer Formation) adherida a la superficie mecanizada.
- Marcas de Avance (Feed Mark): aparición de surcos en la base del material mecanizado mostrando la trayectoria seguida por la herramienta.

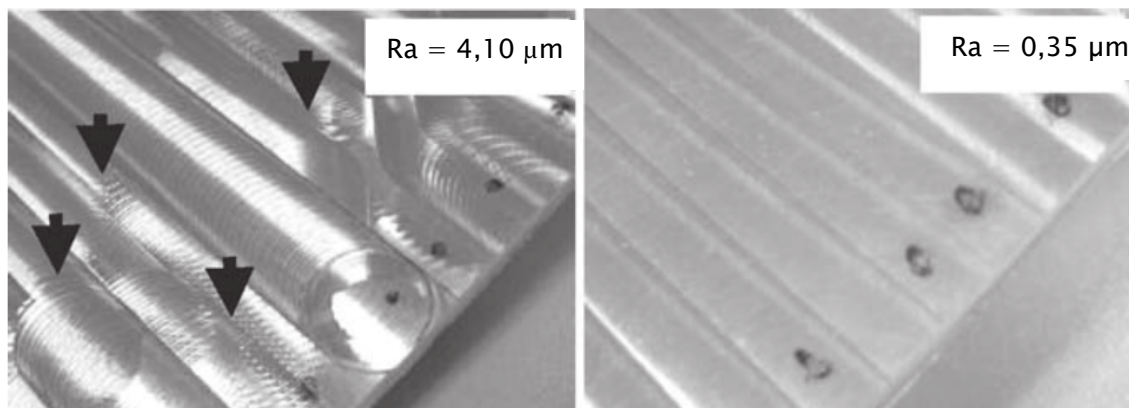
Las dos primeras se tendrán en cuenta dentro de las propiedades físico-químicas. Las marcas de avance podrían evaluarse aunque al no buscar un acabado especular estas estarán casi siempre presente mostrando las trayectorias como se muestra en la Figura 2.8.

Igualmente, dentro de estas propiedades se considera necesaria la evaluación de los perfiles topográficos y de la rugosidad.



**Figura 2.8** – Ejemplo de marcas de avance donde se contempla la trayectoria de la herramienta, entrada en el centro, trayectoria de dentro hacia fuera y salida en la esquina inferior derecha

La importancia de la evaluación de la rugosidad en las piezas se debe al ser un criterio impuesto industrialmente para la aceptación de las piezas. También, es utilizado como método de detección de chatter durante la operación (Figura 2.9). Campa y col. [7] alcanzan a obtener 0,06mm de desviación en el mecanizado de suelos y un máximo de 0,3 $\mu$ m de Ra al disminuir el chatter en la pieza.



**Figura 2.9** – Influencia de las trayectorias en el mecanizado de suelos. Adaptado de [7]

Para la evaluación de la rugosidad se han utilizado los parámetros definidos en la norma UNE-EN ISO 4287 [59], concretando en aquellos que evalúan la línea media del perfil y la distribución de amplitud de las curvas.

- Ra (desviación media aritmética) media aritmética de los valores absolutos de las ordenadas del perfil de rugosidad comprendidas en la longitud de muestreo.
- Rt (altura total del perfil) suma de la máxima altura de valle y de pico comprendida en la longitud de evaluación.
- Rsk (factor de asimetría o sesgo), media entre el cubo de los valores de ordenadas y el cubo del parámetro Rq. Muestra la influencia de picos y valles aislados. En el caso de un perfil aleatorio el resultado de este parámetro sería cero al estar las alturas distribuidas de forma simétrica a lo largo de la superficie. Es un parámetro que permite discriminar entre varios procesos de mecanizado, el fresado suele presentar un sesgo negativo [60].

- Rku (factor de aplastamiento o curtosis) cociente entre la media de los valores de las ordenadas elevados a la cuarta potencia entre el valor del parámetro Rq elevado también a la cuarta potencia. La curtosis evalúa el grado de concentración de los valores entorno a la zona central de la distribución. Este valor será mayor a tres cuando el perfil congregue cerca de la media y aparezcan, de forma ocasional, picos o valles muy pronunciados. Si el perfil se congrega en los extremos el Rku será menor que 3 [60].

### 2.6.3 Propiedades Físico-químicas

En este apartado se consideran dos bloques principales. El primero engloba la microdureza, cambios microestructurales y tensiones residuales. El segundo es el referente a las propiedades mecánicas e incluye: resistencia a la corrosión, resistencia a la tracción y resistencia a la fatiga. Estas propiedades se proponen como parámetros de estudio para a líneas futuras unidas a la capacidad de anodizado y la de adherencia de pintura.

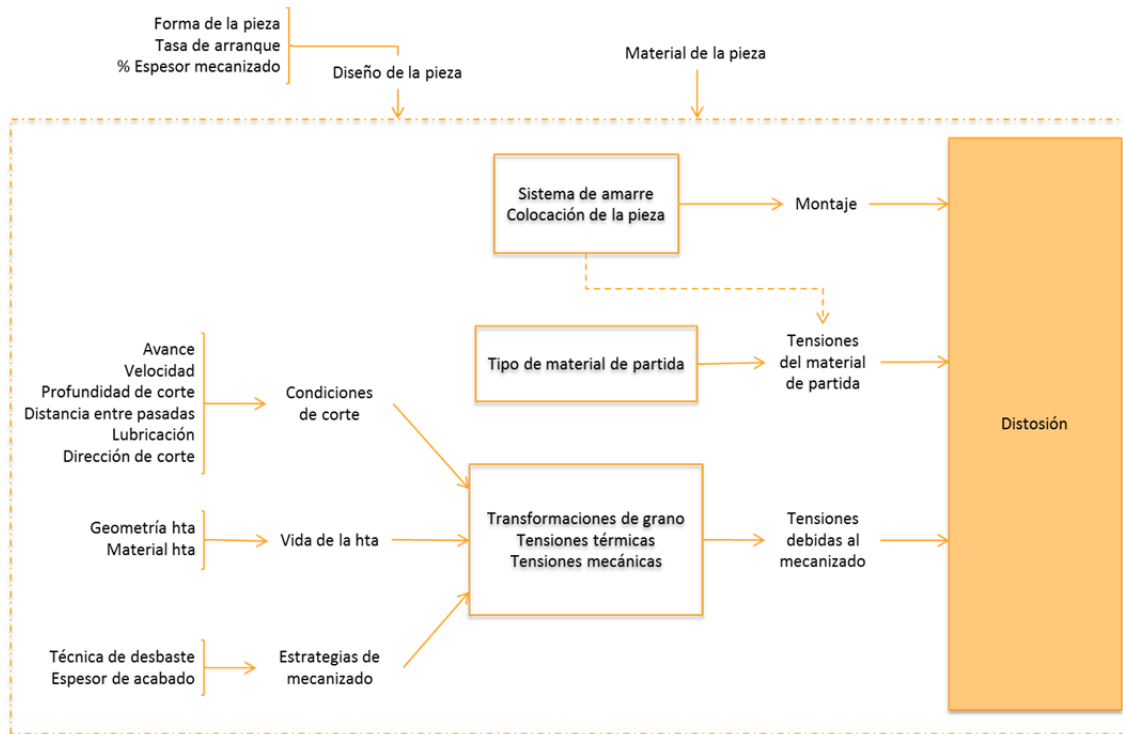
La mayor parte de los estudios encontrados referentes a la integridad superficial en el mecanizado de paredes delgadas están relacionados con las tensiones residuales. Estas comprenden a las tensiones retenidas en un cuerpo cuando no actúa ninguna fuerza externa [61] o gradiente térmico sobre él. Pueden estar presentes en la pieza antes de mecanizado por los procesos de fabricación u operaciones, realizados previamente para conformar la pieza, o ser inducidas durante el mecanizado o incluso aparecer durante el comportamiento en servicio de la pieza. Asimismo, durante el mecanizado puede también liberar las tensiones existentes o redistribuirlas, de forma que el comportamiento tras el mecanizado de la pieza varíe.

Las tensiones residuales que existentes en la pieza pueden ser causantes de deformaciones posteriores al mecanizado por lo que se debería poder determinar cómo afecta el mecanizado en la generación o alivio de las tensiones residuales para poder determinar el comportamiento en servicio de la pieza. Principalmente, afectan a una pequeña capa superficial de material, ya que la variación del efecto de las fuerzas de corte es mayor en esta zona y por tanto, cuanto menor sea el espesor de la pieza, mayores serán las deformaciones producidas en las pieles por las tensiones residuales [62]. En este aspecto el HSM presenta características similares al FQ, aunque este segundo proceso no induce tensiones por lo que el comportamiento de la pieza puede ser diferente generando distintos tipos de alabeos o torsiones de la pieza según el tamaño y el estado de la misma.

Por este motivo en el caso de las pieles aeronáuticas se puede considerar que las tensiones residuales afectan a la totalidad de la pieza, espesor máximo 1mm, en algunos casos pueden representar un 66% del espesor total [63]. En el estudio de Jiang et al. [64] las tensiones residuales afectan hasta 0,5 mm de profundidad desde la superficie mecanizada con  $\pm 20$ MPa. Sin embargo en el estudio de J.F. Chatelain et al. [65] el efecto de las tensiones residuales desaparece a los 0,1mm de espesor.

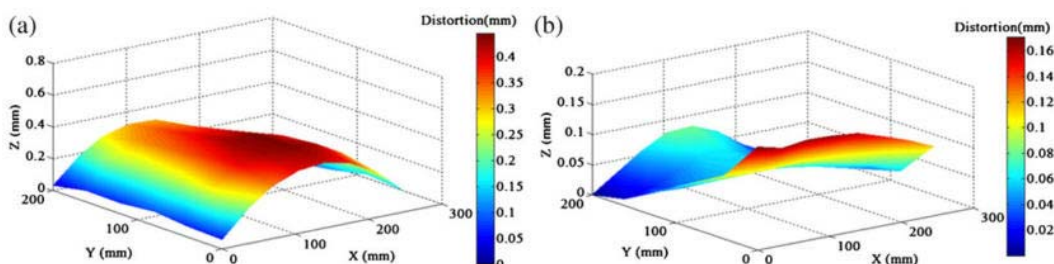
Para obtener un mejor control de las mismas se han estudiado los motivos de su aparición. Las tensiones generadas en el mecanizado se deben a las deformaciones plásticas producidas por las fuerzas de corte y a las temperaturas presentes durante la operación. J. F. Chatelain y col [65] expone

que estas tensiones también pueden ser debidas a un cambio de volumen derivado del cambio de fase del material generado por las altas temperaturas alcanzadas durante la operación. Es decir, suelen ser consecuencia de condiciones agresivas de corte, motivo por el que en los talleres, se suelen intentar reducir suavizando estas condiciones lo máximo posible. Pero los factores que afectan a la generación de las tensiones son múltiples como se muestra en la Figura 2.10.



**Figura 2.10.** –Diagrama de algunos de los parámetros que afectan más frecuentemente a la aparición de tensiones residuales en el mecanizado de paredes delgadas. Adaptado de [65]

Por ejemplo, Jiang et al. [64] presentan una comparativa donde evalúan la acción del diámetro de la herramienta sobre las fuerzas de corte ejercidas en la pieza y las tensiones residuales inducidas. En este caso se pone de manifiesto que las tensiones residuales se reducen según aumenta el diámetro de la herramienta y se comprueba, además, que la distribución de estas es más uniforme a lo largo de la pieza. Esto presenta una segunda ventaja ya que el ratio de material eliminado es mayor y por tanto no obliga a renunciar a la productividad del proceso a favor del acabado, tanto en aspectos de rugosidad como de geometría, deformación (Figura 2.11).



**Figura 2.11** – Distribución de las tensiones residuales durante el mecanizado con una herramienta de radio 6 y otra de diámetro 12. Deformaciones generadas por las tensiones residuales anteriores para las dos herramientas a)  $\phi$  6mm y b)  $\phi$  12mm. Adaptada de [64].



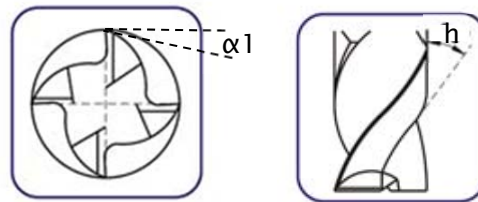
## 2.7 Herramientas

Las características principales que determinan el comportamiento de la herramienta son la geometría y el material. La geometría es la que permite optimizar las operaciones de corte y el material delimita las fuerzas máximas empleadas, la temperatura máxima a alcanzar en el proceso, ambas influyen en su desgaste.

En el caso de los procesos de fresado, los elementos que definen la geometría son el diámetro y los ángulos característicos. En la Tabla 2.7 se muestran una serie de recomendaciones [10] para la geometría de una fresa para el mecanizado de aluminio de diámetro 10 mm.

Tabla 2.7 – Ángulos de las herramientas

Diámetro hta (mm)	Incidencia primario ( $\alpha_1$ )	Incidencia secundario ( $\alpha_2$ )	Ángulo de hélice (h)
10	11-13	18-25	35-45°



Las herramientas utilizadas en el mecanizado pueden estar constituidas por aceros al carbono y de media aleación, aceros rápidos, metal duro y cerámicos. Para mejorar las características de las herramientas, éstas pueden estar recubiertas aleaciones de cobalto fundidas, carburos, cerámicos a base de alúmina, o nitruro de boro cúbico, cerámicas a base de nitruro de silicio, diamante y materiales reforzados con *whiskers* [1, 4].

A continuación, se exponen los tipos de herramientas utilizadas en el mecanizado de paredes delgadas (Tabla 2.8) resumiendo los valores en rangos de diámetro, ángulos de hélice, ángulos de incidencia, ángulos de desprendimiento, número de dientes y radio de punta.

Tabla 2.8 – Resumen de las herramientas utilizadas en la bibliografía consultada [13-32,42,43,45,47,48,68-77]

Tipo fresa	Frontal Tórica Punta de bola
Material base	Carburos sin recubrimiento
Diámetro (mm)	6-20
Ángulo de hélice	30°, 40°, 45°
Ángulo de incidencia	4°-10°
Ángulo de desprendimiento	14°-26°
Número de dientes	2-4
Radio de punta (mm)	0.06-0.7, 2.5

## 2.8 Utillaje de amarre

Debido a las características de las piezas que se desean mecanizar se ha considerado necesario definir para el estudio del utillaje de amarre dos parámetros: el ajuste (acoplamiento base de la pieza al sistema de amarre) y sujeción, sistema de amarre lateral que impide el desplazamiento de la pieza en el plano XY, en el caso de probetas planas. Ambos parámetros son de vital importancia en el mecanizado de piezas ya que definen el acabado superficial de las piezas y permite reducir las vibraciones generadas en el sistema y la deflexión de la pieza, obteniendo mayor precisión, en cuanto a tolerancias dimensionales.

Una de las consideraciones a tener en cuenta en el diseño del utillaje es la necesidad de utilizar un sistema de amarre flexible que se adapten geometrías complejas.

### 2.8.1 Evolución del diseño del utillaje de amarre y amortiguación

Tradicionalmente, se han utilizado sujeciones mecánicas en distintos puntos exteriores de la estructura, de forma que algunos de estos puntos sirvan también para el correcto ajuste de la pieza pero siendo insuficientes para eliminar las deformaciones debidas a las fuerzas ejercidas sobre la pieza durante el mecanizado y aumentando por tanto, los problemas dinámicos derivados de las vibraciones producidas durante el mecanizado. Esto obliga al uso de elementos de ajuste que sirvan a su vez de amortiguadores y a utilizar estrategias de mecanizado más elaboradas para aumentar la rigidez de la pieza. Estas estrategias pueden aumentar los tiempos de mecanizado y las trayectorias en vacío y en muchos casos no ser suficientes para disminuir al máximo o eliminar los problemas anteriormente mencionados.

Desde 1997 [78] se buscan dispositivos de fijación flexibles que se adapten a la pieza y reparta las fuerzas ejercidas sobre ella durante el corte. Se han desarrollado diferentes conceptos y en el 2000 estos dispositivos comienzan a enfocarse hacia la autorespuesta frente a las fuerzas de corte para evitar deformaciones derivadas de fuerzas de sujeción excesivas [79].

Paralelamente, S. Herranz y col. [7], presentan como solución a los problemas dinámicos el ajuste de las estructuras a mecanizar mediante fijaciones por vacío. Walczyk y col. proponen un sistema de ajuste por apoyo en pines reconfigurables [80] simulado a escala de laboratorio por Aoyama y col. [81]. A partir de este momento, la mayor parte de la literatura consultada se basa en la realización de simulaciones previas de las operaciones de corte para calcular las posiciones adecuadas de los pines y el número necesario de estos, centrándose en los efectos producidos en el fresado periférico y buscando especialmente estudia el apoyo de paredes verticales [79,82-85].

En esta misma línea, pero a menor escala, T Aoyatoma y col. [81] diseñaron un dispositivo cuyo funcionamiento se basa en la fijación de la pieza por apoyo en varios pines cuya altura ha sido fijada por el enfriamiento de una aleación de baja temperatura de fusión inferior a los 180°C (Indium o Bismuth). Este sistema presenta un contacto uniforme con la fuerza en el soporte de forma que la precisión de posicionamiento es muy alta y se reducen las deformaciones debidas a las fuerzas de

corte, aunque el estudio no marca las fuerzas máximas de aplicación soportadas por el dispositivo. El dispositivo de este estudio sirve para pequeñas piezas (de 50–100g) que sufrirán pequeñas deformaciones en Z (de 1.5  $\mu\text{m}$ ). Está probado en una piel de aluminio de 1mm de espesor. La aleación funciona también como amortiguador de los golpes, puede servir para reducir vibraciones. Sin embargo, se trata de un proceso tedioso para su implementación a nivel industrial.

### 2.8.2 Equipos para el fresado de pieles

Los estudios anteriormente expuestos hablan de equipos a escala de laboratorio y de prototipos, a continuación se presenta la maquinaria industrial empleada actualmente para el amarre de las piezas durante el mecanizado de grandes estructuras: alas, fuselajes, etc.

Industrialmente se han diseñado distintas máquinas de sujeción y ajuste de grandes estructuras para su mecanizado. Esta maquinaria busca disminuir las interferencias pieza-herramienta y permite la fabricación de piezas más complejas al proporcionar un amarre más flexible de las mismas.

En la actualidad es difícil encontrar equipos industriales que permitan abordar el mecanizado de pieles metálicas. En la Tabla 2.9 se observan las soluciones presentadas por cuatro casas distintas, mtorres, Dufieux, CMSNA y Modif UHF.

**Tabla 2.9** – Resumen de las soluciones en maquinaria de amarre propuesto por 4 empresas para el mecanizado de grandes estructuras.

	CONFIGURACION DE MECANIZADO	UTILLAJE	SOPORTE	MEDICION DE ESPESOR
<b>MTORRES</b>	Horizontal	Vacío o abrazadera	móvil sincronizado	por ultrasonidos durante el fresado
<b>DUFIEUX</b>	Horizontal	Amarre lateral	móvil sincronizado	–
<b>CMSNA</b>	Vertical	Amarre lateral	móvil estático	por ultrasonidos antes del fresado
<b>MODIG</b>	Vertical	Vacío con ventosas	fijo	–

Cabe destacar que la medición del espesor real de la pieza sólo se realiza en algunas de ellas y en todo caso por sistemas de ultrasonidos que pueden verse influidos por los líquidos utilizados y la aparición de viruta durante el proceso. Además estos sistemas obligan a utilizar dos cabezales encareciendo considerablemente el precio de la maquinaria y limitándola a un único tipo de operación para su amortización. Por ello se propone un sistema de medición por sensor láser que permita obtener de forma on-line el espesor antes y después del mecanizado y de la horizontalidad

del corte teniendo información in situ de las propiedades del proceso y reduciendo costes de verificación y evaluación off-line.

### 2.8.2.1 MTorres

Uno de los equipos más significativos es el diseñado por MTorres®, que en su catálogo, presenta como alternativa al fresado químico la TORRES SURFACE MILLING – FRESADORA SUPERFICIAL, –“una máquina diseñada para disminuir mecánicamente el espesor del revestimiento, proceso que solía realizarse mediante fresado químico” [86], representada en la Figura 2.12.



**Figura 2.12** – Sistema para fresado de pieles de MTORESS [86]

La máquina se compone de dos cabezales para asegurar el correcto amarre de la pieza de esta forma que uno de los cabezales mecaniza (TORRESMILL® de 5 ejes, Figura 2.13) y el otro sirve de mesa móvil de apoyo, utillaje flexible TORRESTOOL®, para aumentar la rigidez de la pieza. Por último la máquina tiene una columna de configuración de 5 ejes TORRESHOLDER en la parte posterior de la estructura.



**Figura 2.13** – Cabezal de fresado TORRESMILL® [86]

Las tres máquinas trabajan de manera simultánea. Mientras que TORRESTOOL® sujeta el panel en el espacio, TORRESMILL® lleva a cabo el fresado superficial de las cajeras del panel. De forma simultánea, y trabajando de forma interpolada con TORRESMILL®, el dispositivo TORRESHOLDER® (Figura 2.14) sujeta el panel desde la parte posterior para, por un lado, evitar las deflexiones durante el fresado y, por el otro, medir en tiempo real el espesor real del panel mediante un sistema de medición por ultrasonido, tipo pulso/eco, con el fin de garantizar que TORRESMILL® no comete errores por exceso en el proceso de fresado y que mantiene la precisión del grosor del panel final.

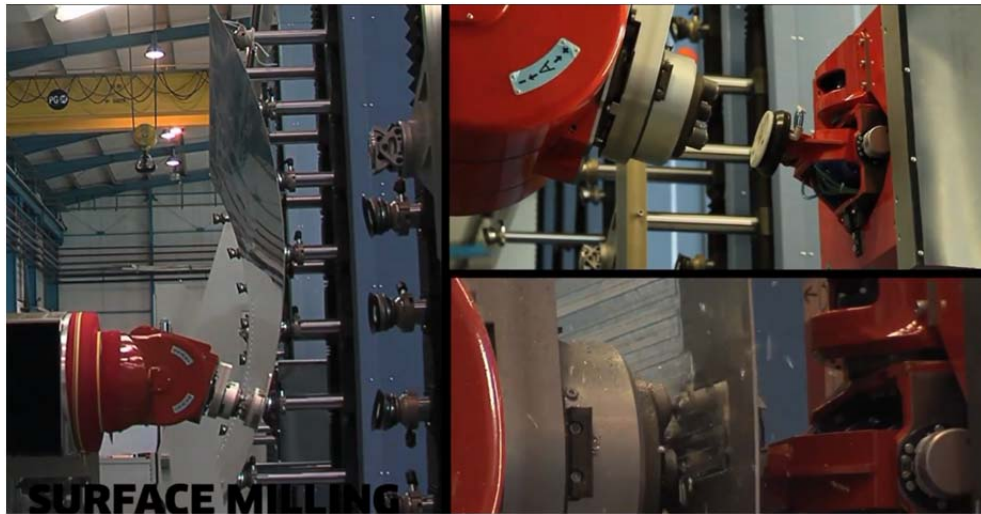


Figura 2.14 – Cabezal de fresado TORRESMILL® y columna TORRESHOLDER® [86]

### 2.8.2.2 DUFIEUX EN GAP (Green Advanced Panels) PROJECT

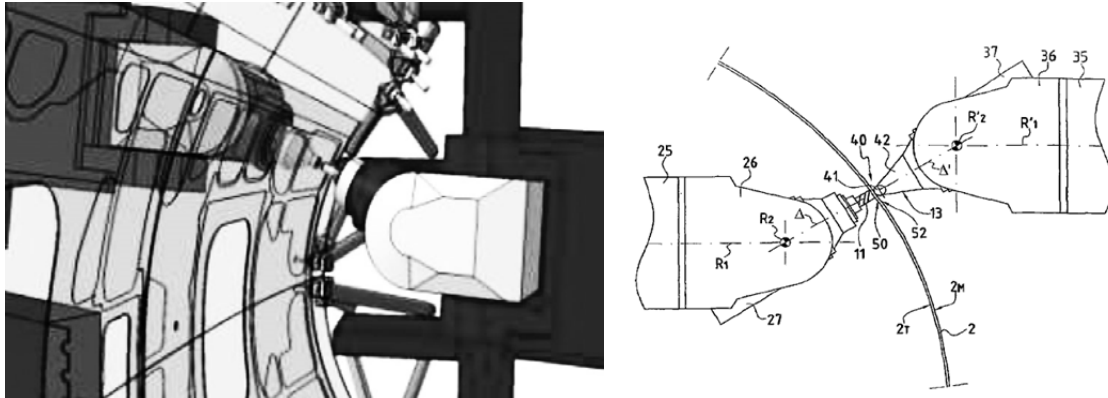
Otro de los equipos referentes en el contexto del mecanizado es el propuesto por Dufieux, una empresa dedicada al diseño y fabricación de máquina herramienta de gran tamaño para fresado, torneado, mandrinado y aplicaciones de alta velocidad.

En 2007–2008 esta empresa colaboró con AIRBUS en el proyecto GAP [87] para desarrollar el mecanizado mecánico de paneles de doble curvatura. El modelo F5X1 (Figura 2.15) es su propuesta para sustituir de una manera rápida el fresado químico convencional de paneles por el fresado mecánico. Este modelo puede procesar paneles de 6,5 m de longitud y 2,5 m de ancho ampliables hasta 19 m de largo y 4 m de ancho. La piel se amarra por los laterales (Figura 2.15) y dos cabezales a cada lado de la piel se mueven de forma sincronizada.



Figura 2.15 – Aluminium skin fuselage / Milling Mirror System. Solución desarrollada por Dufieux conjuntamente con Airbus para el fresado de pieles [88]

El cabezal posterior es un módulo de 6 ejes que sirve de apoyo y que está enfrentado y perfectamente sincronizado con el cabezal de fresado (Figura 2.16). No se ha encontrado información sobre el método empleado para la medición del espesor de la piel.

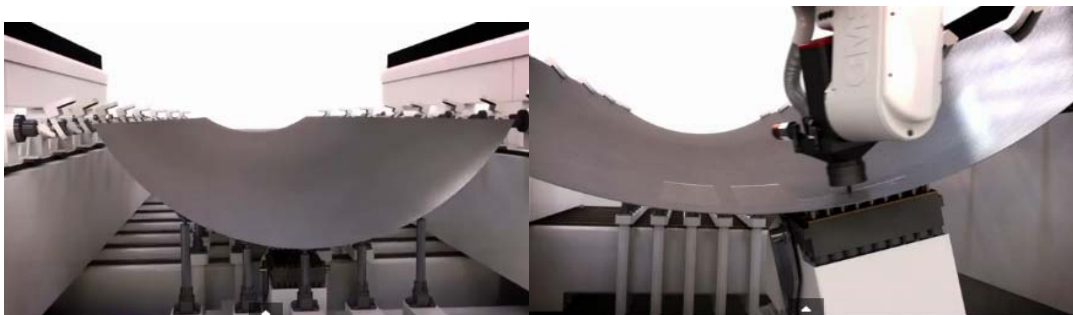


**Figura 2.16** – Cabezales de fresado y apoyo enfrentados y sincronizados y esquema de funcionamiento presentado en la patente. Solución de Dufieux y Airbus [88]

### 2.8.2.3 CMS NORTH AMERICA (CMSNA)

Un equipo con disposición horizontal de las piezas es el diseñado por CMSNA, una empresa norteamericana especializada en soluciones integradas de centros de mecanizado de alto rendimiento.

La propuesta de CMSNA para el mecanizado de pieles es “CMSNA’s Aluminum Skin Thickness Reduction System” (Figura 2.17). Este sistema se compone de un utillaje móvil y discreto que sirve como soporte durante el fresado y está controlado en X-Y-Z y en ángulo para adaptarse a la geometría de la pieza. La piel se posiciona al inicio mediante un conjunto de pistones regulables en altura que se retiran una vez que la piel se amarra lateralmente.



**Figura 2.17** – Solución de CMSNA para el fresado de pieles de aluminio, Posicionamiento de la pieza por pines y amarre superior y mecanizado con los dos cabezales móviles [89]

La medición del espesor es previa al mecanizado. Los cabezales de apoyo inferiores (utillaje móvil y discreto) que sujetan la porción de panel a mecanizar, miden también el espesor de la pieza en todos los puntos de apoyo antes del mecanizado (Figura 2.18).

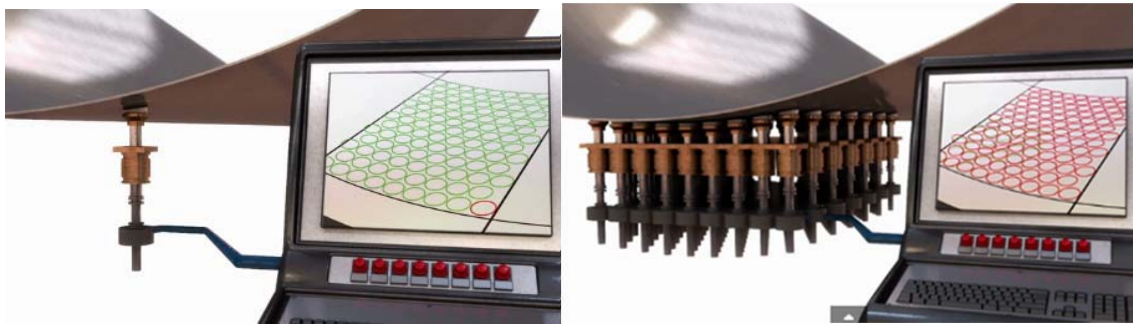


Figura 2.18 – Medición de piel previa al fresado–Sistema CMSNA [89]

#### 2.8.2.4 MODIG MACHINE TOOL

Modig es una empresa Sueca dedicada a la fabricación de equipamiento para la producción de elementos del sector aeronáutico. Está orientada a equipamientos para mecanizado de alta velocidad, cuya propuesta es el Modig Universal Holding Fixture Skin (Figura 2.19).

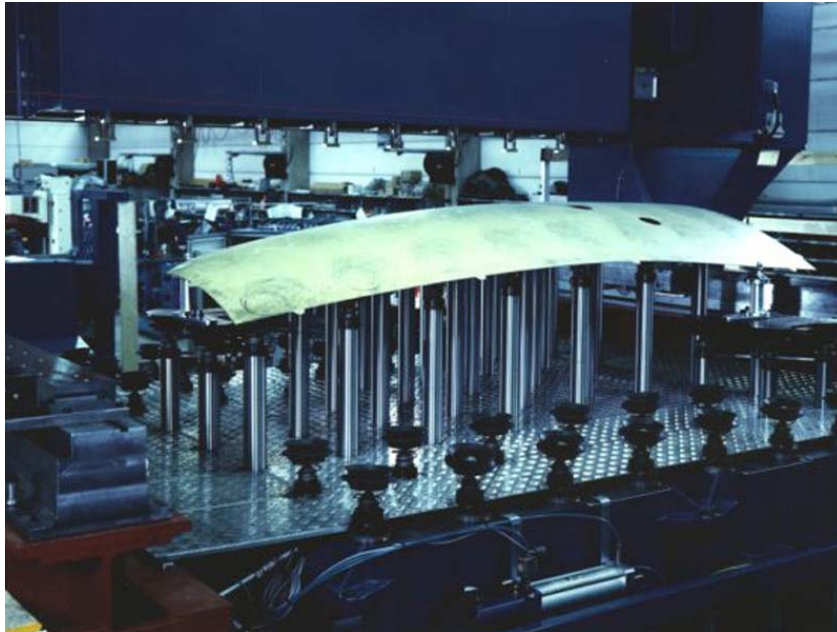
Se trata de un sistema de sujeción basado en cilindros telescópicos con un cabezal con “ventosas” que permiten el movimiento flexible facilitando su adaptación a la geometría de la pieza. Las ventosas del utillaje se pre-posicionan desde el pórtico de la estructura gantry de la máquina mediante un sistema de 8 ejes controlados en Z que accionan cada uno de los 8 pistones de una fila. El posicionamiento de los cilindros se realiza fila a fila, bloqueando el sistema cuando este llega a su posición, en este momento, la pieza será la referencia en cada punto de amarre (Figura 2.20). Cada punto de amarre bascula mediante una rotula con un ángulo de 45°. La ventosa de vacío está diseñada para ser flexible y amarrar las piezas con el ángulo de referencia.



Figura 2.19 – Máquina de MODIG para el fresado de pieles [90]

El vacío cuando se está mecanizando y están diseñados para soportar una carga mayor al peso de la pieza y absorber de esta forma las fuerzas del mecanizado [90].

El diámetro de cada poste es de 80 mm y el recorrido vertical es de 750 mm, además, estos postes pueden ser activados durante el proceso de mecanizado permitiendo una retracción de 100 mm para permitir el paso de las herramientas y reposicionándose tan pronto como la herramienta haya pasado y aplicando el accionamiento del vacío.



**Figura 2.20** – Posicionamiento / amarre de piel en la máquina Modig [90]

Aunque se ha de tener en cuenta que la fijación por ventosas de vacío no es recomendable en piezas de superficies libre (free-form surfaces) a no ser que la ventosa de vacío incluya articulaciones superiores que faciliten su adaptación a la pieza [16–18]. Este método permite reducir elementos de amarre, el efecto vacío es suficiente, y sirve en sí mismo como amortiguador, el efecto vacío y las ventosas son suficientes. Son fácilmente automatizables y la adaptación de los apoyos regulable en posición (X e Y) y altura según la pieza. Funcionan generalmente también con pines intermedios por lo que se realiza igualmente un correcto apoyo de la pieza durante el mecanizado.

Para optimizar el uso de este tipo de utillaje Lu Junbai et al. [91] presentan un algoritmo para la distribución correcta de los puntos de carga del utillaje. Estos puntos de apoyo se distribuyen en función de la posición de las zonas a mecanizar para evitar las deformaciones debidas a las fuerzas de corte. Disminuyen además los tiempos de producción y está bastante automatizado. Se trata de un sistema flexible por lo que facilita la colocación de las piezas y facilita utilizar la estrategia forming-machining frente a la machining-forming que presenta más defectos dimensionales [91].

## 2.9 Conclusiones

El apartado anterior proporciona una síntesis completa del mecanizado por fresado de estructuras de esbeltez elevada de aluminio. Se expone así una visión global del proceso que permite analizar la



viabilidad del mismo. Para ello, se han definido las características de las piezas, el mecanizado (convencional y de alta velocidad) empleado para fabricarlas, las herramientas y las opciones de utillaje estudiadas hasta el momento.

En concreto se han detectado una serie de fenómenos que pueden afectar a las características finales de la piel:

- Aparición de desviaciones ligadas a fenómenos estáticos, aquellas derivadas de la estrategia de mecanizado.
- Aparición de chatter o vibraciones en la pieza, ligadas a las características dinámicas del sistema.
- Cambios en las propiedades relacionados con la transferencia de temperatura del proceso.
- Variaciones en la integridad superficial con respecto a las iniciales de la pieza y cuyos valores se han de fijar según los requisitos de diseño.

Asimismo, se ha comprobado que el mecanizado de pieles, pese a encontrar algunos equipos industriales, no ha sido estudiado en profundidad no encontrando publicaciones relacionadas con este campo. La bibliografía utilizada como base para la redacción de este capítulo está ligada a mecanizado de estructuras, generalmente monolíticas, de esbeltez elevada definidas como paredes delgadas, y en algún caso excepcional se trata el mecanizado de suelos delgados. Estas investigaciones han aumentado de forma considerable a lo largo de los últimos diez años, sin incluir en ningún caso el mecanizado de pieles como tal. Todo esto expone la necesidad de esta propuesta metodológica para el mecanizado de pieles metálicas para comenzar un estudio que profundice en este campo.

## 2.10 Bibliografía

- [1] Federal Aviation Administration. Pilot's Handbook of Aeronautical Knowledge n.d. [https://www.faa.gov/regulations\\_policies/handbooks\\_manuals/aviation/pilot\\_handbook/](https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aviation/pilot_handbook/) (accessed July 3, 2015).
- [2] Regulations FA. Aircraft Structure. Pilot Handb., n.d., p. 1-16.
- [3] Rodriguez V, Nuñez M, Rodal P. Fresado químico en el sector aeroespacial ventajas e inconvenientes. IMHE 2008.
- [4] Çakir O, Yardimeden a, Özben T. Chemical machining 2007;28:499-502.
- [5] Topmak. Metodología practica para la optimización de arranque de material en fresado n.d.:1-6. <http://www.topmak.com.mx/art%3ADculos-de-inter%3%A9s/vibraciones-mec%3%A1nicas/>.

- [6] El-Hofy H. *Advanced Machining Processes: Nontraditional and Hybrid Machining Processes*. McGraw Hill Professional; 2005.
- [7] Herranz S, Campa FJ, de Lacalle LNL, Rivero a, Lamikiz a, Ukar E, et al. The milling of airframe components with low rigidity: a general approach to avoid static and dynamic problems. *Proc Inst Mech Eng Part B J Eng Manuf* 2005;219:789–801. doi:10.1243/095440505X32742.
- [8] Departamento de Defensa de EEUU. *Military Handbook. Metallic Materials and elements for Aerospace Vehicle Structures*. 5ª Edición. EEUU: Departamento de Defensa de EEUU; 1998.
- [9] ASM Material Data Sheet n.d. <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MA7075T73> (accessed May 31, 2015).
- [10] ASM Metal HandBook. n.d.
- [11] Arnone M. *Mecanizado alta velocidad y gran precisión*. 2000.
- [12] El-Hofy HA-G. *Fundamentals of Machining Processes: Conventional and Nonconventional Processes*. CRC Press; 2006.
- [13] DONG H, KE Y. Study on Machining Deformation of Aircraft Monolithic Component by FEM and Experiment. *Chinese J Aeronaut* 2006;19:247–54. doi:10.1016/S1000-9361(11)60352-X.
- [14] Rai JK, Xirouchakis P. Finite element method based machining simulation environment for analyzing part errors induced during milling of thin-walled components. *Int J Mach Tools Manuf* 2008;48:629–43. doi:10.1016/j.ijmachtools.2007.11.004.
- [15] F.J. Campa. *METODOLOGÍA PARA LA PREDICCIÓN DE LA ESTABILIDAD DINÁMICA EN EL MECANIZADO DE ALTA VELOCIDAD DE SUELOS DELGADOS*. Universidad del País Vasco, 2009.
- [16] Smith S, Wilhelm R, Dutterer B, Cherukuri H, Goel G. Sacrificial structure preforms for thin part machining. *CIRP Ann – Manuf Technol* 2012;61:379–82. doi:10.1016/j.cirp.2012.03.142.
- [17] Ning H, Zhigang W, Chengyu J, Bing Z. Finite element method analysis and control stratagem for machining deformation of thin-walled components. *J Mater Process Technol* 2003;139:332–6. doi:10.1016/S0924-0136(03)00550-8.
- [18] Díaz-Tena E, Marcaide LNL, Gómez FJC, Bocanegra DLC. Use of Magnetorheological Fluids for Vibration Reduction on the Milling of Thin Floor Parts. *Procedia Eng* 2013;63:835–42. doi:10.1016/j.proeng.2013.08.252.
- [19] Popma M. *Computer aided process planning for high-speed milling of thin-walled parts*. University of Twente, 2010. doi:10.3990/1.9789036530408.

- [20] Smith S, Dvorak D. Tool path strategies for high speed milling aluminum workpieces with thin webs. *Mechatronics* 1998;8:291–300. doi:10.1016/S0957-4158(97)00058-5.
- [21] Wan X-J, Hua L, Wang X-F, Peng Q-Z, Qin X. An error control approach to tool path adjustment conforming to the deformation of thin-walled workpiece. *Int J Mach Tools Manuf* 2011;51:221–9. doi:10.1016/j.ijmachtools.2010.11.007.
- [22] Guiassa R, Mayer JRR. Predictive compliance based model for compensation in multi-pass milling by on-machine probing. *CIRP Ann – Manuf Technol* 2011;60:391–4. doi:10.1016/j.cirp.2011.03.123.
- [23] Ratchev S, Liu S, Becker AA. Error compensation strategy in milling flexible thin-wall parts. *J Mater Process Technol* 2005;162–163:673–81. doi:10.1016/j.jmatprotec.2005.02.192.
- [24] Loehe J, Zaeh MF, Roesch O. In-Process Deformation Measurement of Thin-walled Workpieces. *Procedia CIRP* 2012;1:546–51. doi:10.1016/j.procir.2012.04.097.
- [25] Tsai J-S, Liao C-L. Finite-element modeling of static surface errors in the peripheral milling of thin-walled workpieces. *J Mater Process Technol* 1999;94:235–46. doi:10.1016/S0924-0136(99)00109-0.
- [26] Ratchev S, Govender E, Nikov S. Towards deflection prediction and compensation in machining of low-rigidity parts. *Proc Inst Mech Eng Part B J Eng Manuf* 2002;216:129–34. doi:10.1243/0954405021519636.
- [27] Ratchev S, Liu S, Huang W, Becker AA. Milling error prediction and compensation in machining of low-rigidity parts. *Int J Mach Tools Manuf* 2004;44:1629–41. doi:10.1016/j.ijmachtools.2004.06.001.
- [28] Aijun T, Zhanqiang L. Deformations of thin-walled plate due to static end milling force. *J Mater Process Technol* 2008;206:345–51. doi:10.1016/j.jmatprotec.2007.12.089.
- [29] Chen W, Xue J, Tang D, Chen H, Qu S. Deformation prediction and error compensation in multilayer milling processes for thin-walled parts. *Int J Mach Tools Manuf* 2009;49:859–64. doi:10.1016/j.ijmachtools.2009.05.006.
- [30] Gang L. Study on deformation of titanium thin-walled part in milling process. *J Mater Process Technol* 2009;209:2788–93. doi:10.1016/j.jmatprotec.2008.06.029.
- [31] Izamshah R, Mo JPT, Ding S. Hybrid deflection prediction on machining thin-wall monolithic aerospace components. *Proc Inst Mech Eng Part B J Eng Manuf* 2011;226:592–605. doi:10.1177/0954405411425443.

- [32] Kang Y-G, Wang Z-Q. Two efficient iterative algorithms for error prediction in peripheral milling of thin-walled workpieces considering the in-cutting chip. *Int J Mach Tools Manuf* 2013;73:55-61. doi:10.1016/j.ijmachtools.2013.06.001.
- [33] Izamshah RA. Hybrid Deflection Prediction for Machining Thin-Wall Titanium Alloy Aerospace Component. RMIT, 2011.
- [34] Wan M, Zhang WH. Calculations of chip thickness and cutting forces in flexible end milling. *Int J Adv Manuf Technol* 2006;29:637-47. doi:10.1007/s00170-005-2572-6.
- [35] Ratchev S, Liu S, Huang W, Becker AA. A flexible force model for end milling of low-rigidity parts. *J Mater Process Technol* 2004;153-154:134-8. doi:10.1016/j.jmatprotec.2004.04.300.
- [36] Ratchev S, Govender E, Nikov S, Phuah K, Tsiklos G. Force and deflection modelling in milling of low-rigidity complex parts. *J Mater Process Technol* 2003;143-144:796-801. doi:10.1016/S0924-0136(03)00382-0.
- [37] Qi H, Tian Y, Zhang D. Machining forces prediction for peripheral milling of low-rigidity component with curved geometry. *Int J Adv Manuf Technol* 2012;64:1599-610. doi:10.1007/s00170-012-4126-z.
- [38] Qiong W, Yidu Z, Hongwei Z. Corner-milling of Thin Walled Cavities on Aeronautical Components. *Chinese J Aeronaut* 2009;22:677-84. doi:10.1016/S1000-9361(08)60158-2.
- [39] Lacalle LNL de, Lamikiz A, Sánchez JA, Bustos IF de. Recording of real cutting forces along the milling of complex parts. *Mechatronics* 2006;16:21-32. doi:10.1016/j.mechatronics.2005.09.001.
- [40] Iglesias A. Vibraciones: un enemigo vencible. *IMHE* 2015;125.
- [41] Scippa A, Grossi N, Campatelli G. FEM based Cutting Velocity Selection for Thin Walled Part Machining. *Procedia CIRP* 2014;14:287-92. doi:10.1016/j.procir.2014.03.023.
- [42] Campa FJ, López de Lacalle LN, Lamikiz a., Sánchez J a. Selection of cutting conditions for a stable milling of flexible parts with bull-nose end mills. *J Mater Process Technol* 2007;191:279-82. doi:10.1016/j.jmatprotec.2007.03.023.
- [43] Bolsunovskiy S, Vermel V, Gubanov G, Kacharava I, Kudryashov A. Thin-Walled Part Machining Process Parameters Optimization based on Finite-Element Modeling of Workpiece Vibrations. *Procedia CIRP* 2013;8:276-80. doi:10.1016/j.procir.2013.06.102.
- [44] Woody SC, Smith ST. Damping of a thin-walled honeycomb structure using energy absorbing foam. *J Sound Vib* 2006;291:491-502. doi:10.1016/j.jsv.2005.06.001.

- [45] Kolluru K, Axinte D, Becker A. A solution for minimising vibrations in milling of thin walled casings by applying dampers to workpiece surface. *CIRP Ann – Manuf Technol* 2013;62:415–8. doi:10.1016/j.cirp.2013.03.136.
- [46] Rodríguez M de la O, Collado V, Porrás E, Mazquiarán C. Utillaje flexible basado en fluidos Magnetorheológicos para el fresado de largueros aeronáuticos. *IMHE* 2014;403:42–9.
- [47] Arnaud L, Gonzalo O, Seguy S, Jauregi H, Peigné G. Simulation of low rigidity part machining applied to thin-walled structures. *Int J Adv Manuf Technol* 2010;54:479–88. doi:10.1007/s00170-010-2976-9.
- [48] Elbestawi MA, Sagherian R. Dynamic modeling for the prediction of surface errors in the milling of thin-walled sections. *J Mater Process Technol* 1991;25:215–28. doi:10.1016/0924-0136(91)90090-2.
- [49] Tang A, Liu Z. Three-dimensional stability lobe and maximum material removal rate in end milling of thin-walled plate. *Int J Adv Manuf Technol* 2009;43:33–9. doi:10.1007/s00170-008-1695-y.
- [50] Seguy S, Campa FJ, Lopez de Lacalle LN, Arnaud L, Dessein G, Aramendi G. Toolpath dependent stability lobes for the milling of thin-walled parts. *Int J Mach Mach Mater* 2008;4:377–92. doi:10.1504/IJMMM.2008.023720.
- [51] Thevenot V, Arnaud L, Dessein G, Cazenave-Larroche G. Integration of dynamic behaviour variations in the stability lobes method: 3D lobes construction and application to thin-walled structure milling. *Int J Adv Manuf Technol* 2006;27:638–44. doi:10.1007/s00170-004-2241-1.
- [52] Ming C, Fanghong S, Haili W, Renwei Y, Zhenghong Q, Shuqiao Z. Experimental research on the dynamic characteristics of the cutting temperature in the process of high-speed milling. *J Mater Process Technol* 2003;138:468–71. doi:10.1016/S0924-0136(03)00120-1.
- [53] Koster WP, Field M, Kahles JF, Fritz LJ, Gatto LR. *Surface Integrity of Machined Structural Components* 1970.
- [54] Koster WP, Field M, Kohls JB, Fritz LJ, Gatto LR. *Manufacturing Methods for Surface Integrity Machined Structural Components* 1972.
- [55] Griffiths B. *Manufacturing Surface Technology: Surface Integrity and Functional Performance*. vol. 2001. Primera Ed. Oxford (U.K): Kogan Page Science; 2001.
- [56] Davim JP. *Surface Integrity in Machining*. 2010.

- [57] Gómez-Parra A. Estudio de la Influencia del Mecanizado en Procesos de Fatiga Asistida por Corrosión en el Comportamiento en Servicio de Aleaciones de Aluminio de uso Estratégico en la Industria Aeronáutica. Universidad de Cádiz (España), 2015.
- [58] Ginting A, Nouari M. Surface integrity of dry machined titanium alloys. *Int J Mach Tools Manuf* 2009;49:325-32. doi:10.1016/j.ijmachtools.2008.10.011.
- [59] UNE-EN ISO 4287 "Especificación geométrica de productos. Calidad superficial: Método del perfil. Términos, definiciones y parámetros del estado superficial n.d. file:///C:/Users/Irene Del Sol/Downloads/UNE-EN\_ISO\_4287=1999.pdf (accessed June 1, 2015).
- [60] García D. PFC-Propuesta de metodología de análisis metrológico para la caracterización superficial a partir de parámetros de rugosidad. Universidad de Cádiz (España), 2009.
- [61] Withers PJ. Residual stress and its role in failure. *Reports Prog Phys* 2007;70:2211-64. doi:10.1088/0034-4885/70/12/R04.
- [62] WANG Z, CHEN W, ZHANG Y, CHEN Z, LIU Q. Study on the Machining Distortion of Thin-walled Part Caused by Redistribution of Residual Stress. *Chinese J Aeronaut* 2005;18:175-9. doi:10.1016/S1000-9361(11)60325-7.
- [63] Young KA. Machining-induced Residual Stress and Distortion of Thin Parts. 2005.
- [64] Jiang X, Li B, Yang J, Zuo XY. Effects of tool diameters on the residual stress and distortion induced by milling of thin-walled part. *Int J Adv Manuf Technol* 2013;68:175-86. doi:10.1007/s00170-012-4717-8.
- [65] Jean-François Chatelain, Jean-François Lalonde, Antoine S. Tahan. Effect of Residual Stresses Embedded within workpieces on the distortion of parts after machining. *Int J Mech* 2012;6(1):43-51.
- [66] Groover MP. Fundamentos de la Manufactura moderna. 3th editio. D. F. México (Méjico): McGraw-Hill; 2007.
- [67] Kalpakjian S, Schmid SR. Manufactura, ingeniería y tecnología. Cuarta Edi. Naucalpan de Juárez (Méjico): Pearson Educacion; 2008.
- [68] Guo H, Zuo DW, Wu HB, Xu F, Tong GQ. Prediction on milling distortion for aero-multi-frame parts. *Mater Sci Eng A* 2009;499:230-3. doi:10.1016/j.msea.2007.11.137.
- [69] Lei Z, Wuyi C, Jianfei S. The Influence of Machining Path on Machining Deformation of Thin-Walled Parts. Hiroshima: Japan Soc Precision Engineering-Jspe; 2012.

- [70] Adetoro OB, Sim WM, Wen PH. An improved prediction of stability lobes using nonlinear thin wall dynamics. *J Mater Process Technol* 2010;210:969–79. doi:10.1016/j.jmatprotec.2010.02.009.
- [71] Biermann D, Kersting P, Surmann T. A general approach to simulating workpiece vibrations during five-axis milling of turbine blades. *CIRP Ann – Manuf Technol* 2010;59:125–8. doi:10.1016/j.cirp.2010.03.057.
- [72] Bravo U, Altuzarra O, López de Lacalle LN, Sánchez J a., Campa FJ. Stability limits of milling considering the flexibility of the workpiece and the machine. *Int J Mach Tools Manuf* 2005;45:1669–80. doi:10.1016/j.ijmachtools.2005.03.004.
- [73] Campa FJ, Seguy S, Lacalle LNL De, Arnaud L, Dessein G, Aramendi G. Stable Milling of Thin-Walled Parts with Variable Dynamics 2007:1–6.
- [74] Quintana G, Campa FJ, Ciurana J, de Lacalle LNL. Productivity improvement through chatter-free milling in workshops. *Proc Inst Mech Eng Part B J Eng Manuf* 2011;225:1163–74. doi:10.1177/2041297510393621.
- [75] Huang N, Bi Q, Wang Y, Sun C. 5-Axis adaptive flank milling of flexible thin-walled parts based on the on-machine measurement. *Int J Mach Tools Manuf* 2014;84:1–8. doi:10.1016/j.ijmachtools.2014.04.004.
- [76] Kolluru K V., Axinte DA, Raffles MH, Becker AA. Vibration suppression and coupled interaction study in milling of thin wall casings in the presence of tuned mass dampers. *Proc Inst Mech Eng Part B J Eng Manuf* 2013;228:826–36. doi:10.1177/0954405413508769.
- [77] Kolluru K, Axinte D. Coupled interaction of dynamic responses of tool and workpiece in thin wall milling. *J Mater Process Technol* 2013;213:1565–74. doi:10.1016/j.jmatprotec.2013.03.018.
- [78] Sela MN, Gaudry O, Dombre E, Benhabib PB. A reconfigurable modular fixturing system for thin-walled flexible objects. *Int J Adv Manuf Technol* 1997;13:611–7. doi:10.1007/BF01350819.
- [79] Nee AYC, Kumar AS, Tao ZJ. An intelligent fixture with a dynamic clamping scheme. *Proc Inst Mech Eng Part B J Eng Manuf* 2000;214:183–96. doi:10.1243/0954405001517577.
- [80] Walczyk DF, Longtin RS. Fixturing of Compliant Parts Using a Matrix of Reconfigurable Pins. *J Manuf Sci Eng* 2000;122:766–72. doi:10.1115/1.1314599.
- [81] Aoyama T, Kakinuma Y. Development of Fixture Devices for Thin and Compliant Workpieces. *CIRP Ann – Manuf Technol* 2005;54:325–8. doi:10.1016/S0007-8506(07)60114-0.

- [82] Zeng S, Wan X, Li W, Yin Z, Xiong Y. A novel approach to fixture design on suppressing machining vibration of flexible workpiece. *Int J Mach Tools Manuf* 2012;58:29-43. doi:10.1016/j.ijmachtools.2012.02.008.
- [83] Wan X-J, Zhang Y, Huang X-D. Investigation of influence of fixture layout on dynamic response of thin-wall multi-framed work-piece in machining. *Int J Mach Tools Manuf* 2013;75:87-99. doi:10.1016/j.ijmachtools.2013.09.008.
- [84] Liu SG, Jin Q, Wang P. Effect of additional supports on surface errors in the peripheral milling of a flexible workpiece. *Int J Mater Prod Technol* 2008;31:214-23. doi:10.1504/IJMPT.2008.018021.
- [85] Liu S, Zheng L, Zhang ZH, Wen DH. Optimal fixture design in peripheral milling of thin-walled workpiece. *Int J Adv Manuf Technol* 2006;28:653-8. doi:10.1007/s00170-004-2425-8.
- [86] Mtorres. Surface Milling Machining 2014. <http://www.mtorres.es/en/aeronautics/products/metallic/torres-surface-milling>.
- [87] European Commission. ENVIROMENT Life Programme n.d. [http://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=home.createPage&s\\_ref=LIFE05](http://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=home.createPage&s_ref=LIFE05)  
ENV/F/000062&area=2&yr=2005&n\_proj\_id=2858&cfid=687868&cftoken=d8b5e6e77f9d52ef-F97BDE32-BE96-365D-F79874977610BC5F&mode=print&menu=false#Top (accessed June 3, 2015).
- [88] Dufieux. Dufieux Industrie - Modular n.d. <http://www.dufieux-industrie.com/index.php/en/main-production-stream/modular> (accessed June 3, 2015).
- [89] CMS North America Inc. New CNC Technology: Aluminum Skin Thickness Reduction System | CMS North America Blog n.d. <http://www.cmsna.com/blog/2013/09/cmsnas-aluminum-skin-thickness-reduction-system/> (accessed June 3, 2015).
- [90] UTILLAJES FLEXIBLES PARA MECANIZADO DE PIELES PARA EL SECTOR AERONÁUTICO UHF - SKIN 2014. <http://www.maquinariainternacional.com/maquinaria/de/utillaje-flexible-para-mecanizado-uhf-skin.asp?cod=515&nombre=515&nodo=&orden=True&sesion=1&id=2>.
- [91] Junbai L, Kai Z. Multi-point location theory, method, and application for flexible tooling system in aircraft manufacturing. *Int J Adv Manuf Technol* 2010;54:729-36. doi:10.1007/s00170-010-2974-y.



## Capítulo 3

---

### Metodología

---

### 3. Metodología

---

### 3.1. Introducción

Este capítulo pretende establecer una metodología para la realización de ensayos en el mecanizado de pieles de aluminio. Esta metodología es la base de la investigación y pretende optimizar el uso de los recursos disponibles.

Para ello, se ha definido una codificación de los ensayos y se describen todos los elementos los elementos que influyen en la realización de los mismos, sistema de amarre, probeta, herramientas, estrategias y parámetros de corte que se emplearán. Del mismo modo, se describe el proceso seguido para el mecanizado de las probetas junto con el sistema de monitorización y los elementos empleados. Finalmente se propone un protocolo de evaluación de las probetas y se mencionan posibles líneas futuras de este trabajo y su efecto en la metodología propuesta. En la Figura 3.1 se muestra el diagrama de flujo seguido en el diseño de la metodología.

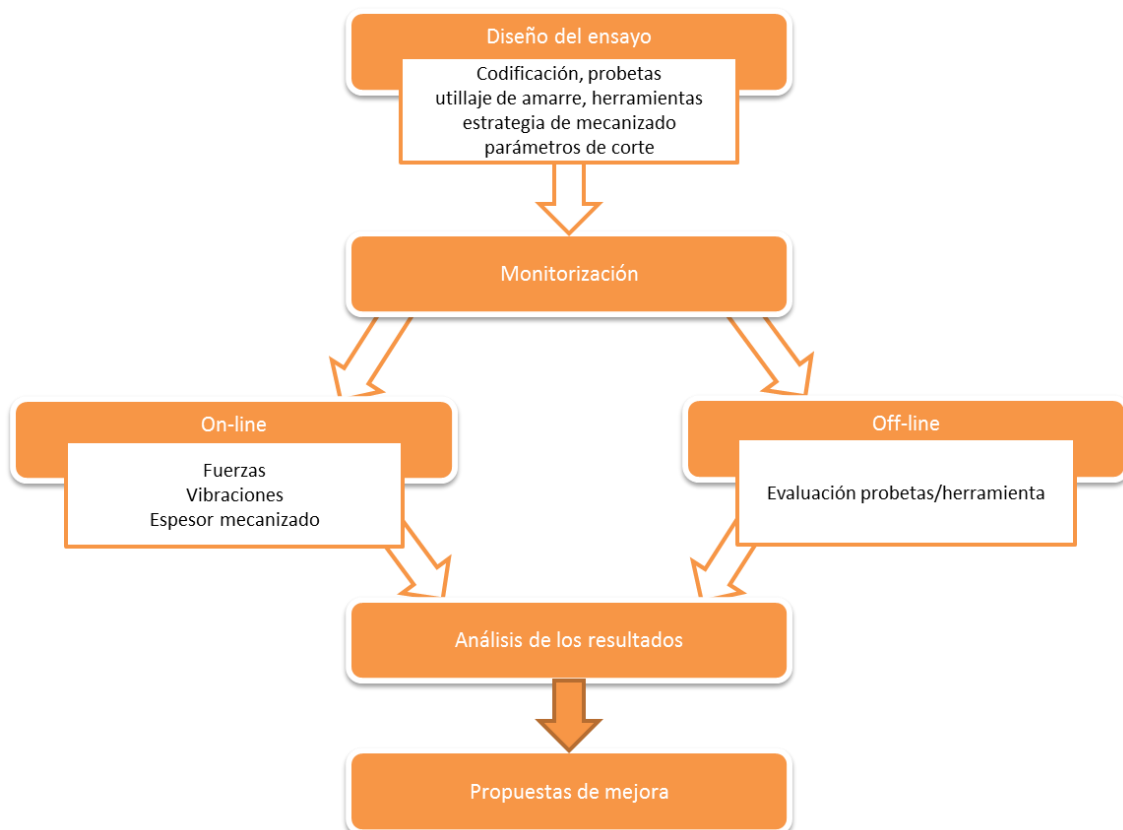


Figura 3.1 – Diagrama de flujo de la metodología general del trabajo

### 3.2. Codificación de ensayos

La codificación para nombrar los ensayos tiene que recoger las características principales del mismo y facilitar su identificación en todos los archivos generados tanto de los sistemas de adquisición de datos como de los obtenidos al analizar las probetas. Se ha considerado que los datos básicos que debe mostrar el código de identificación de cada ensayo son:

- Tecnología empleada (HSM)
- Espesor de la piel
- Herramienta utilizada
- Número del ensayo
- Posición de la cajera

En los ensayos de mecanizado la nomenclatura del ensayo seguirá la del ejemplo de la Figura 3.2.

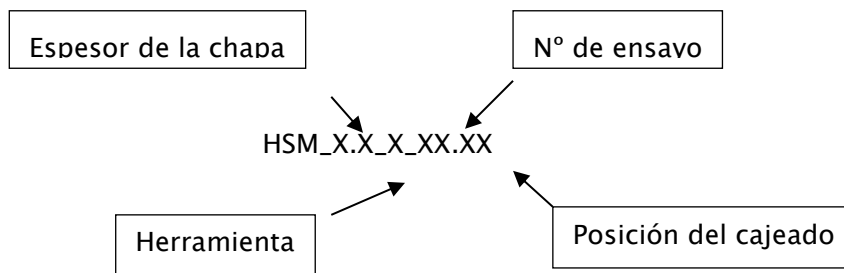


Figura 3.2 – Codificación para nombrar los ensayos

La posición de la cajera se considera conveniente identificarla ya que como se verá a continuación la probeta puede contener más de un cajeador y su posición puede afectar a los resultados obtenidos. La numeración de las posiciones se ha realizado de forma matricial, identificando en el primer dígito la fila y en el segundo la columna como se muestra en la Figura 3.3.

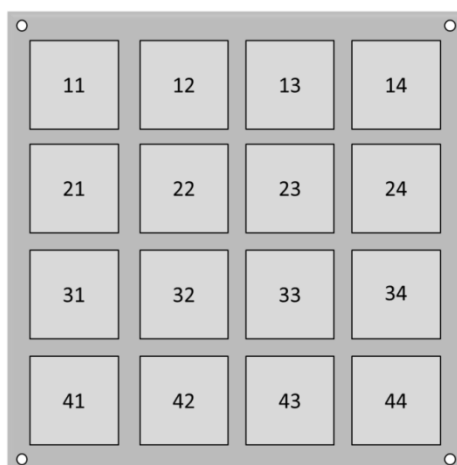


Figura 3.3 – Numeración de las cajeras según su posición para su identificación dentro de la codificación de los ensayos

Esta codificación se empleará para la identificación de archivos, probetas y herramientas. Además, se ha considerado apropiado establecer un sistema de fácil identificación de los parámetros empleados por colores. Este sistema se resume en la Tabla 3.1 y se utilizará de forma independiente según el tipo de datos analizados y la facilidad para indicarlos sin necesidad de utilizar el código de colores. Esta codificación también se empleará de forma recurrente a lo largo de este capítulo para facilitar la descripción de la metodología.

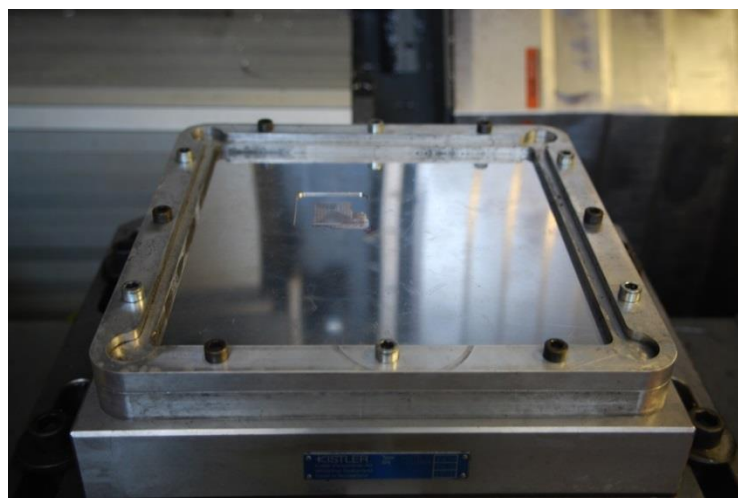
**Tabla 3.1**– Código de colores utilizado en el análisis de resultados y en los diagramas para identificar las **condiciones de cada ensayo.**

Señales adquiridas	Velocidad de giro (rpm)	Herramienta
Fx	8000	1
Fy	10000	2
Fz	12000	
Vp		

### 3.3. Diseño del utillaje

Como se ha expuesto en el Capítulo 2, la elección del sistema de amarre es primordial en el estudio de este tipo de mecanizado. Por ello se han propuesto distintos diseños que pueden cumplir esa función.

El primer tipo de utillaje diseñado consiste en un marco superior sobre una mesa de 210x210 acoplada a la mesa dinamométrica modelo Kistler 9255B, como se muestra en la Figura 3.4. La piel se encuentra completamente apoyada en la cara inferior por el utillaje y el juego lateral es mínimo con el marco de sujeción es mínimo. El marco superior se encuentra fijado a la base del útil por 12 tornillos M6, apretados con una llave dinamométrica para asegurar la uniformidad del apriete.

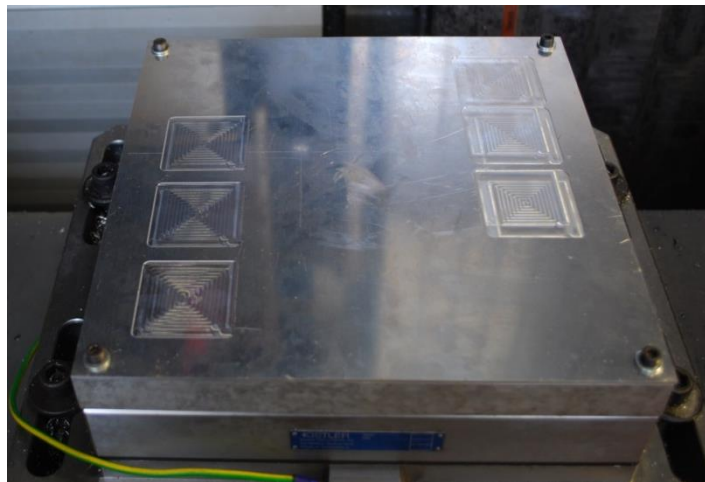


**Figura 3.4** – Sistema de amarre por marco de fijación superior

### 3. Metodología

---

Debido a la falta de precisión del utillaje y a la flexión de la pieza durante el mecanizado se ha simplificado el utillaje, colocando la piel sobre una superficie lisa y atornillando con tornillos M6 en los cuatro extremos (Figura 3.5). Esta solución, al simplificar el sistema, permite observar posibles problemas debidos a la flexión de la pieza y a vibraciones ocurridas durante el mecanizado. Para ello también se ha aumentado el tamaño de la piel, aprovechando toda la superficie de la mesa dinamométrica 260x260mm, al no tener que contar con una distancia mínima de ajuste del marco.



**Figura 3.5** – Fijación de la piel mediante tornillos en los extremos de la probeta

A partir de la bibliografía analizada se han analizado otros posibles tipos de amarre para el estudio de laboratorio del mecanizado de pieles. Entre ellos se encuentra el diseño de una mesa de dimensiones similares a la de la probeta con una cavidad interior donde se incluye una base amortiguadora de material magnetorreológico (Figura 3.6). Esta mesa debe ser de acero y se coloca sobre una mesa magnética por inducción. La mesa se activa cuando la pieza está colocada sobre el baño de material amortiguador y se comienza el mecanizado [1]. Esta solución aumenta la rigidez de la pieza a mecanizar de forma uniforme y sin ejercer fuerzas en puntos concretos, además los líquidos magnetorreológicos sirven como sistema de amortiguación por lo que podría proporcionar un mejor comportamiento frente a las vibraciones.



**Figura 3.6** – Esquema de utillaje de amarre por líquidos magnetorreológicos

Para solucionar el problema de la flexión de la pieza se podría pensar en el uso de un utillaje acoplado al cabezal que asegure que la profundidad de mecanizado se mantuviera constante. El desarrollo de este

útil se presenta como línea futura y estaría condicionado a la optimización del mecanizado. El principal problema que puede presentar está relacionado con las fuerzas de fricción entre útil y pieza.

El último sistema propuesto es un sistema de amarre por vacío sobre una alfombra flexible, fabricada a partir de un polímero resistente que pueda ser mecanizado y que permita adaptar el utillaje a la pieza. En este caso el control del espesor se realizaría a partir del espesor mecanizado no del obtenido finalmente, al controlar la posición de la goma que sirve de sistema de ajuste.

Para realizar los ensayos se ha optado por la segunda opción de diseño ya que es la más sencilla y la que mejor permite acotar la propuesta metodológica a largo plazo. Además permite aumentar el tamaño de las probetas utilizadas y por tanto de las cajas realizadas.

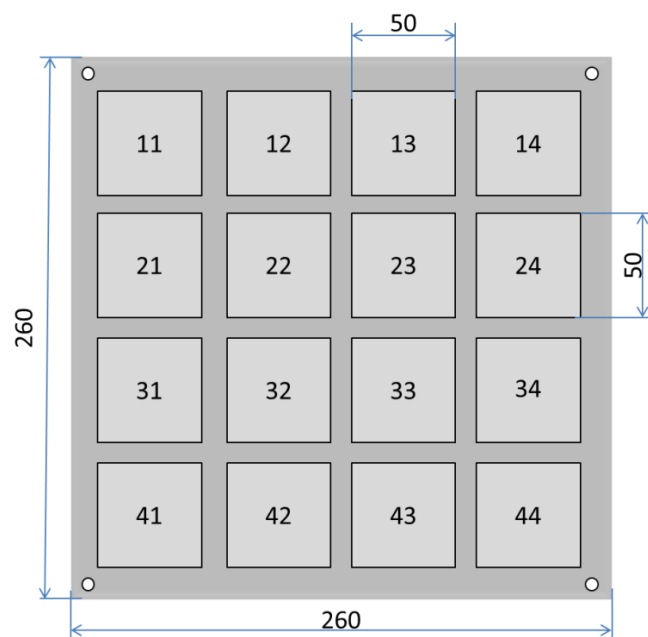
De este modo, el utillaje de base es una pieza ortoédrica de 22mm de espesor y de dimensiones 260x260mm fijada a la mesa Kistler con tornillos M12 y con agujeros roscados en los extremos de la misma, donde se realiza la fijación de la probeta. Para asegurar que el utillaje no afecta a los resultados del espesor mecanizado por la posición de la probeta se ha medido la planitud del útil siendo el valor obtenido de  $\pm 0,02\text{mm}$ .

### 3.4. Diseño de las probetas

Para definir la metodología base de estudio se ha decidido utilizar probetas planas de forma que se simplifique el sistema de amarre necesario y se reduzcan las interferencias en el sistema de adquisición debidas a la geometría de la partida de la probeta. El tamaño de la probeta puede variar según el objetivo del ensayo, éstas pueden ajustarse a las dimensiones de las cajas si se deciden realizar ensayos individuales eliminando componentes que afecten a los resultados, pero deben dejar en todo caso espacio suficiente para la colocación de acelerómetros en la pieza.

La probeta es una piel de UNS A192024-T3 de dimensiones 260x260 y 2mm de espesor (Figura 3.7). En ella se han realizado un orificio en cada una de las cuatro esquinas para su correcta fijación durante el ensayo. Si se utilizase otro tipo de amarre la probeta deberá ajustarse para su correcto ajuste y sujeción.

Las dimensiones de la probeta coinciden con el tamaño de la mesa dinamométrica utilizada en la monitorización de las fuerzas ejercidas durante el proceso. Se ha decidido no utilizar una probeta mayor para que durante el mecanizado no las medidas no se vean afectadas por las flexiones de la pieza producidas en los voladizos.



**Figura 3.7** – Probeta acotada en mm y numeración de las dos últimas cifras de la codificación según la posición del ensayo.

El tamaño de las cajas viene definido por la maximización del espacio eliminado dejando unas costillas intermedias de 5mm entre cajas y obteniendo una matriz de 4x4 cajas. En su diseño se ha tenido en cuenta que el objetivo del ensayo es realizar 14 cajas de 50x50mm y 0.2 de profundidad para evaluar distintos parámetros de velocidad de corte, estrategias de mecanizado y el efecto de dos herramientas diferentes. En este ensayo no se mecanizarán las correspondientes a las posiciones 22 y 33 para mantener la simetría en el proceso y facilitar la colocación del acelerómetro.

Los ensayos se han realizado siguiendo el orden numérico de la Figura 3.8. Aquellos situados en la zona periférica de la probeta se han realizado en tandas de tres, (01-03,04-06,07-09,10-12) donde dentro de cada tanda se varían las velocidades de corte (8 000, 10 000 y 12 000 rpm) y manteniendo constante el avance (0,05 mm/diente) y la distancia entre pasadas (2mm) y variando la herramienta utilizada y la estrategia de mecanizado.

El orden escogido tiene como propósito mantener situaciones similares de estabilidad de forma simétrica con respecto al eje trazado en la Figura 3.8. De este modo la evaluación comparativa de las herramientas no se debe ver afectada por la pérdida de material al encontrarse los mecanizados suficientemente distanciados unos de otros. Los seis primeros se corresponden a estrategias en oposición y los 6 siguientes a estrategias en concordancia.



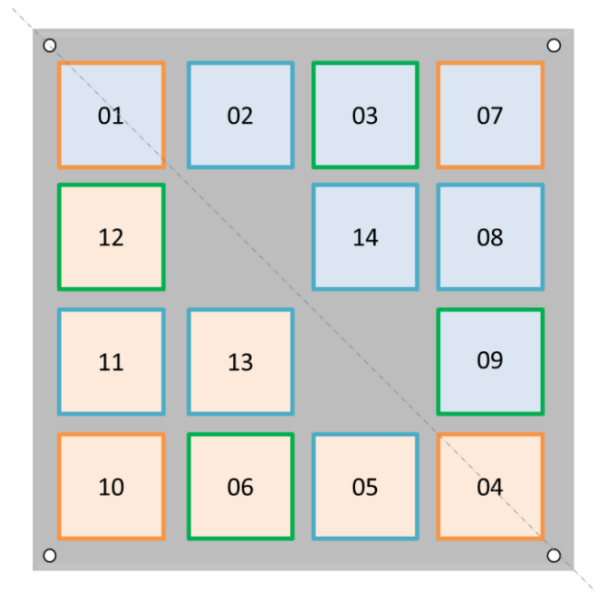


Figura 3.8- Orden para la realización de los ensayos

### 3.5. Caracterización de las herramientas

Uno de los estudios que se debe realizar es el comportamiento de la probeta frente a distintas herramientas con vistas a la optimización de las mismas.

Para realizar esta comparativa en el mecanizado de pieles se han examinado dos tipos de fresas diferentes tomando como base las más utilizadas en la bibliografía consultada. La primera de ellas una fresa frontal estándar y la segunda una fresa tórica, elegida en base a dos motivos. El primero es la futura implantación del sistema de mecanizado en pieles curvas lo que obliga a utilizar herramientas con radio de punta. El segundo es la realización de las cajeras en una sola pasada, dejando directamente el radio de acuerdo definido por el diseño de la pieza final. Este radio se define por las limitaciones del proceso de fresado químico.

Estas herramientas están fabricadas de metal duro, carburo de wolframio con cobalto, donde el cobalto funciona como aglutinante y se encuentra en un intervalo del 5-15% de la composición total del material. En el mecanizado de aluminio, se suele escoger este material por su buen comportamiento frente a la adhesión y a la humedad. Además, son herramientas muy resistentes a la abrasión y a la erosión aunque estos mecanismos sean menos frecuentes en este tipo de mecanizado. Es preciso identificarlas inicialmente y conocer sus características geométricas. En concreto estas deben estar diseñadas para el material a mecanizar, aluminio, en este trabajo. Las herramientas escogidas para realizar los ensayos se encuentran definidas según la Tabla 3.2.

Tabla 3.2 – Herramientas utilizadas en los ensayos preliminares

<b>Kendu HMKEN 0200.60 (fresa frontal)</b>		
<b>Codificación: H1</b>		
Ø: 10 mm    Z: 2		
<b>Ángulos</b>	Incidencia secundario: 16°	
	Incidencia primario: 9°	
	Desprendimiento: 22°	
	Hélice: 30°	
<b>Kendu uniKENAL 4400.60 (fresa tórica)</b>		
<b>Codificación: H2</b>		
Ø: 10 mm    Z: 2		
<b>Ángulos</b>	Incidencia secundario: 16°	
	Incidencia primario: 9°	
	Desprendimiento: 18°	
	Hélice: 30°	
<b>Plato de planear</b>		
<b>Codificación: H3</b>		
Ø: 32 mm    Z: 2		

### 3.6. Selección de las estrategias de mecanizado

Las estrategias de mecanizado recogen las trayectorias seguidas por la herramienta teniendo en cuenta la geometría, de entrada y de mecanizado, y las direcciones relativas entre los movimientos de la herramienta y de la pieza (oposición y concordancia). Ambas afectarán en el mecanizado favoreciendo o limitando la aparición de chatter y proporcionando un mejor acabado a la pieza. Siguiendo las recomendaciones encontradas en la bibliografía analizada en el Capítulo 2, para evitar la flexión de la pieza y el chatter regenerativo se recomienda:

- Realizar la entrada en rampa o en hélice
- Mantener constante la carga de viruta, lo que implica realizar trayectorias del interior al exterior o en zigzag.

La entrada se realizará en hélice debida a la escasa profundidad de mecanizado. En cuanto a la realización del mecanizado en oposición o concordancia existen discrepancias, por lo que se procede al estudio de las dos estrategias.

En lo referente a las trayectorias se ha escogido la realización de la cajera de dentro hacia fuera dejando las trayectorias en zigzag como propuesta para trabajos futuros.

### 3.7. Selección de los parámetros de corte

Para la elección de los parámetros de corte utilizados en el ensayo primero se ha realizado un estudio de los parámetros utilizados en la bibliografía consultada. Este estudio se encuentra resumido en los Anexos.

Estos parámetros son los utilizados como referencia aunque cabe destacar que en ninguno de los artículos analizados se realiza fresado de pieles y se parte de una pieza monolítica para llegar a los resultados deseados, además la orientación del mecanizado en la mayor parte de los ensayos es mecanizado vertical de paredes y no de suelos por lo que los resultados no tienen por qué ser los óptimos.

Por ello se ha decidido dejar fijos el avance ( $f = 0.05$  mm/diente) y la profundidad (0.2mm) y variar la velocidad de corte. Para este parámetro se han escogido valores que se encuentran en el límite entre el mecanizado convencional y el de alta velocidad de aluminio (400–600mm/min) de forma que se evalúe si el comportamiento de la pieza es mejor uno o en otro. De esta forma los parámetros de corte utilizados se encuentran en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3 – Parámetros de corte empleados

N (rpm)	f (mm/min)	Hz	P (mm)
8 000	400	2,67 kHz	0,2
10 000	500	3,33 kHz	0,2
12 000	600	4,00 kHz	0,2

En los Anexos se presentan todos los ensayos realizados identificados según la codificación anteriormente descrita y presentando los parámetros específicos de cada ensayo realizado.

### 3.8. Monitorización

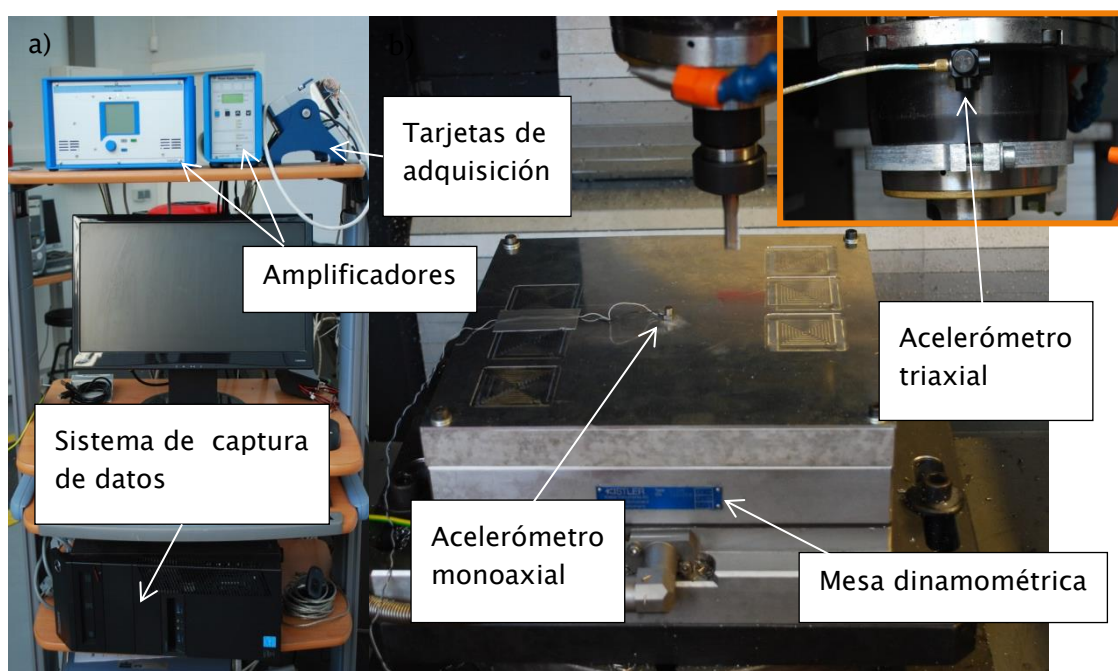
Los ensayos son monitorizados para estudiar varios aspectos del mecanizado. Dicha monitorización puede realizarse on-line, mediante el registro de variables de mecanizado durante el proceso, y off-line, mediante el estudio de la integridad superficial de las piezas y las alteraciones de la herramienta.

### 3. Metodología

En las primeras se propone adquirir las componentes de la fuerza de corte ( $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ ), la vibraciones tanto de la pieza (en el eje  $z$ ) como del cabezal y llevar a cabo una grabación de alta velocidad del ensayo para tener una observación directa y reproducible del mismo.

La adquisición de las fuerzas se realiza utilizando una mesa dinamométrica, Kistler 9255B. Esta mesa funciona gracias a unos sensores piezoeléctricos que a partir de la presión ejercida al realizar una fuerza sobre ellos, generan una tensión, el cable transmite esta tensión hasta un amplificador que a su vez se enlaza a una tarjeta de adquisición de National Instruments que permite registrar en el ordenador la tensión generada en los piezoeléctricos.

Las vibraciones se han capturado con dos acelerómetros que funcionan de forma similar. Para medir las vibraciones del cabezal se ha utilizado un acelerómetro también de la marca Kistler modelo 8692C situado en la base del cabezal cerca del cono como se observa en la Figura 3.9. Sin embargo el situado en la pieza es un acelerómetro monoaxial Kistler modelo 8614S que permite medir las vibraciones de la pieza en el eje  $z$ . Este acelerómetro se coloca utilizando un adhesivo de contacto y asegurando el cable de conexión con cinta adhesiva.



**Figura 3.9** – Sistema de adquisición a) amplificadores y sistema de adquisición b) sensores captadores del sistema

Para completar el sistema de adquisición de datos se utilizan una serie de amplificadores conectados a un ordenador, encargado de registrar los datos enviados por el sistema de adquisición imagen a) de la Figura 3.9.

El registro se realiza mediante una aplicación de adquisición de datos generada a partir de la plataforma Labview (Figura 3.10). Esta aplicación permite guardar los datos de fuerzas adquiridos en cada ensayo directamente en N agrupando  $F_x$  y  $F_y$  en un mismo archivo y dejando  $F_z$  en otro diferente. Las vibraciones se adquieren a partir del mismo programa de las fuerzas, pero se registran en archivos diferentes según sean las de cabezal ( $A_x$ ,  $A_y$  y  $A_z$ ) o las de la pieza ( $V_p$ ). Finalmente se recopilan los datos relativos a la potencia empleada por la máquina para realizar el mecanizado. Toda la adquisición se realiza a 10 000 Hz para asegurar la captura de varios puntos de entrada de la herramienta en la pieza durante el mecanizado.

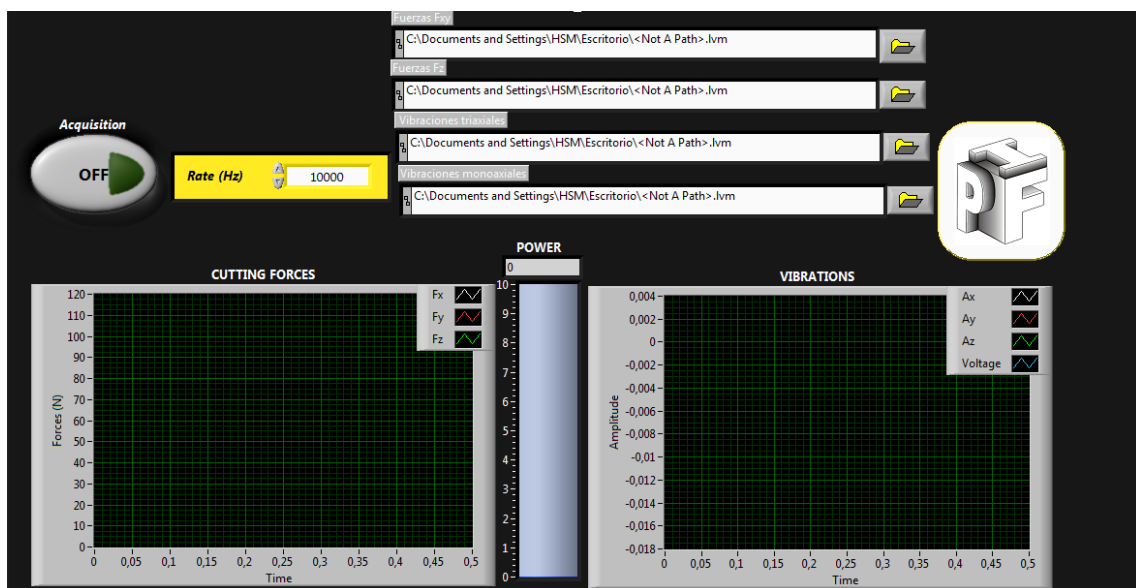


Figura 3.10 – Interfaz de la aplicación de adquisición de datos utilizada

Paralelamente, para este estudio, se ha propuesto la monitorización on-line de la distancia herramienta-pieza, lo que se asocia a los cambios en la profundidad efectiva que pueden modificar el espesor deseado de las piezas por flexión de las mismas por efecto de las fuerzas de mecanizado. La singularidad de este tipo de estudios, infrecuente en el seguimiento on-line de procesos de mecanizado y sugiere que su tratamiento se lleve cabo en un apartado independiente.

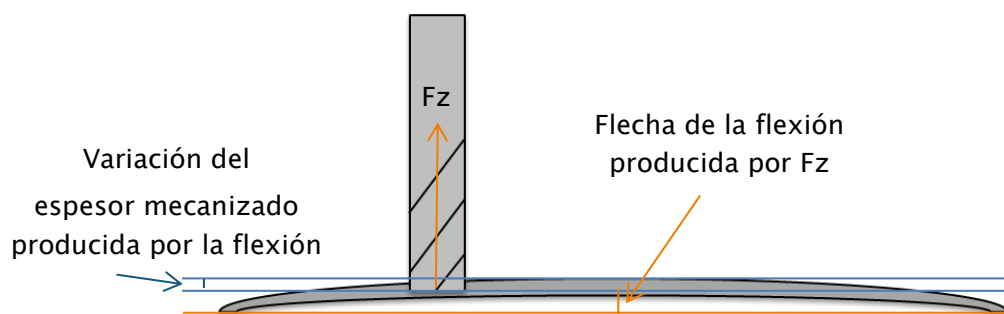


Figura 3.11 – Flexión de la probeta producida por  $F_z$

### 3.9. Monitorización del espesor mediante la medición por sensor láser

El objetivo de estos ensayos es conseguir un sistema de medición online que permita retroalimentar la información referente a la altura del cabezal y modificarla en el caso de encontrar diferencias en el espesor mecanizado obteniendo de esta forma siempre la misma profundidad de mecanizado a lo largo del fresado de la piel.

#### 3.9.1. Breves Antecedentes

En el fresado de pieles es necesario conocer en todo momento el espesor real de la pieza para cumplir las tolerancias exigidas industrialmente ( $\pm 0.1\text{mm}$ ). Existen distintas soluciones para asegurar la posición de la pieza. Todas ellas están basadas en el diseño de los sistemas de amarre aunque se suelen combinar con sistemas de medición para mejorar la precisión del mecanizado. La principal solución presentada en cuanto al sistema de medición es el uso de dos cabezales sincronizados que permiten la medición del espesor por ultrasonidos.

Esta solución implica tener dos cabezales o un sistema de apoyo móvil que encarece considerablemente la máquina por lo que se propone el uso de un sistema de medición láser combinado con un sistema de amarre por vacío que asegure en todo momento el completo apoyo de la pieza sobre la base. De esta forma, el incremento de espesor o un pequeño levantamiento de la piel puede medirse y con el sistema de medición online se modifica la posición del cabezal en función a la posición de la cara superior de la piel a mecanizar, pues se controla la distancia del láser a la herramienta. El esquema general de medición de espesor planteado se muestra en la Figura 3.12

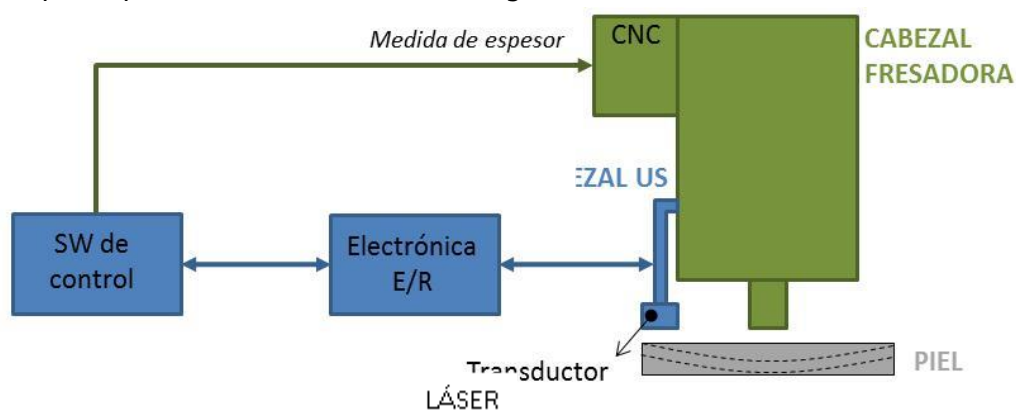


Figura 3.12 – Esquema general de medición automática de espesor por ultrasonidos planteado.

Para la implantación en máquina como sistema de medida, es importante que el láser se sitúe delante de la herramienta, y que tanto la electrónica como el software sean capaces de calcular las rectificaciones en la trayectoria con suficiente rapidez como para que las modificaciones en la altura del cabezal se puedan ejecutar.

### 3.9.2. Principio de medida del láser

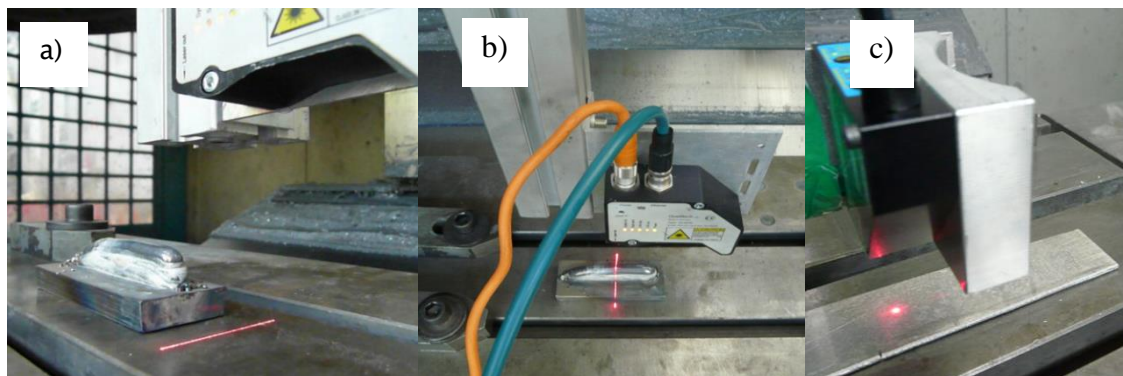
El sensor láser de diodos utiliza la triangularización para medir la distancia mediante la emisión de una luz láser visible roja y de una longitud de onda de 650nm.

El haz láser es proyectado desde el emisor y reflejado por la superficie objetivo hacia una colección de lentes. Las lentes enfocan una imagen del “spot” en un array lineal de la cámara. Ésta observa el rango de medida desde un ángulo que varía desde 45° hasta 65° en el centro del rango de medida, dependiendo del modelo. La posición de la imagen del “spot” en los píxeles de la cámara es procesada para determinar la distancia al objetivo. Así, a mayor tiempo de exposición, mayor sensibilidad en los casos de una baja reverberación (reflejo).

### 3.9.3. Metodología para las pruebas iniciales

Se parte de una serie de ensayos realizados con el objetivo validar este sistema de medición y poner de manifiesto los posibles inconvenientes del mismo. Inicialmente se realizan una serie de pruebas estudiando las cuestiones básicas de la medición:

- Comportamiento de dos tipos de laser diferentes (Figura 3.13). Haz laser y puntero laser.
- Aspectos básicos del funcionamiento de cada tipo de laser: posicionamiento, conexiones, adquisición de datos.
- Estudio de la problemática derivada de la medida en la superficie del aluminio.



**Figura 3.13** – a) y b) Pruebas iniciales de medición por haz láser. c) Pruebas iniciales de medición por puntero láser.

En estas pruebas se realizan pruebas sencillas de detección superficial por láser sin mecanizar sobre piezas con diferentes geometrías moviendo manualmente la máquina. Los sensores láser utilizados son:

- Medición por haz láser: Quelltech Q4-6030
- Medición por puntero láser: AccuRange 200TM Laser Measurement Sensor – AR200-25

### 3. Metodología

---

Respecto al comportamiento de los láseres, el primero realiza un barrido superficial, detecta el perfil de la pieza con el haz, mientras que el segundo mide únicamente un punto concreto de la superficie, esto afecta al tipo de datos recogidos y a su evaluación. En la medición por haz láser para evaluar los datos es obligatorio utilizar archivos en formato de video. En el caso de la medición por puntero láser es suficiente con listas de datos que se evaluarán con gráficas.

En cuanto al funcionamiento del láser, es muy similar en ambos tipos. El posicionamiento y la conexión se realizan de la misma forma, en ambos casos. La adquisición de datos es similar pero el tratamiento de los mismos difiere ya que el haz lleva asociado un software propio de adquisición.

Finalmente, en estas pruebas se observa que no hay inconvenientes en la medida del aluminio por aparición de reflejos ni similar y se selecciona el puntero láser como tipo de láser para continuar el estudio ya que su comportamiento frente a la interferencia de viruta es similar y el tratamiento de los datos adquiridos se simplifica en este caso.

#### 3.9.4. Metodología para el ensayo de validación

Una vez analizado el funcionamiento del láser se realiza un ensayo de validación del sistema en el que se estudia el efecto de la viruta generada durante el mecanizado en la medición del láser.

Los ensayos se han realizado sobre una fresadora de 3 ejes, ya que la superficie seleccionada para mecanizar es plana. Aunque el objetivo final del trabajo es estudiar el mecanizado de pieles, el material seleccionado es un bloque de AL2024-T4 (AL2024-T351) de 20mm de espesor, pues se considera que para las primeras pruebas de detección de interferencia de virutas las condiciones de ensayo son válidas.

En los ensayos de medición por láser, se ha mecanizado sobre una pieza ortoédrica de forma que los efectos producidos por la flexión de la pieza no influyan en los resultados y por tanto puedan evaluarse de forma correcta la influencia de otras interferencias como son la aparición de viruta durante el mecanizado y las vibraciones del cabezal en la pieza.

##### 3.9.4.1. Selección del sensor láser

Las tolerancias de espesor exigidas en para la aceptación de la pieza obligan a disponer de un láser con una precisión mínima de 50µm. Utilizando este dato como referencia se ha seleccionado para la realización de los ensayos un sensor láser, con una precisión de 50µm el rango de trabajo de  $\sim \pm 12,5$  mm. Debido a las tolerancias de espesor requeridas, se recomienda utilizar un láser con una precisión aún mayor. Para la gama AccuRange 200TM por ejemplo, se puede llegar hasta precisiones de 12,7µm,



aunque el rango de trabajo se reduce hasta los  $\pm 3,15\text{mm}$  El láser seleccionado se define en la Tabla 3.4:

Tabla 3.4.- Modelo láser utilizado

AccuRange 200TM Laser Measurement Sensor – AR200–25	
Standoff [mm] (alejamiento/centro del span)	34
Span [mm] (alcance)	25,4
Linearity / Accuracy [ $\mu\text{m}$ ]	$\pm 50,8$
Distancia con señal 0V [mm]	21,3
Distancia con señal 10V [mm]	46,7

#### 3.9.4.2. Colocación del sensor láser:

Si el láser se mueve solidario con el cabezal, se recomienda que esté lo más cercano posible a la herramienta, para que independientemente de la curvatura de la chapa, se trabaje dentro del rango del láser. Se plantean diferentes opciones para la colocación de láser:

- Colocar el láser amarrado al cabezal, de modo que éste se mueva solidario con él. Las condiciones para el correcto funcionamiento son: cercanía del láser a la herramienta, para que el láser no se supere el rango de medida, y programar el mecanizado de tal forma que el láser siempre vaya delante de la herramienta, mediante un eje extra, o realizando siempre trayectorias de mecanizado en la misma dirección (la más larga) aumentando el tiempo de mecanizado.
- Utilizar 4 láseres colocados a  $90^\circ$  entre sí y sincronizando su posición con el avance de la herramienta. Esto permite obtener, si se mecanizan cajas, una medida anterior al paso de la herramienta y una posterior permitiendo el cálculo del espesor mecanizado en cada instante y regulando la altura en función del láser colocado delante de la herramienta. El inconveniente es la sincronización de los láseres en función de la velocidad de avance y la dirección del mecanizado, cambio de selección del láser de referencia.
- Embeber el láser en el portaherramientas. Aunque permite con un solo láser medir también el espesor que se va dejando detrás, los inconvenientes de esta opción son diversos. El láser debe trabajar sin cables. Sólo afecta al sistema de adquisición de datos ya que los láseres de DC funcionan con pilas o batería. Obligatoriamente la transmisión de datos se realiza de forma inalámbrica. El aparato debe soportar las velocidades de giro del cabezal en función de las condiciones de corte (10000–14000rpm). Difícil sincronización para conseguir la lectura respecto a la posición de medida puede ser compleja.
- Añadir un dispositivo que permita el giro cíclico del láser alrededor de la herramienta, independiente del giro del cabezal. Este sistema obliga a sincronizar el giro con la toma de datos, pero permite monitorizar el espesor obtenido tras el mecanizado.

De estas cuatro opciones, las más factibles son las dos primeras y para realizar los ensayos se ha optado por la primera aunque se contempla la posibilidad de implementar en máquina cuatro láseres.

### 3. Metodología

Se coloca el láser delante de la herramienta a una distancia de 40mm y 25mm por encima de la herramienta, para que el foco esté en rango en la punta de la herramienta (Figura 3.14). Como el láser está amarrado rígidamente al cabezal:

- Cuando la máquina avanza en sentido positivo en el eje X el láser va delante de la herramienta
- Cuando la máquina avanza en sentido negativo en el eje X el láser va detrás de la herramienta

Así, como el láser está desplazado 40 mm en sentido positivo en el eje X sólo mide la zona mecanizada desde "x=40mm" hasta "x=100mm"

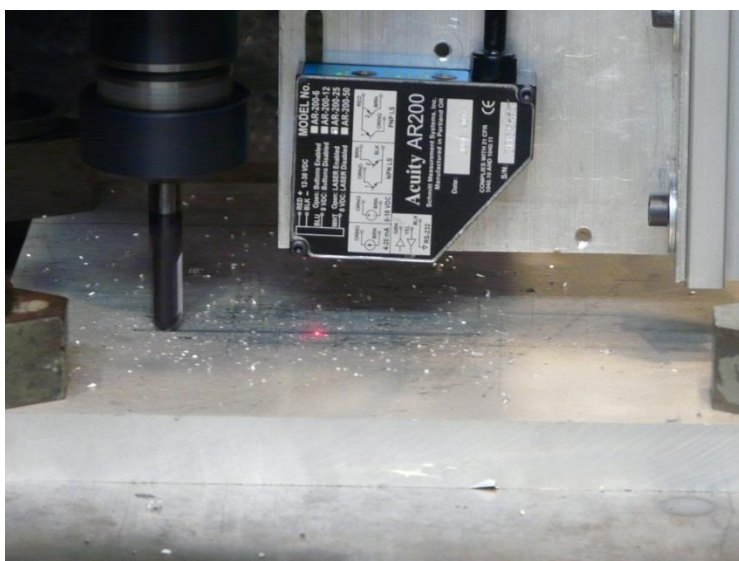


Figura 3.14 – Montaje de ensayos de medición del espesor con un sensor láser

#### 3.9.4.3. Condiciones de mecanizado

Las condiciones de mecanizado han tenido que ser adaptadas debido a las limitaciones en la velocidad máxima de giro disponible del cabezal de la máquina empleada para este ensayo. Se ha buscado reproducir un tamaño de viruta lo más parecido a las descritas anteriormente. En la Tabla 3.5 se presentan las condiciones de mecanizado utilizadas:

Tabla 3.5 – Condiciones de mecanizado

S [rpm]	4000
F [mm/min]	200
Vc[m/min]	75.4
f <sub>z</sub> [mm/diente]	0,05
Profundidad de pasada [mm]	0,1
Paso lateral [mm]	0,05
Longitud de pasada [mm]	100
Número de pasadas	42
Herramienta utilizada	H2

A partir de los ensayos previos y las dificultades derivadas del posicionamiento del láser se han decidido realizar dos tipos de ensayos. Uno para estudiar la medición del láser registrada en función de la posición del láser con respecto a la dirección de mecanizado. Otro, para evaluar la interferencia de la viruta sin que el cabezal esté girando bajo dos geometrías diferentes de pieza, el mismo tocho mecanizado con anterioridad y una chapa curva. En este caso se evalúan dos tipos diferentes de viruta, las generadas con cada tipo de herramienta.

Los ensayos realizados emplean dos herramientas de corte de diferentes diámetros ajustándose a las condiciones de mecanizado definidas por Tecnia y recogidas en la (Tabla 3.6).

**Tabla 3.6** – Condiciones de mecanizado para la medición de la interferencia de la viruta en la medición del espesor mecanizado mediante láser

Hta	Vc (m/min)	Av (mm/rev)	Edge nº (Z)	N (rpm)	F (mm/min)	Ap (mm)	Ae (mm)
H1	150	0.06	2	4777	573	1	5
H2	400	0,19	3	3981	2269	1	16

El material mecanizado es una placa de 20mm de espesor de AL2024-T4 (AL2024-T351) y el centro de mecanizado CNC es de la marca ANAYAK, modelo ANAK-MATIK-7-CNC, ilustrado en la Figura 3.15.

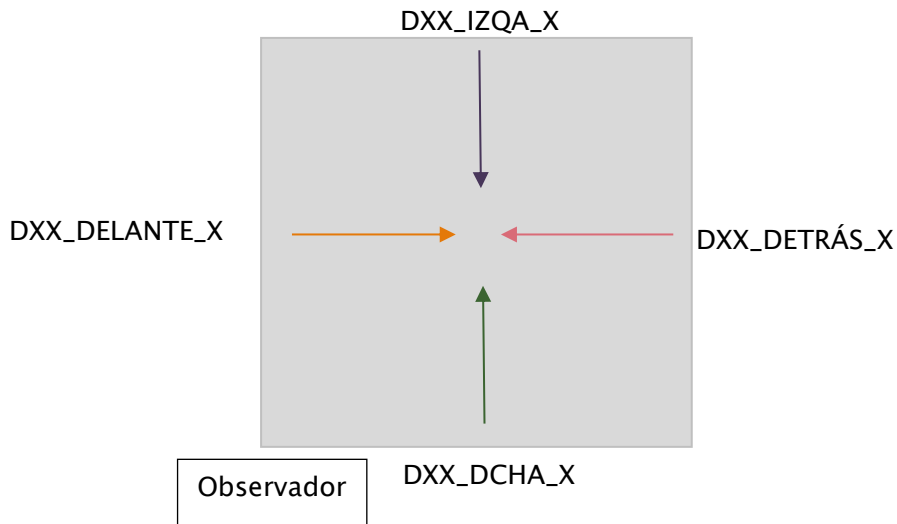


**Figura 3.15** – Centro de mecanizado CNC de 3 ejes empleado para realizar los ensayos de medición de espesores mediante un sensor láser.

Los ensayos consisten en el mecanizado de tres ranuras por dirección a lo largo de toda la probeta, se parte desde cuatro puntos diferentes, de forma que el láser se encuentra en una posición relativa distinta en cada bloque de tres ensayos. Las medidas se realizan en las cuatro direcciones registrando la influencia de la viruta sobre la medición en función de la posición del sensor con respecto a la herramienta (delante, detrás, izquierda y derecha) del corte, midiendo por tanto sobre la zona mecanizada únicamente cuando el láser está situado detrás de la herramienta.

### 3. Metodología

En la Figura 3.16 se muestra la nomenclatura empleada en los ensayos de medición de láser. DXX se corresponde con el diámetro de la herramienta. Las herramientas utilizadas con H2 (D10) y H3 (D32)



**Figura 3.16** – Esquema seguido para la nomenclatura de los ensayos de medición por láser

El sensor láser utilizado es un AccuRange 200TM Laser Measurement Sensor – AR200–25, el mismo que en el ensayo previo y el montaje seguido es similar al de los ensayos previos. En la Figura 3.17 se muestra un detalle del mismo.



**Figura 3.17** – Montaje para la medición por láser del espesor mecanizado con el láser por delante de la herramienta.

### 3.10. Protocolo de realización del ensayo de mecanizado de pieles

Para la realización de los ensayos se ha empleado una Kondia Five-400 y los equipos de monitorización mencionados en el apartado anterior (Figura 3.18)



Figura 3.18 – Equipos empleados en la realización del experimental

Existen dos métodos para la programación del código CNC, a pie de máquina o por sistemas CAM, en este caso se ha optado por la programación a pie de máquina ya que permite optimizar las trayectorias en la realización de la cajera y las interpolaciones de la entrada pueden ser en hélice y no sólo en rampa como ocurre al introducir el código en el postprocesador.

Se debe tener en cuenta encender los sistemas de adquisición media hora antes de la realización del ensayo para disminuir las derivas registradas por el equipo.

Antes de realizar el ensayo se debe limpiar con un trapo la superficie del utillaje de amarre para evitar la interferencia de ningún elemento que pueda afectar a la geometría de partida de la piel.

A continuación, se limpia la superficie de la probeta y se coloca el acelerómetro mono axial en el centro de la misma utilizando pegamento de contacto. Un vez preparada la probeta, esta se coloca en el utillaje de amarre fijándola con tornillos M6. Se propone que el apriete de los mismos se realice mediante una llave dinamométrica de forma que obtenga una distribución uniforme de las fuerzas de amarre. Posteriormente, se fija el cable del acelerómetro, puede que a lo largo del ensayo sea necesario cambiar de sitio la cinta adhesiva que asegura la posición del cable para evitar su interferencia en el mecanizado.

### 3. Metodología

---

Por último, se hace cero en la superficie de la pieza, para ello existen dos opciones, utilizar un reloj comparador de alturas que será la opción que dé más fiabilidad a la medida o en su defecto mediante galgueo, nunca se deberá hacer cero mecanizando ya que la precisión de este punto de referencia puede ser mayor que propia tolerancia exigida por el proceso.

Una vez realizada la puesta a punto del ensayo se comienza el mismo. Durante el ensayo se debe seguir el protocolo de monitorización:

- Obtención de observación directa por imágenes
- Toma de documentos gráficos mediante cámara fotográfica, si procede
- Monitorización de fuerzas y vibraciones

Una vez finalizado el ensayo se evalúa de la probeta siguiendo el protocolo ya descrito y se procede a la clasificación y al tratamiento y análisis de los datos adquiridos mediante la monitorización.

Para facilitar esta tarea de documentación y tener un correcto control de la realización de los ensayos, así como, un registro de los resultados obtenidos se propone un modelo de registro adjunto en los Anexos de esta memoria. En él se contemplan todas las posibles evaluaciones mencionadas en esta metodología, por ello, y debido a la finalidad del ensayo inicial, existen apartados que no han sido cumplimentados

#### 3.11. Análisis de los resultados

El análisis de los resultados se divide en dos vertientes principales. El análisis de los datos recogidos mediante la monitorización del ensayo y la evaluación de las probetas mecanizadas. En este apartado se realiza describe la metodología empleada en ambos casos y centrándose en los procedimientos y equipos empleados.

##### 3.11.1. Análisis de fuerzas, vibraciones y mediciones de espesor

Para el análisis de estas características del proceso se ha utilizado principalmente el entorno de programación Labview, dentro del cual, se han desarrollado diferentes aplicaciones según las necesidades específicas de cada tipo de datos.

En concreto, para el análisis de fuerzas ha sido necesario alinearlas y poder evaluarlas según la posición y dirección del mecanizado. La aplicación diseñada permite escoger el intervalo de tiempo deseado y calcular algunos parámetros estadísticos del mismo. También se ha realizado un estudio en frecuencia

de las mismas para observar su comportamiento cíclico y la influencia de la entrada de la herramienta en la pieza.

El análisis de vibraciones se realiza en función de la amplitud registrada junto con un análisis en frecuencia de las mismas.

Para la medición de espesores se ha desarrollado una aplicación específica que permite el filtro on-line de las señales, esta se explicará más detenidamente en el Capítulo 4. También se ha empleado una aplicación más general que permite el estudio del comportamiento de las señales en la cual se calculan medias, máximos, mínimos y desviaciones estándar.

### **3.11.2. Protocolo evaluación probetas**

En este apartado se describe un protocolo común para la evaluación de la integridad superficial de las probetas mecanizadas y de sus características geométricas. Este protocolo establece los parámetros que se consideran necesarios evaluar sin centrarse en características geométricas de la probeta, sino más bien, en las del proceso y los posibles defectos derivados de este que pueden reflejarse en la probeta. Por este motivo, el protocolo se considera válido para ensayos similares al realizado, ya que las cajas se estudian de forma independiente, como si cada una de ellas se tratase de una probeta.

Este apartado se divide siguiendo los criterios explicados en el Capítulo 2 para la evaluación de la integridad superficial en macrogeometría, microgeometría y propiedades físico-químicas. Además se añade un apartado de evaluación dimensional y finalmente se explica el esquema de análisis visual anteriormente mencionado.

#### **3.11.2.1. Macrogeometría**

La evaluación macrogeométrica se llevará a cabo mediante un registro gráfico y en la evaluación de defectos característicos del proceso. Para ello se contempla el uso de softwares calibrados de medición como herramienta de apoyo para el análisis de los datos recogidos. A continuación se explican los parámetros que se han considerado apropiados analizar y se describen los equipos necesarios para la adquisición de estas medidas. Los parámetros evaluados serán:

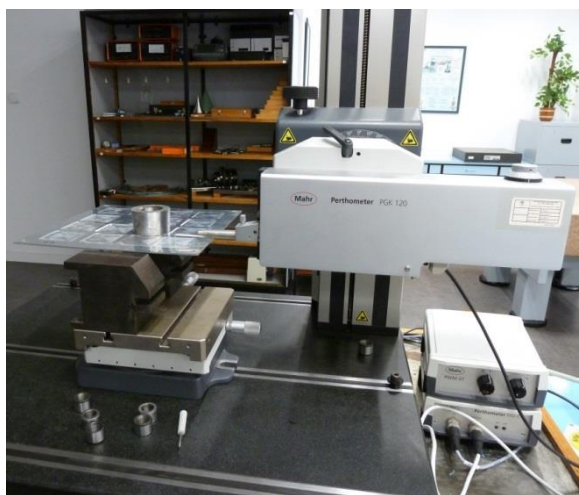
- Rectitud
- Planitud
- Defectos estéticos
- Ondulación Superficial (derivable del perfil)

### 3. Metodología

---

La evaluación macrogeométrica de las probetas se realiza en dos partes. Los defectos inspeccionan de forma visual mediante registro gráfico y su evaluación no está estandarizada existiendo criterios que fijan un número máximo de arañazos, indentaciones o partículas o una distancia mínima entre ellos.

Para la evaluación de la planitud sería necesario obtener una topografía de la superficie mecanizada, al no disponer de equipos que la realicen en la Escuela Superior de Ingeniería, se considerará que el parámetro evaluable más fiable en este caso será la rectitud. Este parámetro se evalúa de forma cuantitativa a partir de los perfiles de forma obtenidos durante la evaluación de la rugosidad. Estos perfiles se adquieren con un rugosímetro Mahr Perthometer Concept PGK 120 (Figura 3.19). Este rugosímetro proporciona los perfiles superficiales de la línea mecanizada por tanto filtrando el perfil al de ondulación se puede obtener la rectitud de esa sección proporcionando la forma y la flecha máxima del perfil.



**Figura 3.19** – Rugosímetro de palpador Mahr Perthometer Concept PGK 120

#### **3.11.2.2. Evaluación dimensional**

Esta evaluación recoge parámetros cuantitativos de macrogeometría más relacionados con el diseño dimensional de la pieza que con su integridad superficial. En este análisis se contemplan cuatro elementos:

- Radios de acuerdo laterales
- Radios de acuerdo de esquinas
- Profundidad
- Dimensión de la cajera

Los radios de acuerdo de esquinas que se han medido con una medidora de formas episcópica la Tesa Visio V300 (Figura 3.20).





Figura 3.20 – Tesa Visio V300, equipo utilizado para medir los radios de acuerdo en las esquinas de las cajas

Los radios de acuerdo de contorno, es decir aquellos generados con la herramienta tórica entre la base y las paredes que se miden con el mismo equipo que los perfiles de forma, a partir de los que se calcula la rectitud, y la rugosidad. La medición de estos radios de acuerdo se realiza a la vez que la espesor mecanizado como se muestra en Figura 3.21. Para ello, se ha seleccionado una longitud de medición de 5.76 mm en tres puntos de cada caja y sólo en uno de los laterales de la misma.

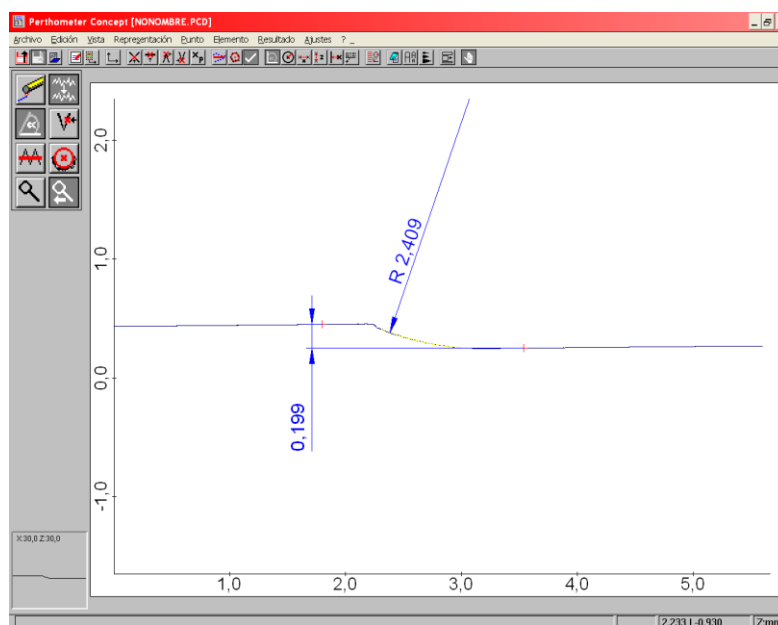


Figura 3.21 – Ejemplo de medición de espesor mecanizado y radio de acuerdo lateral obtenido con el programa Concept.

Finalmente la evaluación dimensional de las cajas obtenidas se realiza utilizando un pie de rey (Figura 3.22), para ello se toman tres medidas a lo largo y tres a lo ancho y se evalúa la media de las mismas.



Figura 3.22 – Medida de las dimensiones de las cajas utilizando un pie de rey

#### 3.11.2.3. Microgeometría

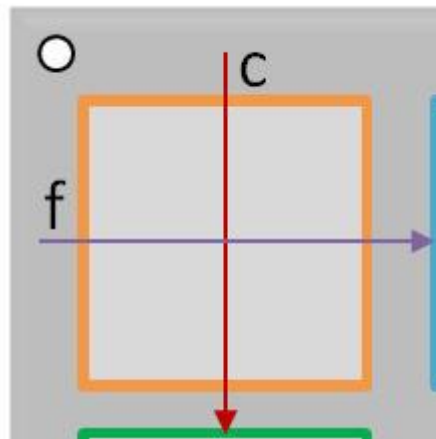
En este apartado se establece la metodología de evaluación de las variaciones geométricas superficiales del orden del micrómetro. Ésta se ha denominado tradicionalmente con el nombre de calidad superficial de la pieza y recoge dos aspectos:

- Rugosidad (a partir de perfiles lineales)
- Topografía (a partir de perfiles topográficos)

Como ya se ha comentado, en el caso de la planitud, para obtener los perfiles topográficos es necesario disponer de un equipo específico por lo que su análisis no se introduce en esta metodología. Sin embargo, sí se han tomado mediciones de la rugosidad.

Las medidas de los perfiles de rugosidad no se han realizado siguiendo las indicaciones la norma UNE-EN ISO 4288 [2] en lo referente a las longitudes de evaluación, ya que el objetivo principal de la medida era evaluar el perfil de forma a lo largo de toda la probeta, así como la posible geometría existente en el perfil de rugosidad. Por ello se ha tomado como longitud de evaluación 48mm en las cajas realizadas con la herramienta 1 y 46mm en las de la H2. El cambio de longitud de evaluación se debe a las interferencias en los resultados inducidas por el radio de curvatura de la herramienta en los extremos de la medición. Sin embargo, sí se ha tenido en cuenta la norma para regular el *Cut off* y obtener los distintos parámetros de rugosidad evaluados. En este caso, estos sí coinciden con los recogidos en la UNE-EN ISO 4287 [3] y los resultados se han estudiado en función a la Ra, Rt, Rsk y Rku.

El rugosímetro empleado es el Mahr Perthometer Concept PGK 120 y se ha empleado un palpador de ranuras cuyo alcance era de  $\pm 250 \mu\text{m}$ . Las medidas se han realizado en dos direcciones de la probeta (c y f) obteniendo las filas y columnas centrales que atraviesan cada cajera pasando por el punto central, o de inicio del mecanizado como se indica en el esquema de la Figura 3.23.



**Figura 3.23** – Esquema de situación de la medida de los perfiles de rugosidad y codificación de los ejes empleados con su respectivo signo positivo en la dirección de las flechas

#### **3.11.2.4. Propiedades físico-químicas**

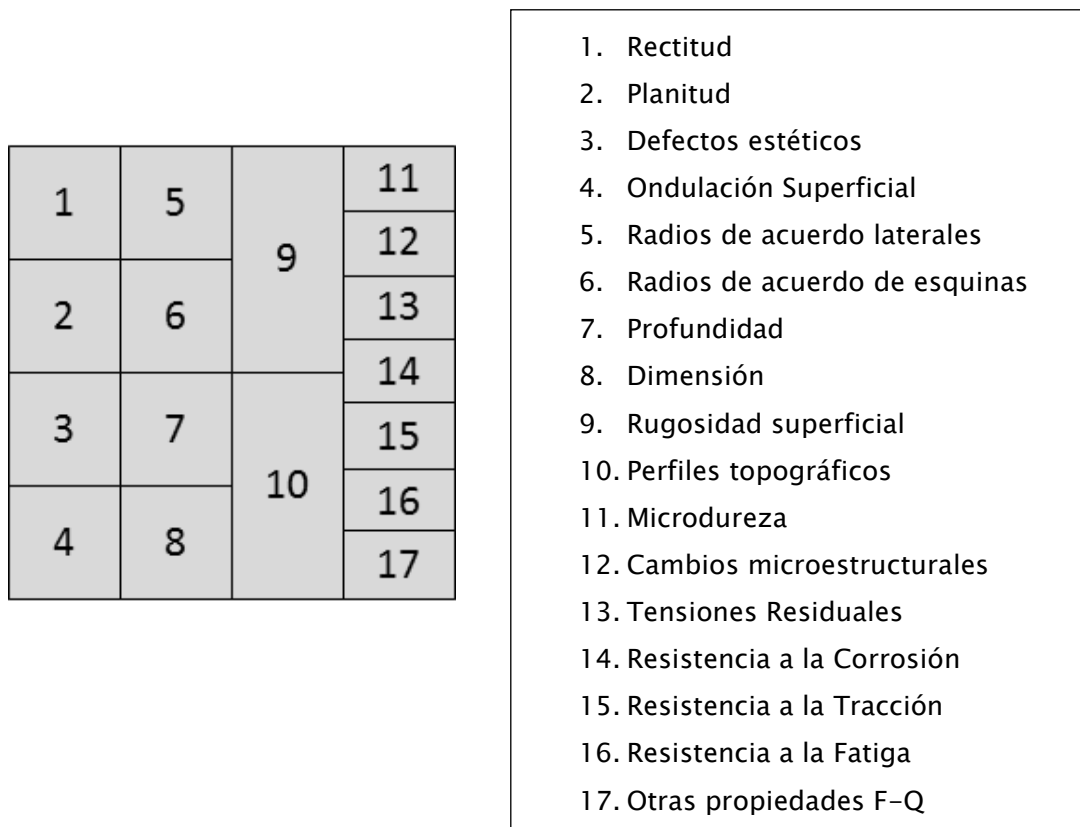
Las propiedades físico-químicas son las que pueden estar relacionadas con el funcionamiento en servicio de la pieza. Aquellas que se han considerado relevantes en el estudio del mecanizado de pieles son:

- Microdureza
- Cambios microestructurales
- Tensiones Residuales
- Resistencia a la Corrosión
- Resistencia a la Tracción
- Resistencia a la Fatiga

El protocolo de evaluación de las mismas no se contempla de forma individual en esta metodología pero se considera conveniente tenerlas en cuenta para trabajos futuros especialmente para obtener una mejor caracterización de las piezas mecanizadas y poder predecir su comportamiento.

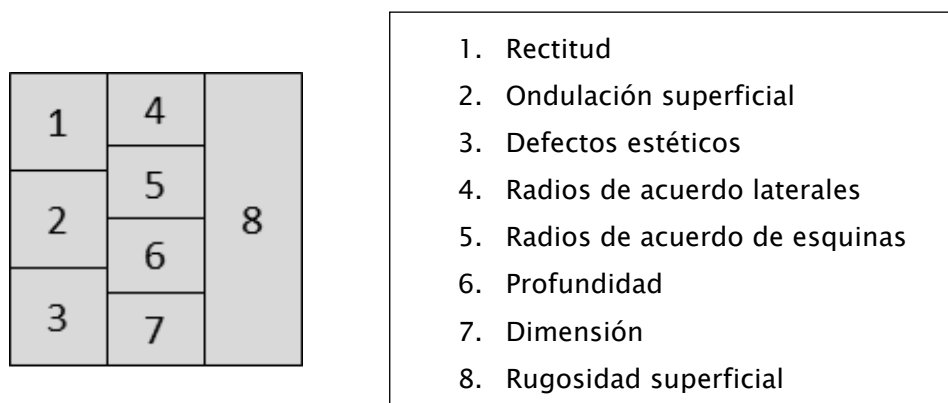
#### **3.11.2.5. Esquema resumen de la evaluación**

Para la evaluación de las probetas se han establecido unos valores máximos de tolerancia para cada característica. Las tolerancias de los parámetros evaluados se han determinado en función a las normas internas de empresa que limitan y definen las características de las piezas de fresado químico pues el objetivo de este trabajo es la sustitución de este proceso. Debido a la cantidad de parámetros que se evalúan para validar una probeta se ha decidido analizar de forma gráfica los resultados. Para ello se ha generado un código gráfico y esquemático (Figura 3.24) que permita identificar los ensayos que darían lugar a piezas inútiles según los datos obtenidos.



**Figura 3.24** – Codificación de los gráficos de evaluación de las probetas

El gráfico anterior puede variar según los parámetros analizados en cada ensayo. Por ejemplo en la Figura 3.25 se muestra el esquema gráfico utilizado en la evaluación de las cajas realizadas en el ensayo HSM2.0\_X\_01.XX. En él se ha respetado la estructura de la codificación anterior eliminando la columna de propiedades físico-químicas que no han sido evaluadas y las filas correspondientes a los parámetros de los otros tres bloques que tampoco han sido caracterizados.



**Figura 3.25** – Codificación de los gráficos de evaluación de las probetas de los ensayos iniciales

Los colores de utilizados para la evaluación son: verde, dentro de tolerancia; amarillo, para la zona límite, y rojo, que representa las características que se encuentran fuera de tolerancia.

**Tabla 3.7 –Tolerancias de admisión de piezas para cada propiedad evaluadas**

<b>Parámetros de calidad</b>	<b>Tolerancia</b>
<b>Dimensión</b>	$\pm 0,4$ mm
<b>Rectitud</b>	0.05 mm
<b>Planitud</b>	0.15 mm
<b>Defectos estéticos</b>	En grietas a (ancho) =2d (profundidad) Muestras picaduras $t=0.05*s$ (t=profundidad muesca, s=espesor final)
<b>Radios de contorno (acuerdo laterales)</b>	$\geq$ profundidad
<b>Profundidad</b>	$\pm 0,1$ mm
<b>Rugosidad superficial</b>	3.8 $\mu$ m

### 3.12. Conclusiones

Este capítulo se ha dedicado a la propuesta metodológica para el estudio del mecanizado de pieles. Para el estudio se ha considerado primordial el estudio de distintas opciones de utillaje de amarre que aseguren el ajuste y la sujeción de la pieza. Así mismo se han codificado los ensayos de forma numérica y por códigos de colores que faciliten la rápida identificación de los mismos a la hora de realizar el análisis. Se ha descrito una metodología para la realización de los ensayos incluyendo la descripción de los factores que se han considerado más relevantes en el proceso. Posteriormente se ha descrito el sistema de monitorización on-line del proceso, proponiendo un sistema de monitorización del espesor mecanizado mediante el uso de un sensor láser, el funcionamiento del mismo se basa en el conocimiento de la posición real y teórica de la superficie superior de la piel. Finalmente se proponen los protocolos de análisis y evaluación de los resultados obtenidos en la monitorización tanto on-line como off-line.

### 3.13. Referencias

- [1] Rodríguez M de la O, Collado V, Porras E, Mazquiarán C. *"Utillaje flexible basado en fluidos Magnetorheológicos para el fresado de largueros aeronáuticos"*. IMHE 2014;403:42-9.
- [2] UNE-EN ISO 4288 "Especificación geométrica de productos (GPS). Calidad superficial: Método del perfil. Reglas y procedimientos para la evaluación del estado superficial".
- [3] UNE-EN ISO 4287 "Especificación geométrica de productos. Calidad superficial: Método del perfil. Términos, definiciones y parámetros del estado superficial"



## Capítulo 4

---

### Resultados y discusión

---

## 4. Resultados y discusión

---



## 4.1. Introducción

En este capítulo se procederá a la exposición de los resultados obtenidos del estudio preliminar del mecanizado de pieles. El objetivo es validar la metodología propuesta y definir en su caso, los métodos necesarios para completar el estudio del mecanizado de pieles.

Para ello, se comenzará con el análisis de fuerzas y vibraciones, se describirán cualitativamente los resultados obtenidos y se propondrá un sistema de análisis para su estudio numérico.

A continuación, se procederá a evaluar la probeta siguiendo el protocolo descrito en el Capítulo 3. Se discutirán los resultados obtenidos en cada nivel de evaluación y se expondrá el esquema gráfico de la evaluación, a partir del cual se intentarán tomar algunos resultados como base para el diseño de futuros ensayos.

Por último, se expondrán los resultados derivados de la monitorización del espesor mecanizado mediante el uso de un sensor láser. En este apartado analizan los resultados obtenidos y se ponen de manifiesto todos los inconvenientes que se pueden presentar con este tipo de monitorización. Finalmente, se propondrá una ampliación de los estudios realizados para una correcta validación del sistema de monitorización.

Durante el análisis de los resultados se ha de tener en cuenta que la trayectoria de mecanizado consiste en una entrada en hélice en el centro de la cajera seguida de una estrategia de dentro hacia fuera. En los ensayos se han utilizado dos estrategias, en concordancia y oposición.

## 4.2. Análisis de fuerzas

La adquisición de fuerzas debe llevarse a cabo a una frecuencia elevada se forma que se asegure la adquisición de varios puntos en la zona de mecanizado, cuya longitud es menor a un cuarto revolución. De esta forma se pretende obtener información de varios puntos de giro de la herramienta y poder definir correctamente el comportamiento completo durante el mecanizado.

Con la frecuencia escogida, 10 000 Hz, se asegura la captura de aproximadamente 12 puntos entre la entrada y la salida de un filo en la pieza. Si a esta necesidad se le suma el tiempo de mecanizado se obtiene que los archivos generados contienen una gran cantidad de datos que a su vez no son fácilmente tratables ni clasificables por lo que se necesitaría un sistema posterior de filtrado que

#### 4. Resultados y discusión

---

permitiese trabajar directamente con los resultados, pero sin perder información del mecanizado en ningún momento.

Existen otras dificultades presentes a la hora de analizar las señales de fuerzas. Una de ellas es el cambio de trayectorias y por tanto la necesidad de distinguir la dirección del mecanizado en el punto de análisis de la fuerza para realizar un análisis comparativo.

Finalmente, se ha de tener en cuenta que los rangos de amplitud de la señal adquirida pueden proporcionar información sobre las vibraciones producidas en el proceso. Por otro lado, la variabilidad de la entrada del filo y la dirección del mecanizado también pueden ser factores que afecten a los resultados, por lo que el análisis de la señal se dificulta y habría que realizar estudios más concretos sobre este tema para determinar cuáles son las amplitudes debidas a qué fenómeno.

Para comenzar el análisis se va a proceder a realizar una primera observación de los perfiles de fuerza. Dada la repetitividad cualitativa de los mismos, se toma como referencia una gráfica significativa, como la correspondiente al ensayo HSM2.0\_2\_01.44, Figura 4.1. En este perfil se muestran las gráficas obtenidas con una aplicación diseñada específicamente para el análisis de las fuerzas, en el entorno Labview. Cabe destacar que la frecuencia de adquisición empleada para la captura de fuerzas en este ensayo ha sido 20 kHz, por lo que la información proporcionada es mayor que en el resto de los ensayos. Así mismo se debe tener en cuenta que en las gráficas representadas los valores del eje del tiempo tendrán como unidad 0,5 ms al corresponderse con el índice de toma de datos.

Las fuerzas recogidas del ensayo completo (Figura 4.1) muestran un comportamiento cíclico que aumenta la longitud del periodo de repetición, mantienen los mismos rangos de fuerzas en  $F_x$  y  $F_y$ . Este fenómeno se produce por al aumento de la longitud mecanizada en cada pasada, consecuencia de la estrategia de mecanizado escogida.

Son destacables en la representación la aparición de picos, que pueden asociarse al cambio de trayectoria y la realización de un pequeño ranurado para aumentar la zona que se está mecanizando. Estos está en buen acuerdo con el comportamiento examinado en los estudios de Qiong y col.[1]. Por otro lado,  $F_x$  y  $F_y$  presentan un comportamiento aparentemente simétrico, esto no ocurre en todos los casos al tratarse del valor nominal existiendo excepciones en los ensayos cuya velocidad de giro es igual a 10 000 rpm. En estos ensayos  $F_y$  es mayor que  $F_x$ .

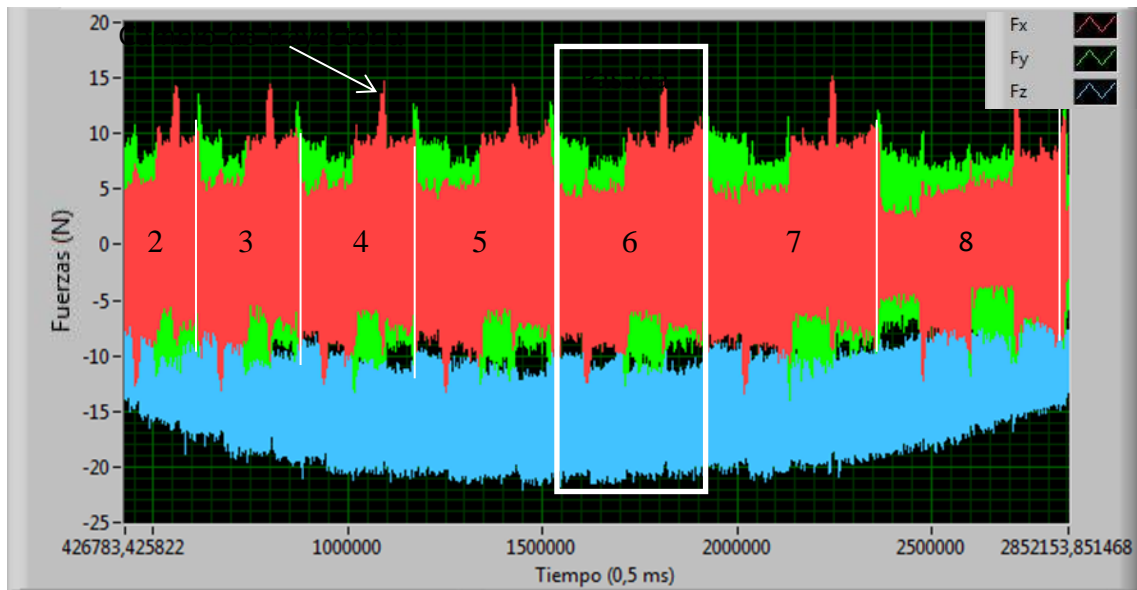


Figura 4.1 Fuerzas adquiridas en la zona estable del ensayo HSM2.0\_2\_01.44. Fx rojo, Fy verde y Fz azul

El comportamiento de Fz es diferente a los anteriores pero en todos los casos presenta valores negativos por lo que la herramienta tira de la piel hacia el cabezal. Este fenómeno se asocia al ángulo de hélice de la herramienta y depende del tipo de herramienta utilizada por lo que la geometría de los ángulos de corte es un factor a tener en cuenta.

Sin embargo, al observar los datos registrados, especialmente en los momentos en los que no se está mecanizado, se ha considerado necesario realizar un estudio del sistema de adquisición en vacío (Figura 4.2) para contemplar su funcionamiento y la aparición de posibles derivas electrónicas o de carga de los piezoeléctricos.

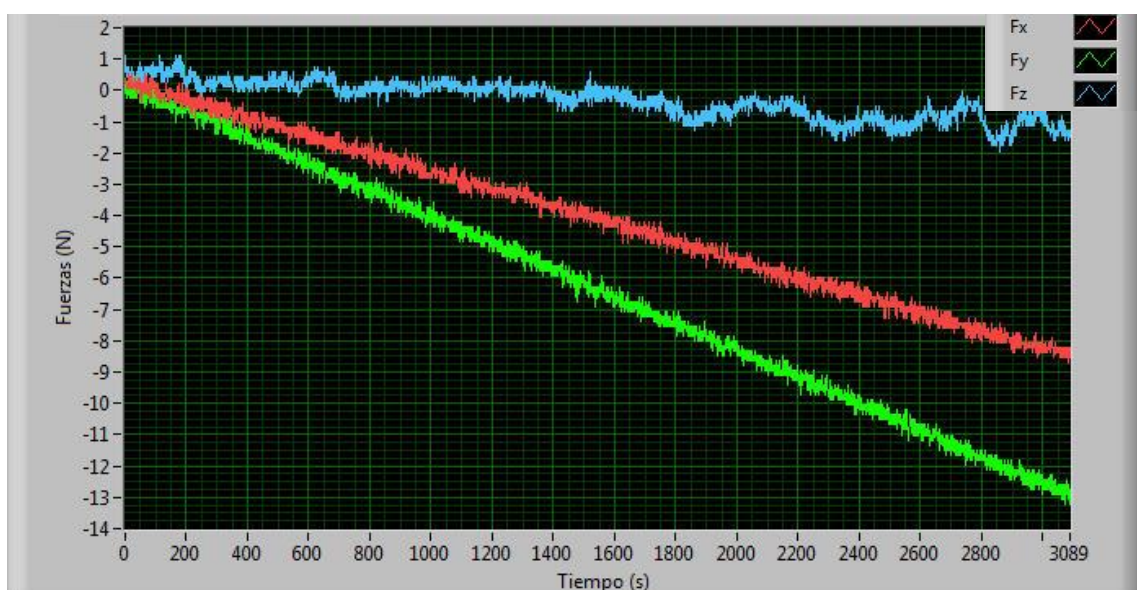
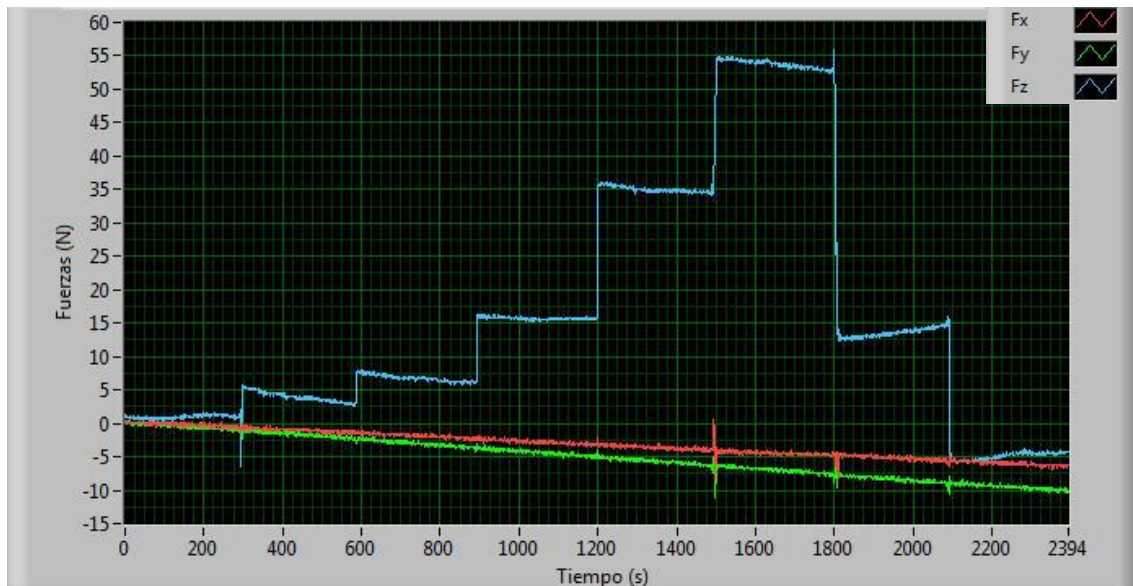


Figura 4.2 Estudio en vacío del comportamiento del sistema de adquisición de fuerzas

#### 4. Resultados y discusión

Dados los resultados obtenidos en  $F_z$ , se ha estimado oportuno estudiar la evolución de los valores en función de la aplicación de carga de forma que se determine la deriva asociada a la carga y se discrimine de la natural del sistema. Para este estudio se han utilizado una serie de cargas calibradas de 5, 10 y 20 N que se han colocado encima de la mesa dinamométrica a intervalos de tiempo iguales. Estas cargas han sido retiradas con posterioridad en dos tandas. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 4.3.

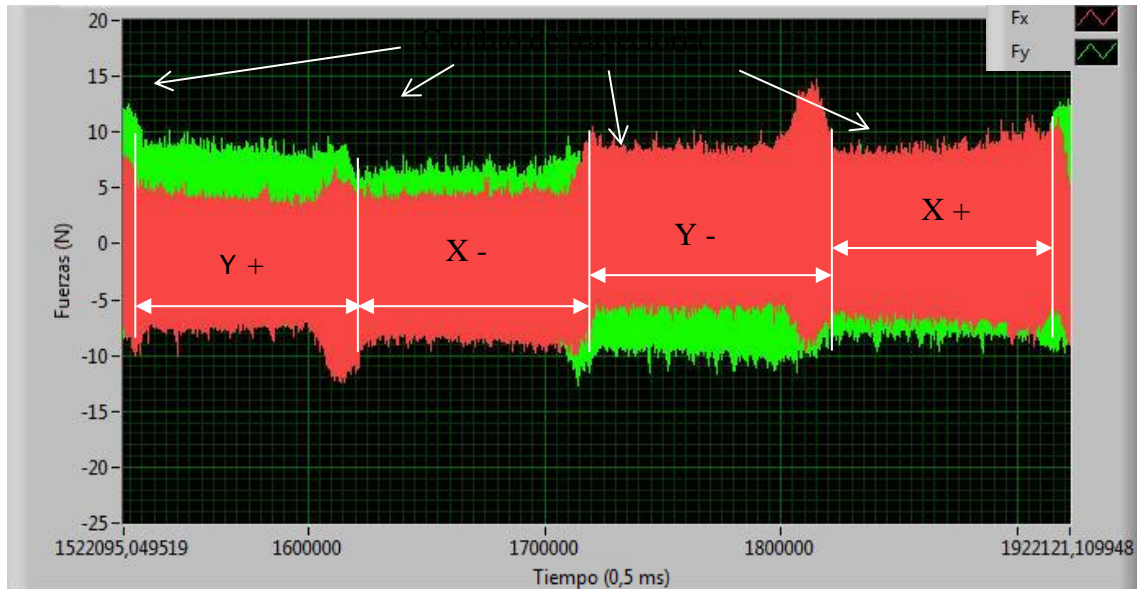
Se puede apreciar que la deriva producida en  $F_x$  y  $F_y$  es fácilmente corregible. El sistema utilizado para la nivelación de las fuerzas es el seguido por A. Lamikiz [2] en el cual, se toman las zonas no mecanizadas como referencia y mediante regresiones lineales se corrige el error producido por el sistema de adquisición.



**Figura 4.3** Ensayo para el estudio de la deriva generada por el sistema de adquisición de fuerzas

Este método no es aplicable a  $F_z$  ya que la deriva depende de la carga aplicada y de su retirada. Esta deriva puede ser del orden de 5 N en ambos sentidos, pero el rango de fuerzas registradas oscila entre los 4 y 40 N en sentido negativo, exceptuando los ensayos centrales en los que el espesor mecanizado ha sido mucho mayor y por tanto las fuerzas pueden alcanzar los 80 N en ese sentido. Si se consideran los ensayos de la periferia, la deriva podría representar un 12,5% en el caso de los valores máximos y más de un 25% en el de los valores medios. Por ello, su estudio no se considera fiable y el mecanizado se caracterizará a partir de los resultados obtenidos en  $F_x$  y  $F_y$ . No obstante, sí se considera importante el estudio de esta variable de salida para estudios posteriores en los que se tenga un correcto funcionamiento del sistema de adquisición o para los cuales el error represente un porcentaje menor que en los ensayos actuales.

Volviendo al análisis del ensayo HSM2.0\_2\_01.44, si se estudia la zona marcada en la Figura 4.1, se observa que existen a su vez cuatro zonas diferenciadas. Estas zonas se corresponden con las distintas direcciones de mecanizado (Figura 4.4).



**Figura 4.4** Fuerzas adquiridas en la pasada número 6 del ensayo HSM2.0\_2\_01.44. Fx rojo, Fy verde y Fz azul

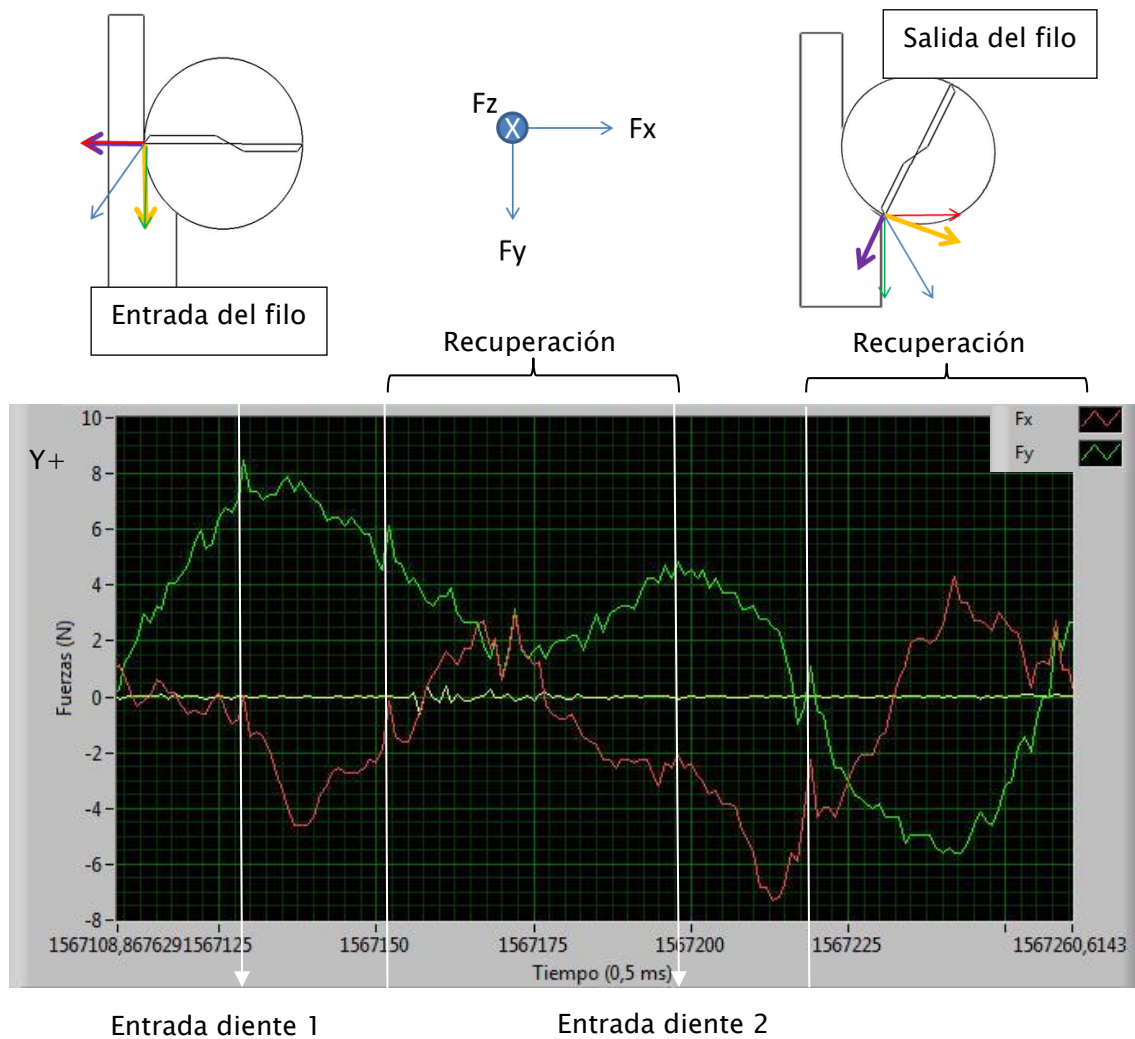
Los picos más pronunciados son el debido al cambio de trayectoria producidos en la esquina de cada cuadrado, punto en el que se realiza un pequeño ranurado como se ha explicado en la Figura 4.1. A su vez, se observan ondulaciones en las que los máximos y los mínimos se corresponden con entradas y salidas de los filos de la herramienta durante el mecanizado. Este comportamiento se analiza en las Figura 4.8 a Figura 4.7.

En estas figuras se estudian las fuerzas generadas en una revolución de la herramienta según la dirección de mecanizado. Los ejes representados al principio de la figura en azul se corresponden con los ejes de la mesa dinamométrica. Los esquemas representan las fuerzas teóricas ejercidas para cada dirección del ensayo para la entrada o la salida del filo de la herramienta. Las flechas representadas se corresponden con la fuerza ejercida (azul), la componente axial (morado) de la fuerza, la radial (amarillo) y las fuerzas registradas en Fx (rojo) y en Fy (verde). Las gráficas pertenecen a la selección de un tramo central de la pasada número 6 en cada una de las direcciones de mecanizado.

Para el análisis de estos esquemas se ha tenido en cuenta que el tiempo de mecanizado es aproximadamente 1,1 ms (22 unidades en el eje del tiempo) y el período en el que la herramienta no está mecanizando es aproximadamente de 2,6 ms (52 unidades). Este tiempo se ha llamado tiempo de recuperación en las gráficas.

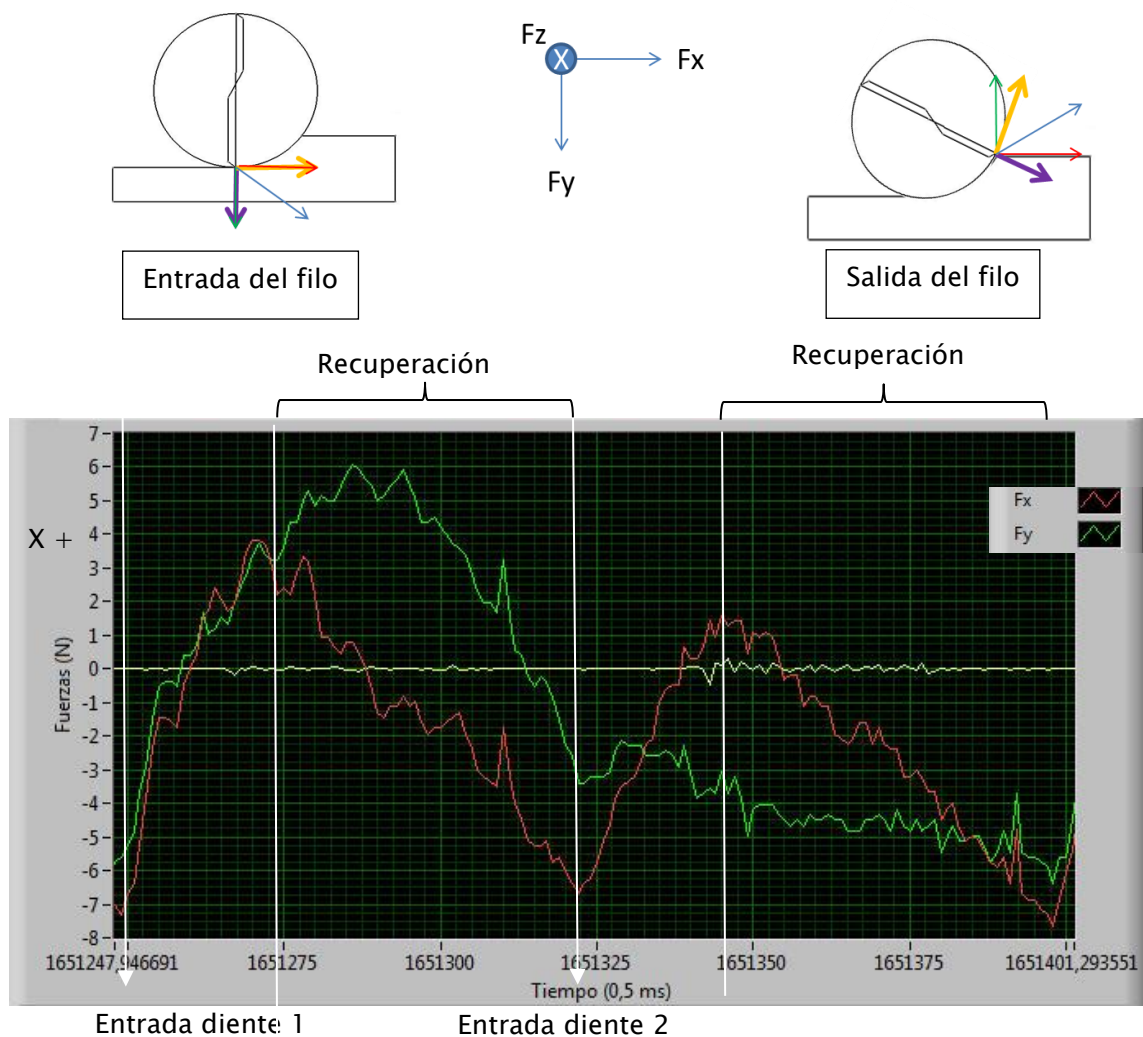
#### 4. Resultados y discusión

En la Figura 4.5 se aprecia que la entrada de cada filo viene determinada por un pico en las dos componentes de la fuerza analizadas. Como se esperaba a partir del análisis de los esquemas mostrados se observa que  $F_y$  tiene un máximo en la entrada del filo y un mínimo en su salida. El comportamiento de  $F_x$  es creciente durante el mecanizado y decreciente durante los tiempos de recuperación.



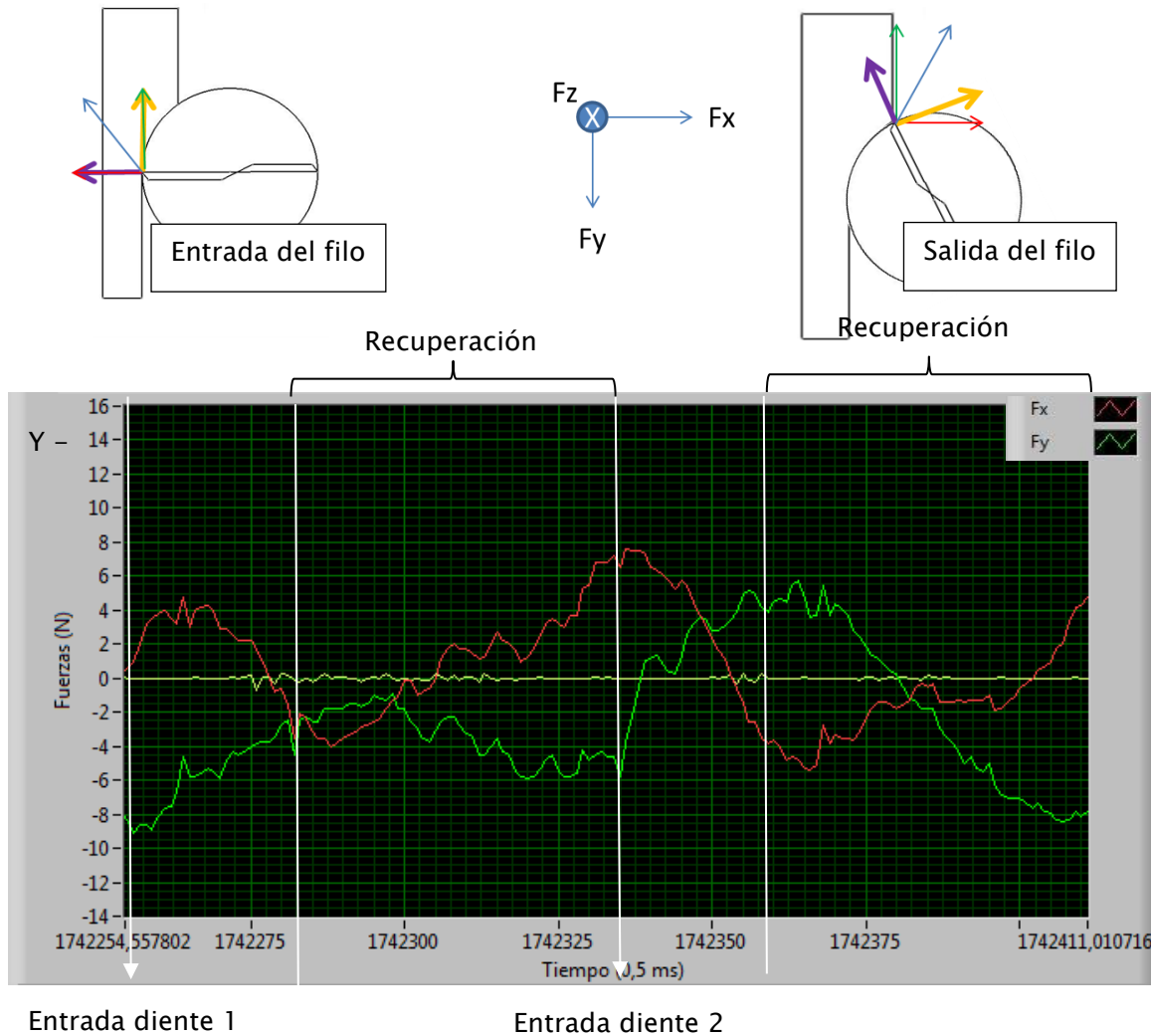
**Figura 4.5** Fuerzas ejercidas por la herramienta en una revolución al mecanizar en la dirección Y y siguiendo el sentido positivo según los ejes de la mesa dinamométrica

El segundo tramo (Figura 4.6) se corresponde con la dirección X del mecanizado. Lo mismo ocurre con las otras dos direcciones de mecanizado representadas en la Figura 4.7 y en la Figura 4.8.



**Figura 4.6** Fuerzas ejercidas por la herramienta en una revolución al mecanizar en la dirección X y siguiendo el sentido positivo según los ejes de la mesa dinamométrica

A continuación se analizan las fuerzas medias de cada pasada según la dirección de mecanizado. Para el análisis de estas fuerzas se ha estudiado el ensayo anterior a lo largo de todas las pasadas registradas (pasadas número 1–8) para obtener la dimensión requerida en el cajeado. Como se muestra en la Figura 4.9, y tras el cálculo de la pendiente de la gráfica, que se encuentra entre 0,2 y 0,45 según la dirección e mecanizado, todo parece indicar que las fuerzas  $F_x$  y  $F_y$  no se ven afectadas por el aumento de las longitudes de mecanizado ni por la pérdida de material en la piel a lo largo de las 6 primeras pasadas, en las dos últimas se observa una ligera reducción del valor nominal de las fuerzas, debida a la reducción de la rigidez de la pieza como en los resultados obtenidos por López de Lacalle [2].



**Figura 4.7** Fuerzas ejercidas por la herramienta en una revolución al mecanizar en la dirección Y y siguiendo el sentido negativo según los ejes de la mesa dinamométrica

Este hecho permite analizar para el estudio comparativo de la herramienta y los parámetros de corte empleados únicamente un tramo central del mecanizado y obtener de esta forma los valores de fuerzas  $F_x$  y  $F_y$  en las situaciones estables, para así dimensionar correctamente futuros sistemas de amarre.

Finalmente, se propone para estudios posteriores, un análisis detallado de las fuerzas en el dominio de la frecuencia y su relación con los parámetros de mecanizado empleados. De esta forma se entiende que se podrán discriminar procesos individuales que afecten a la producción de los principales picos y valles del espectro de fuerzas.



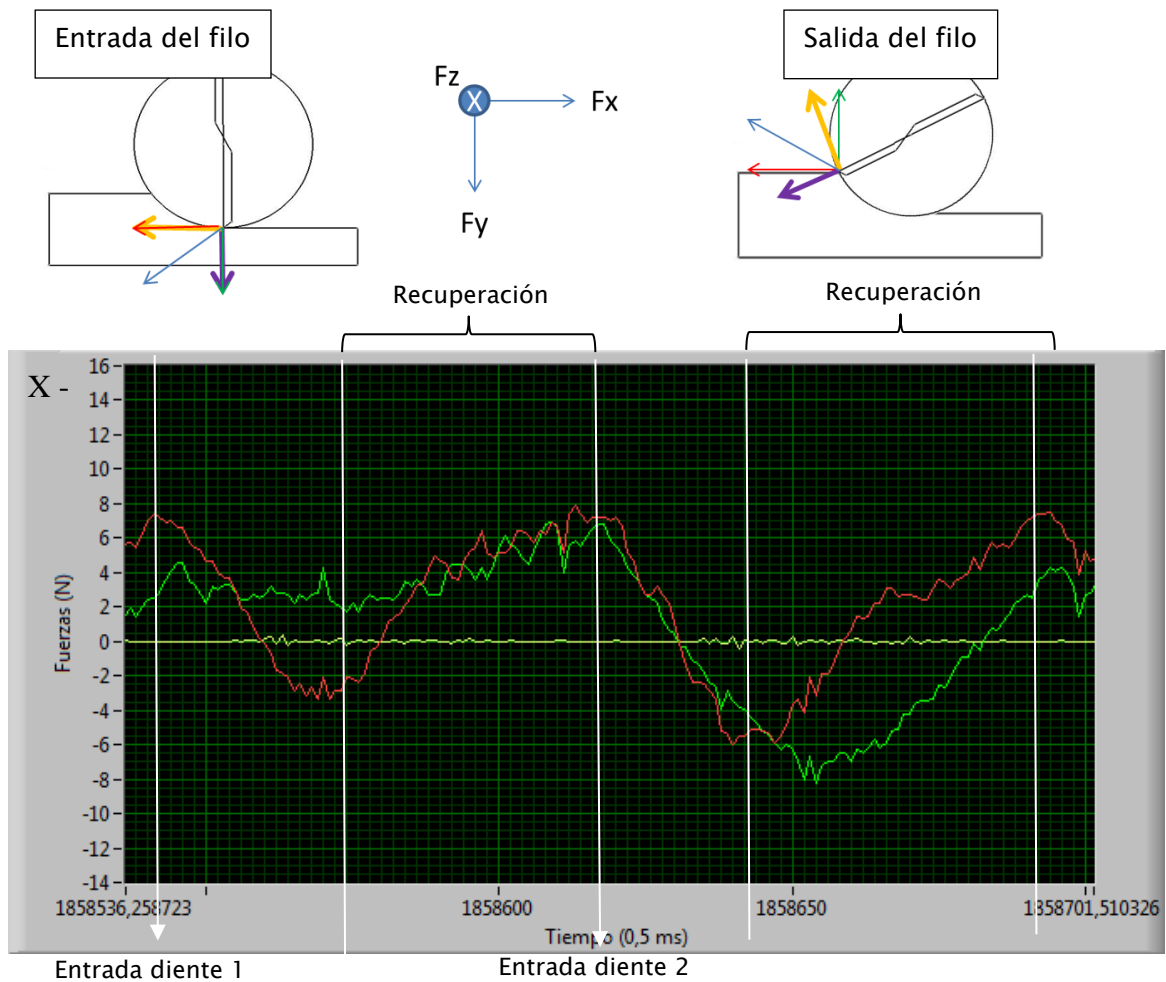


Figura 4.8 Fuerzas ejercidas por la herramienta en una revolución al mecanizar en la dirección X y siguiendo el sentido negativo según los ejes de la mesa dinamométrica

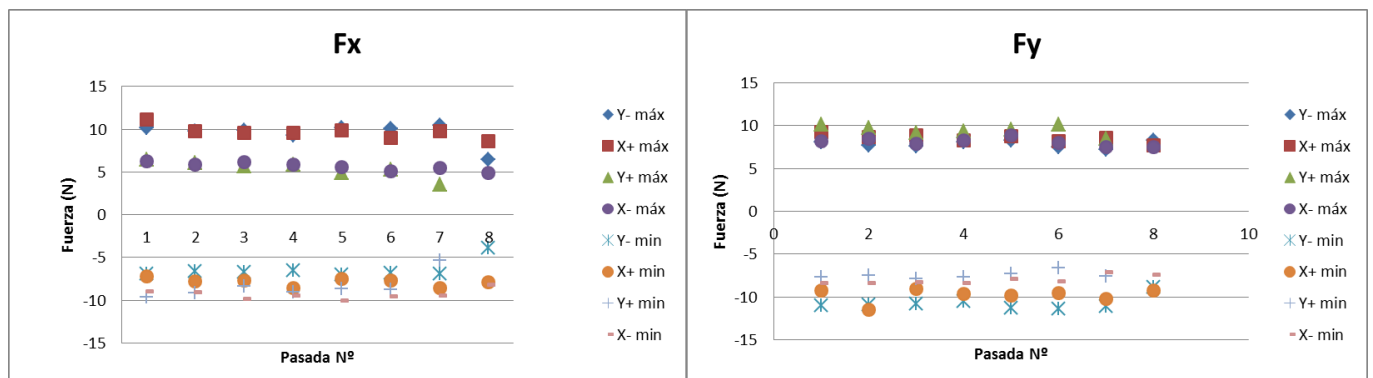


Figura 4.9 Fuerzas máximas y mínimas y vibraciones del ensayo HSM2.0\_201.44

### 4.3. Relación de vibraciones

Para el estudio de las vibraciones se propone el análisis de dos aspectos principales. El primero consiste en el estudio de las mismas mediante parámetros estadísticos donde se analice la amplitud, la media y la desviación estándar en función de los parámetros de mecanizado empleados en el ensayo.

El segundo se centrará en el análisis de las vibraciones en función de su comportamiento en el dominio de la frecuencia. Este análisis tiene como objetivo la identificación de las frecuencias para determinadas amplitudes y su relación con las variaciones del sistema.

Una primera aproximación se podría hacer mediante la Transformada Rápida de Fourier (FFT), esta permite identificar los picos producidos por las fuerzas, algunos de los valores principales deben coincidir con los obtenidos al realizar un análisis mediante FFT a las fuerzas. Así se identifican las posibles aplicaciones de filtros de paso bajo o alto en función de los parámetros a analizar.

Además del comportamiento de las fuerzas, las señales de vibraciones pueden proporcionar información sobre la frecuencia de salto de la viruta, el ruido de máquina registrado e incluso informaciones geométricas relativas del estado de la probeta.

Algunas de estas frecuencias estarán relacionadas con la velocidad de giro del husillo y podrán ser múltiplos de la misma. En la Tabla 4.1 se muestran las frecuencias relacionadas con el tiempo de mecanizado ( $f_1$ ), tiempo de recuperación del sistema ( $f_2$ ), velocidad de giro de la herramienta ( $f_3$ ).

**Tabla 4.1** Frecuencias relacionadas con fenómenos del mecanizado

S (rpm)	f1 (kHz)	f2 (kHz)	f3 (kHz)
8000	0,91	0,38	0,13
10000	1,13	0,47	0,17
12000	1,36	0,57	0,20

Es posible que el análisis de las vibraciones con FFT no sea suficiente debido al aumento del tiempo de mecanizado en cada pasada por lo que se propone para futuros estudios el análisis en frecuencia mediante Wavelets, donde se puedan descomponer las señales en funciones diferentes a la suma de senos otro tipo de análisis que no implique una superposición de funciones periódicas puras, como y determinar singularidades con variaciones en la amplitud o en la longitud de onda.

Por último se propone el estudio de las vibraciones en frecuencia relacionándolas con las frecuencias en longitud de los perfiles de rugosidad. Este motivo deriva de la observación de estos perfiles que se describirán más detenidamente en el apartado 4.6.

## 4.4. Macrogeometría

### 4.4.1. Rectitud

Los valores de desviación de rectitud se han calculado midiendo la distancia entre el máximo y el mínimo de los perfiles de ondulación registrados con el rugosímetro. Estos se encuentran recogidos en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2 Rectitud de los ensayos según la dirección de la medida

Ensayo	Rectitud ( $\mu\text{m}$ )	
	c	f
HSM2.0_1_01.11	37,73	35,45
HSM2.0_1_01.12	39,11	25,93
HSM2.0_1_01.13	31,72	45,02
HSM2.0_1_01.14	45,19	29,54
HSM2.0_2_01.21	54,30	64,49
HSM2.0_1_01.22	–	–
HSM2.0_1_01.23	101,90	106,70
HSM2.0_1_01.24	46,10	33,02
HSM2.0_2_01.31	55	31,52
HSM2.0_2_01.32	134,30	165,00
HSM2.0_1_01.33	–	–
HSM2.0_1_01.34	57,60	48,40
HSM2.0_2_01.41	14,90	46,20
HSM2.0_2_01.42	32,34	35,70
HSM2.0_2_01.43	25,08	33,29
HSM2.0_2_01.44	20,963	44,15

En los datos obtenidos se comprueba que los ensayos realizados en la periferia de la probeta muestran resultados mejores encontrándose casi todos ellos dentro de tolerancia. Si se representa la media de estos valores frente a la velocidad de giro se observa que los resultados son estables aunque parecen presentar un aparente aumento según se incrementa la velocidad de giro (Figura 4.10).

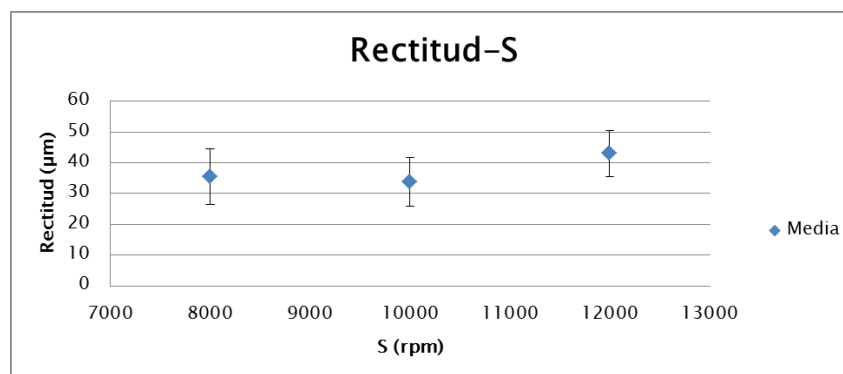


Figura 4.10 Rectitud frente a velocidad de giro de la herramienta

## 4. Resultados y discusión

En el caso del análisis de la rectitud frente a las herramientas parece que la desviación de rectitud obtenida puede ser algo menor con la herramienta tórica (H2) que con la herramienta frontal (H1). Este fenómeno debe estudiarse más detenidamente y relacionarlo con las fuerzas obtenidas en el corte ya que puede estar influenciado por las fuerzas negativas producidas por H1. Estas fuerzas pueden aumentar la flecha de la deformación de la piel durante el mecanizado en el caso de la fresa frontal.

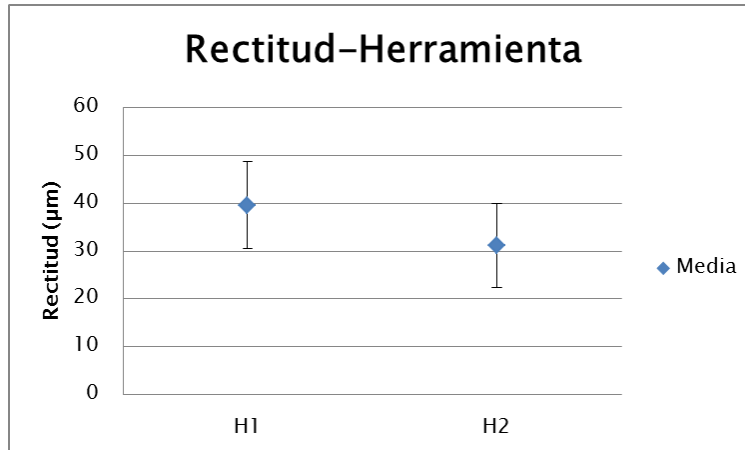


Figura 4.11 Rectitud según la herramienta utilizada

### 4.4.2. Ondulación superficial

La ondulación superficial se ha obtenido a partir de los perfiles de ondulación adquiridos con el rugosímetro. Con ella se pretende analizar el efecto de las fuerzas en la cajera y la variación de la forma según la evolución de las pasadas.

Para su análisis gráfico se ha realizado una tabla resumen donde se muestran todas las geometrías recogidas. Según el ensayo y la dirección de la muestra (columna, c, o fila, f).

En la Figura 4.12 se muestra un ejemplo del tipo de ondulación superficial registrada en los ensayos. Esta se ha codificado para su representación resumida con el símbolo “ ( “ para los perfiles convexos, como el representa por la figura a) del ejemplo, y “ ) ” para los cóncavos, b). Existe una excepción en la nomenclatura utilizada, la letra “W”, hace referencia a las ondulaciones dobles que reflejan una forma similar a la letra escogida. Estas presenta alturas mucho menores que las marcadas con paréntesis y la forma es cóncava y convexa dependiendo del tramo seleccionado.

En la Figura 4.13 se recogen todos los datos de ondulación posicionados según su ubicación en la probeta. En ella se observa una simetría con respecto al eje dibujado. También es destacable que todas las mediciones de en la dirección horizontal (f) tengan la misma forma. Esto se puede explicar con la flexión que presenta la pieza tras el mecanizado (Figura 4.14) y por tanto puede estar relacionada con las tensiones residuales inducidas a la pieza [3,4]. La simetría de los resultados

puede explicarse con el mismo hecho y no parece estar relacionada ni con el tipo de herramienta utiliza ni con la estrategia.

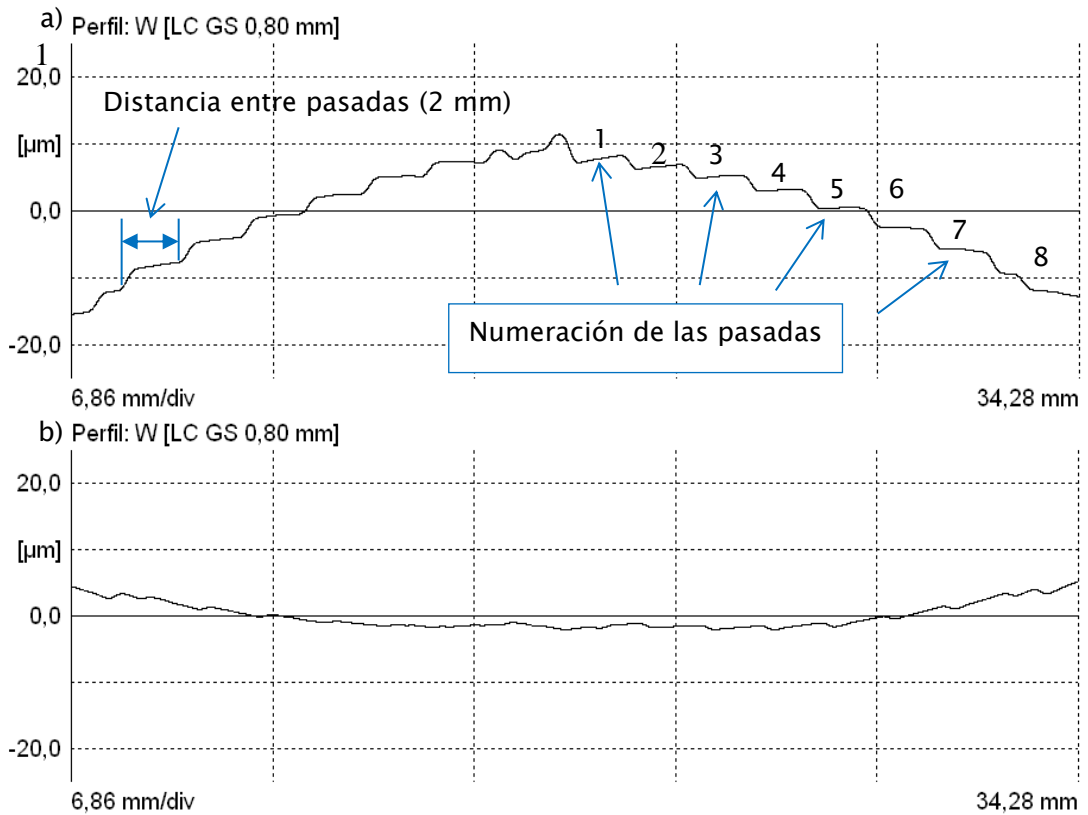


Figura 4.12 Perfiles de ondulación del ensayo HSM2.0\_1\_01.12. a) Perfil en la dirección c, b) Perfil en la dirección f

	1X		2X		3X		4X	
	c	f	c	f	c	f	c	f
1X	(	)	(	)	(	)	(	)
2X	)	)	)	)	)	)	W	W
3X	)	)	)	)	)	)	W	W
4X	(	)	(	)	(	)	(	)

Figura 4.13 Resumen gráfico de la ondulación superficial de la probeta del ensayo HSM2.0\_X\_01



Figura 4.14 Gap dejado por la probeta al apoyarla sobre una mesa de planitud












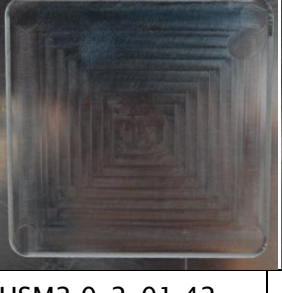


#### 4.4.3. Defectos estéticos

No se han apreciado defectos estéticos superficiales en la pieza debidos al mecanizado, como puede observarse en la Tabla 4.3. En todos los ensayos se pueden apreciar las trayectorias seguidas por la herramienta y la salida de la misma tras realizar la operación.

#### 4. Resultados y discusión

Algunas de ellas presentan trazados más homogéneos y rectos en las cajas de H1, los correspondientes a las de H2 son más desiguales y presentan una especie de onda hacia el interior en algunos casos. Estas marcas son diferentes debido a la geometría de la herramienta y sus características del radio de acuerdo del filo. Además se ha encontrado rebaba en los ensayos realizados con la herramienta frontal (H1) aunque su altura sólo es distinguible visualmente en el ensayo HSM2.0\_1\_01.23. Sin tener en cuenta este mecanizado central la altura de la rebaba del resto de los ensayos (H1) está en torno a 0,03 mm y se debe tener en cuenta para estudios posteriores en función de los requisitos de diseño de las pieles.

**Tabla 4.3** Registro gráfico de los cajeados realizados

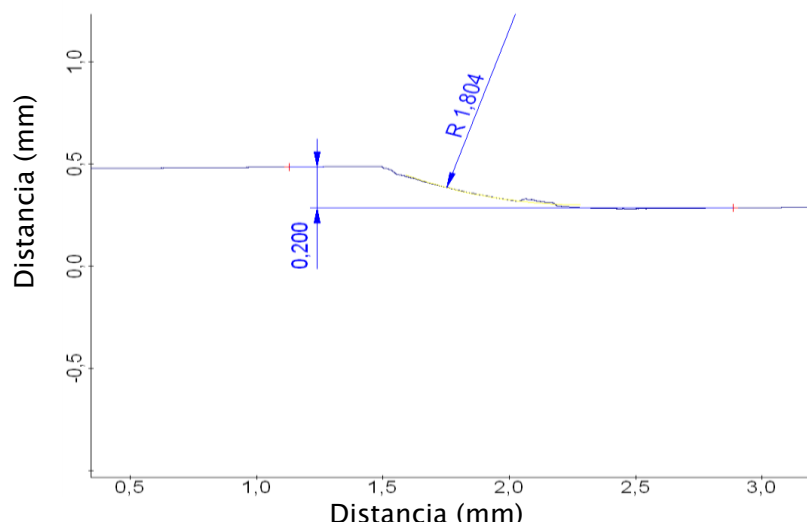
			
HSM2.0_1_01.11	HSM2.0_1_01.12	HSM2.0_1_01.13	HSM2.0_1_01.14
			
HSM2.0_2_01.21		HSM2.0_1_01.23	HSM2.0_1_01.24
			
HSM2.0_2_01.31	HSM2.0_2_01.32		HSM2.0_1_01.34
			
HSM2.0_2_01.41	HSM2.0_2_01.42	HSM2.0_2_01.43	HSM2.0_2_01.44

Finalmente, en algunos casos se aprecian pequeños picos en el centro de la probeta. Estos picos reflejan el efecto de la entrada de la herramienta en las cajas. La de H2 es más limpia y deja una maca menor que la de H1 como se observará con mayor claridad en los resultados de ondulación superficial y rugosidad.

## 4.5. Evaluación dimensional

### 4.5.1. Radio de acuerdo de contorno

La medición de estos radios de acuerdo se ha realizado con el rugosímetro de forma directa. Los resultados obtenidos presentan radios de acuerdo inferiores a los nominales de la herramienta (Figura 4.15) en todos los casos por lo que se considera que los resultados no son evaluables ya que pueden estar falseados por el apoyo lateral del palpador. De este modo no se valida el método de medida para esta característica y se propone la realización de réplicas para su evaluación. En el caso de optar por este método para evaluar los radios de contorno sería necesario diseñar una metodología propia para el sistema ya que las réplicas tendrán un espesor muy pequeño y pueden presentar errores de medición debidos a su flexión.



**Figura 4.15** Resultado obtenido de la medición del espesor y el radio de acuerdo de contorno para el ensayo HSM2.0\_2\_01.42

Pese a esto, esta característica ha sido evaluada en el esquema final ya que para las cajas realizadas con H2, estas medidas son apreciablemente mayores que el espesor mecanizado, condición de aceptación de pieza. Esta condición no se cumple con la otra herramienta (H1) por características geométricas de la misma.

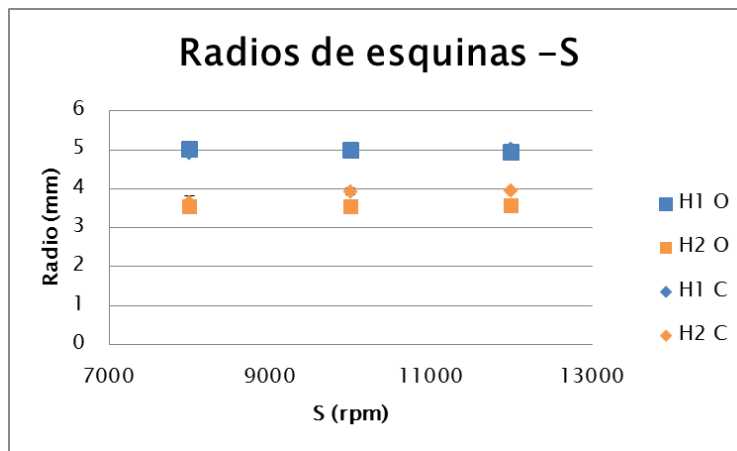
4.5.2. Radio de acuerdo en las esquinas

Los resultados obtenidos para los radios de acuerdo de las esquinas se muestran en la Tabla 4.4.

**Tabla 4.4** Radios de acuerdo de esquinas para la probeta HSM2.0\_X\_01

(mm)	X1		X2		X3		X4	
1X	5,02	4,93	4,93	4,92	5,03	4,96	4,89	4,86
	5,08	5,04	5,14	4,96	4,85	4,96	4,93	4,93
2X	3,89	4,07			5,01	5,01	4,83	5,02
	3,78	4,05			5,01	5,01	4,95	5,02
3X	3,87	4,05	4,11	4,30			5,02	5,02
	3,88	3,93	3,93	4,15			5,02	5,02
4X	3,64	3,86	3,53	3,63	3,53	3,53	3,53	3,53
	3,55	3,55	3,53	3,57	3,53	3,53	3,53	3,53

Se observa una clara diferencia entre los radios de acuerdo obtenidos para los dos tipos de herramientas (Figura 4.16). En efecto, los de H1 son más cercanos a los nominales, en cambio los ensayos realizados con H2 tienen un radio menor al no haber tenido en cuenta en el control el diámetro efectivo de la herramienta para cada altura.



**Figura 4.16.** Valores de los radios en las esquinas en función de la velocidad de giro

4.5.3. Profundidad del mecanizado

Las profundidades de mecanizadas en los cajeados periféricos se encuentran representadas en la Figura 4.17. En la gráfica se observa que la estrategia de oposición mantiene una correcta profundidad de mecanizado, en todos los casos dentro de tolerancia. Sin embargo, los valores obtenidos para la estrategia de concordancia son mayores que los esperados. Este fenómeno invalida la aplicación del estudio de Popma [5] en el mecanizado de pieles, al ir siguiendo una estrategia de dentro hacia fuera.



Además se observa una mejor precisión de la profundidad para las cajas realizadas con la H2 debida a las menores fuerzas generadas en el eje z.

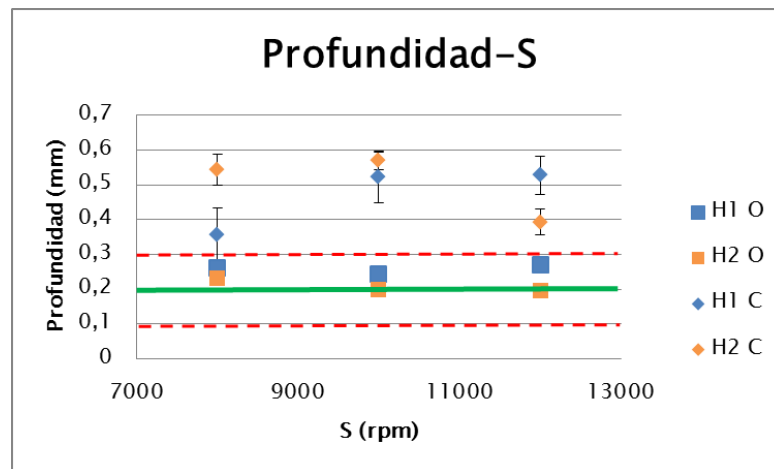


Figura 4.17 Profundidades mecanizadas

Esta distribución de esfuerzos se explica mediante la aplicación del momento lineal a los resultados de fuerzas. Cuando la herramienta gira en oposición genera una fuerza menos negativa en el mecanizado por lo que levanta menos la piel y permite alcanzar los espesores de mecanizado deseados dejando la pieza dentro de tolerancias. En el caso del mecanizado en concordancia el módulo de las fuerzas es mayor por lo que la fuerza en z es mayor y tira de la piel hacia el cabezal, esta fuerza deforma la pieza y produce un mecanizado de mayor espesor.

Para las cajas interiores los valores de sus espesores son 0,73mm (HSM2.0\_2\_01.32) y 1,05 mm (HSM2.0\_1\_01.23). Al fenómeno descrito anteriormente hay que sumarle que el defecto de forma puede estar vinculado a un incorrecto amarre de la piel. Como se verá en el apartado 4.7 el sistema escogido no asegura el correcto ajuste de la piel y presenta desviaciones de planitud.

#### 4.5.4. Dimensiones de las cajas

En cuanto a las dimensiones obtenidas se observa (Figura 4.18) que las cajas realizadas con la H2 son de tamaño inferior al nominal. Esto se debe a un error en programación en la cual el control de la máquina no ha tenido en cuenta el diámetro efectivo de la herramienta tórica para la profundidad de mecanizado seleccionada, al igual que se ha visto con los radios de acuerdo de esquinas.

Sin embargo, los cajeados mecanizados por la H1 presentan dimensiones en tolerancia por lo que se deduce que con una correcta programación que tenga en cuenta la geometría de la herramienta, se podrían obtener con los parámetros seleccionados las dimensiones requeridas sin importar el tipo de estrategia de mecanizado seguida.

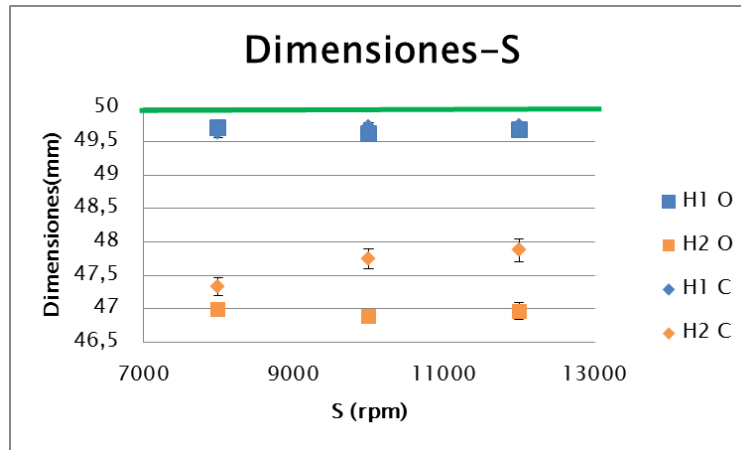


Figura 4.18 Dimensiones de las cajas

#### 4.6. Microgeometría

Para el estudio de la microgeometría sólo se ha tenido en cuenta la rugosidad de los perfiles analizados. Para este estudio se ha contemplado el análisis de distintos parámetros. La evaluación para el criterio de aceptación se realizará utilizando el parámetro Ra que es el parámetro más extendido industrialmente y que por tanto puede servir como referencia a la hora de la implantación del mecanizado de pieles. Además se han tenido en cuenta otros dos parámetros para definir el estado de la piel, Rsk (sesgo) y Rku (curtosis), estos parámetros dan información estadística sobre la distribución del perfil de rugosidad obtenido.

En la Tabla 4.8 se recogen todos los valores de los parámetros estadísticos de los perfiles de rugosidad agrupándolos según el ensayo y la dirección de la medida.

Si se evalúa el parámetro Ra de los ensayos de la periferia de la probeta, frente a los parámetros de mecanizado se obtiene la Figura 4.19. En ella se aprecia un incremento de la dispersión de los resultados según se aumenta la velocidad de giro del husillo. Esto indica que para bajas velocidades la herramienta utilizada o la estrategia seguida no afectan aparentemente a la rugosidad obtenida. Sin embargo esta influencia aumenta según se incrementa la velocidad de giro, dejando como mejores parámetros el uso de H2 con la estrategia de oposición. Cabe destacar que todos los datos analizados en los ensayos de la periferia están dentro de las tolerancias habitualmente requeridas en piezas de fresado químico.

Así mismo se puede analizar el efecto de la posición del mecanizado a una misma velocidad de giro de la herramienta (Figura 4.20). En ella se observa una mayor estabilidad (Rsk) en los perfiles del mecanizado con H2 aunque los valores de Ra sea peores e incluso en el caso del mecanizado en la zona central se salgan de tolerancias. Esto se produce ya que esta herramienta favorece la aparición

de vibraciones lo cual facilita que durante el mecanizado se produzcan una rugosidad mayor. En el mecanizado central de H1 también aumenta el valor de Ra pero este aumento no es tan notable.

Tabla 4.5 Valores obtenidos para los distintos parámetros de rugosidad

Ensayo	Ra		Rt		Rsk		Rku	
	c	f	c	f	c	f	c	f
HSM2.0_1_01.11	0,34	0,24	4,18	3,07	-0,15	-0,43	4,74	3,30
HSM2.0_1_01.12	0,58	0,27	5,98	2,83	0,00	-0,43	3,35	3,21
HSM2.0_1_01.13	0,28	0,22	3,11	2,39	-0,26	-0,55	3,20	3,33
HSM2.0_1_01.14	0,42	0,29	9,96	3,26	0,59	0,50	15,20	3,75
HSM2.0_2_01.21	0,79	0,64	10,73	7,45	0,72	-0,26	6,93	5,91
HSM2.0_1_01.22	-	-	-	-	-	-	-	-
HSM2.0_1_01.23	0,69	0,85	9,75	15,96	-0,33	0,93	6,73	12,71
HSM2.0_1_01.24	0,46	0,33	28,76	4,95	11,66	0,42	249,66	5,37
HSM2.0_2_01.31	0,80	0,81	9,48	9,51	-0,10	0,28	5,49	6,04
HSM2.0_2_01.32	6,04	5,79	39,09	41,09	-0,30	-0,50	2,84	3,29
HSM2.0_1_01.33	-	-	-	-	-	-	-	-
HSM2.0_1_01.34	0,80	0,76	37,25	29,46	5,47	3,31	69,12	34,97
HSM2.0_2_01.41	0,26	0,52	4,74	10,37	-0,38	0,85	11,50	13,29
HSM2.0_2_01.42	0,26	0,27	3,72	3,18	0,43	-0,53	6,68	3,89
HSM2.0_2_01.43	0,13	0,47	1,58	4,31	0,36	-0,44	3,82	3,50
HSM2.0_2_01.44	0,32	0,22	4,74	1,93	0,09	-0,41	6,75	3,21

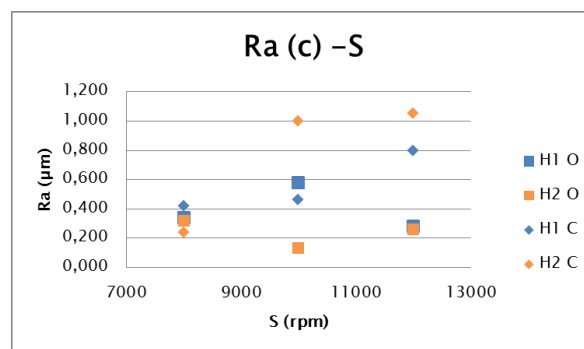


Figura 4.19 Ra obtenido en la dirección c según la velocidad de corte de cada ensayo

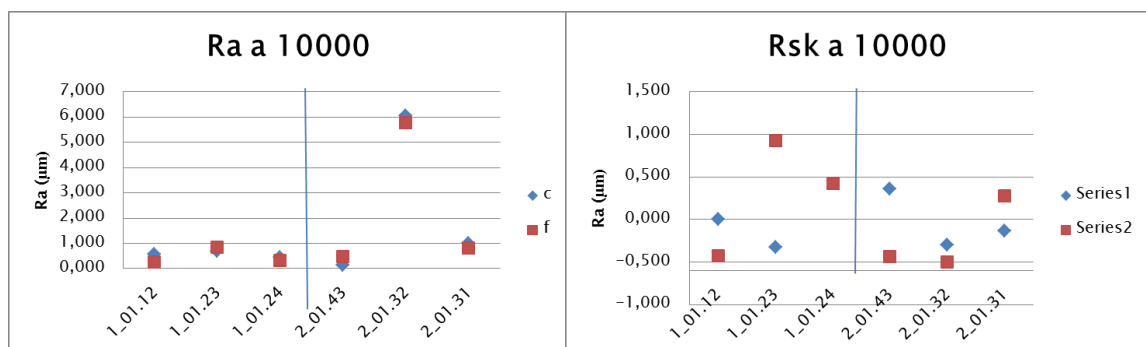


Figura 4.20 Ra y Rsk para una velocidad de giro de 10000 rpm

#### 4. Resultados y discusión

---

En cuanto a los otros parámetros estadísticos, los datos analizados  $Rku$  se encuentra en todas las muestras por encima de 3, lo que implica un perfil con picos y valles ocasionales. Estos valores pueden llegar a ser muy elevados ya que hay perfiles con  $0,46 \mu\text{m}$  de  $Ra$  y  $28,76 \mu\text{m}$  de  $Rt$  como es el caso del ensayo HSM2.0\_1\_01.24 o del HSM2.0\_1\_01.34 cuyos  $Rku$  aumentan a 249,66 y 69,12 respectivamente. Ambos, son ensayos realizados con H2 y a velocidades altas de giro del cabezal por lo que la aparición de vibraciones se favorece, como se ha comentado anteriormente, y puede ir acompañada de picos y valles muy pronunciados en el mecanizado.

Los perfiles no simétricos, cuyo valor de  $Rsk$  es mayor que 1 se corresponden con ensayos en los que la estrategia de mecanizado era en concordancia. De estos parámetros se deduce que el mecanizado, como se ha mencionado anteriormente, es más inestable. Estos ensayos también tienen asociados los parámetros de  $Rku$  más elevados, es decir la distribución del perfil es más irregular, no tan cercana a la línea promedio. Un posible motivo de estos resultados puede estar ligado, como en el caso anterior, a la aparición de vibraciones en la pieza. Para comprobar esta hipótesis sería necesario relacionar estos resultados con las amplitudes registradas por el acelerómetro colocado en la pieza.

Por último, se analizan dos perfiles como ejemplo y se exponen sus características principales y su relación con los parámetros de mecanizado.

La Figura 4.21 muestra una aparente simetría del perfil ( $Rsk = 0,00$ , Figura 4.21). Esta simetría está relacionada con la distancia entre pasadas escogida durante el mecanizado. En el centro del perfil se observan los picos correspondientes a la entrada de la herramienta, esto picos son muy pronunciados en el caso de H1, lo que explica un mayor valor de  $Rku$  para estos ensayos. Los períodos de picos y valles son simétricos con respecto a este pico marcado en las figuras con un eje. Esta simetría está ligada a la estrategia de mecanizado, de dentro hacia fuera. El eje se corresponde con el centro del cajeado y sirve como punto de simetría para los perfiles en la dirección c y f. Del mismo modo, se pueden identificar las ocho pasadas realizadas para obtener el cajeado a cada lado del eje de simetría.

Este fenómeno se repite en la mayoría de los perfiles y en el caso de los ensayos de H2 se observan además las curvas producidas por el radio del filo de la herramienta (Figura 4.22).

El perfil que presenta más irregularidades es el del ensayo HSM2.0\_1\_01.24-c (). Los elevados valores de  $Rku$  se deben a los picos centrales de más de  $20 \mu\text{m}$  de altura y la asimetría está producida por una colocación desplazada del palpador. El pico y valle mencionado anteriormente coincide con el eje de simetría del perfil.

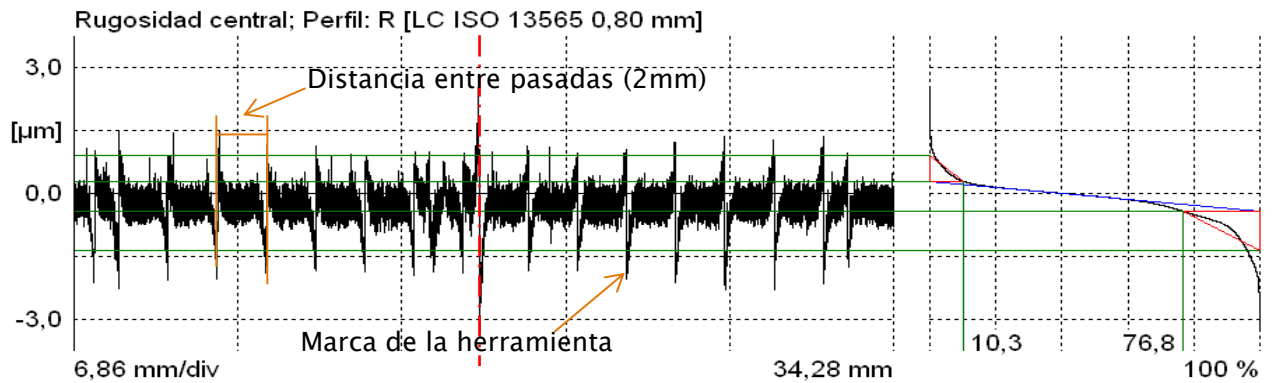


Figura 4.21 Perfil de rugosidad y curva de distribución del perfil del ensayo HSM2.0\_1\_01.12-c

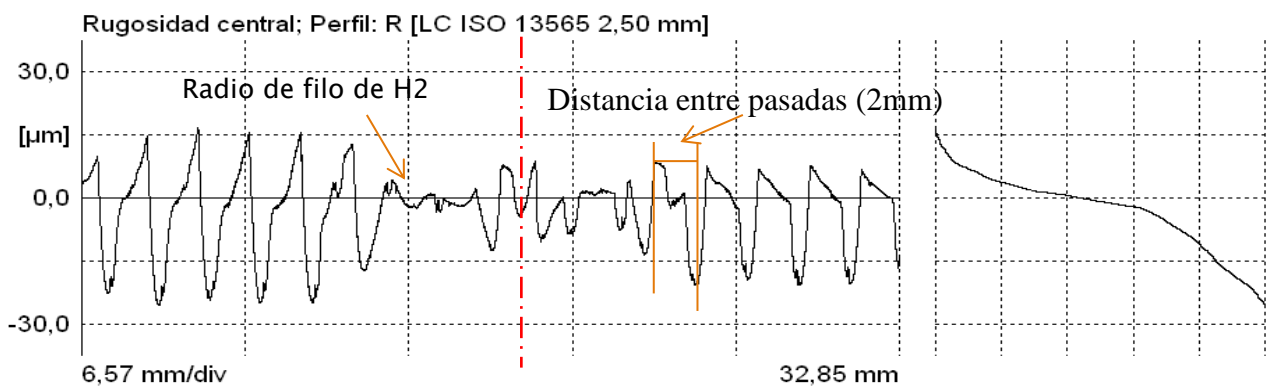


Figura 4.22 Perfil de rugosidad y curva de distribución del perfil del ensayo HSM2.0\_2\_01.32c

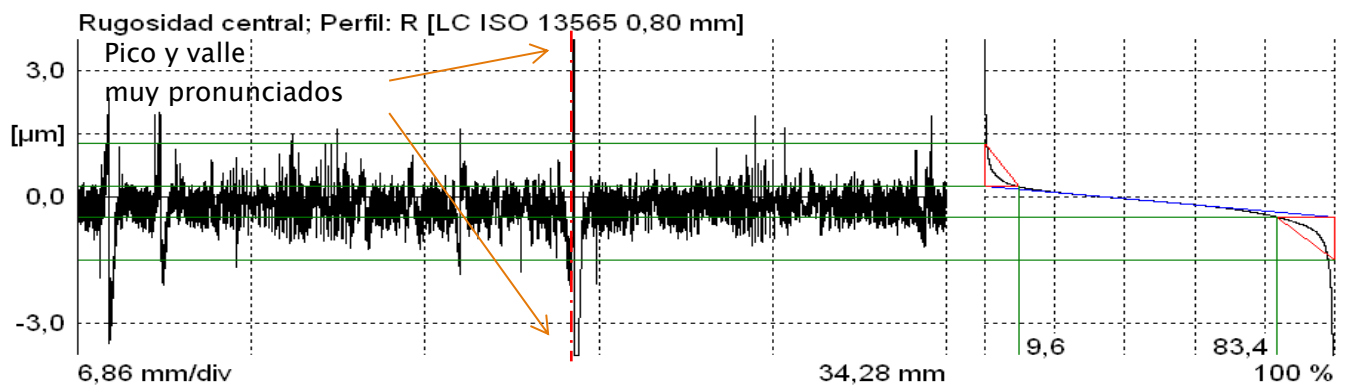


Figura 4.23 Perfil de rugosidad y curva de distribución del perfil del ensayo HSM2.0\_1\_01.24-c

Para completar el estudio, se propone para el futuro, el análisis de la posible relación rugosidad-fuerza lo que permitiría proponer un método de monitorización on-line de la calidad superficial.

#### 4.7. Comprobación utillaje

Debido a las deformaciones macrogeométricas de la probeta registradas tras el mecanizado se ha realizado una verificación del utillaje de amarre seleccionado. Se ha aproximado la planitud del

#### 4. Resultados y discusión

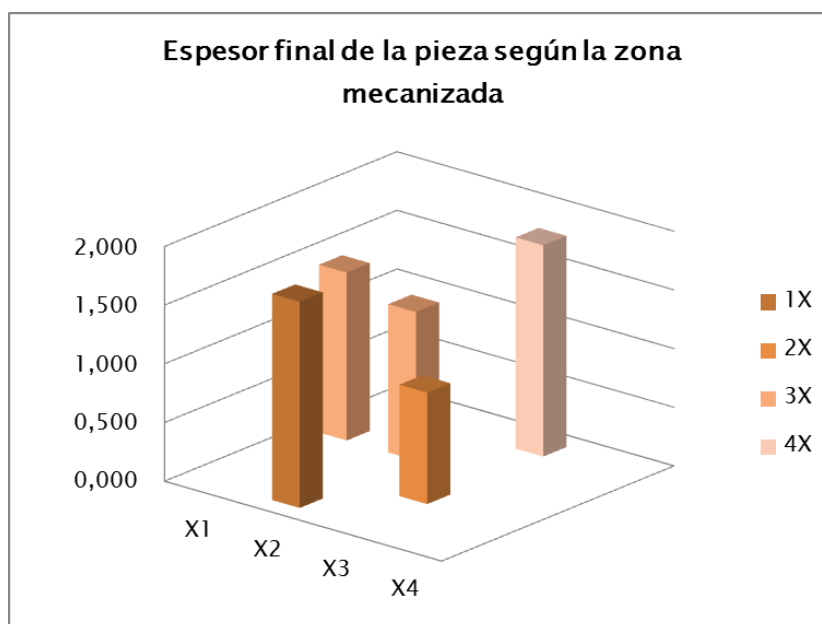
mismo obteniendo los resultados de la Tabla 4.6. En ellos se observa que, manteniendo la sujeción de los tornillos incluso antes de mecanizar, la deformación de la piel en la zona central supera los valores de tolerancia exigidos.

Por tanto se considera objetivo primordial de futuras metodologías la mejora del utillaje ya que podría facilitar el proceso al aumentar el rango de tolerancias permisibles asociadas a la operación de mecanizado.

**Tabla 4.6** Planitud de las probetas montadas sobre el utillaje de amarre

Montaje	Valor (mm)
Utillaje sin probeta	0,03
Utillaje con probeta sin mecanizar	0,27
Utillaje con probeta mecanizada	0,54

Si se estudia el espesor final de la pieza y se observa que sobre todo los espesores mecanizados en los ensayos centrales son considerablemente mayores a los esperados. Estos resultados están relacionados tanto con las fuerzas ejercidas con la herramienta como con la deformación anteriormente descrita.



**Figura 4.24** Espesor final de la piel para los ensayos con  $S = 10\,000$  rpm

Como los inconvenientes están ligados a la deformación en el eje z se considera que el primer parámetro a mejorar es el sistema de ajuste entre el utillaje y la piel. En consecuencia, se considera apropiado testar otros sistemas de amarre como los mencionados anteriormente en este trabajo (sistemas de vacío, líquidos magnetorehólicos, etc.).

## 4.8. Monitorización del espesor mecanizado

Para la validación de esta parte de la metodología se han realizado dos ensayos. Uno inicial que permite la identificación de los problemas relacionados con la monitorización del espesor y ligados a la señal producida y uno general donde se trabajan con parámetros industriales y se reproducen en cierta medida las condiciones de mecanizado empleadas en la industria.

### 4.8.1. Ensayo de identificación de problemas en la medición

Es el ensayo realizado con una herramienta de punta de bola. Las señales se corresponden con pasadas de 40 y 60 mm de longitud.

En las señales obtenidas con el láser se pueden clasificar 4 zonas marcadas en la Figura 4.25 con su respectiva codificación de colores:

- Zona mecanizada (60mm) – Láser por delante de la herramienta
- Zona mecanizada (60mm) – Láser por detrás de la herramienta
- Zona no mecanizada (40mm)– Láser por delante de la herramienta
- Zona no mecanizada (40mm) – Láser por detrás de la herramienta

Además se identifican dos tipos de interferencias de viruta:

- Viruta de mayor tamaño, que se queda en la zona no mecanizada
- Viruta más fina que se queda la zona de mecanizado

Se aprecia por tanto que las virutas alteran la medida en varias décimas de mm pero son fácilmente identificables. Por tanto proponen tres opciones para eliminar o disminuir estas interferencias en la señal del sensor:

- Emplear un sistema para evacuar la máxima cantidad de viruta posible, ya sea mediante soplado o aspiración en el caso del fresado vertical. Si se tratase de fresado horizontal podría no ser necesario ningún sistema de evacuación de viruta.
- Desarrollar un algoritmo de detección/filtrado para ignorar las interferencias derivadas de la viruta.
- Aislar el láser para que la viruta no interfiera con el láser por medios mecánicos o por flujo de aire

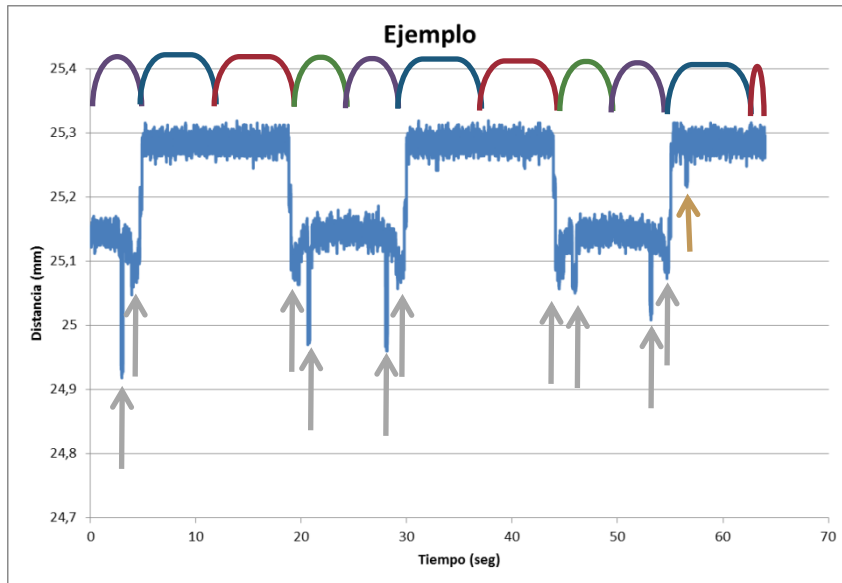


Figura 4.25. Ejemplo señal láser

#### 4.8.2. Ensayos de identificación de la presencia de viruta durante el mecanizado

La siguiente tanda de ensayos pretende validar el filtrado de la señal mediante un algoritmo de programación pero para ello es necesario previamente caracterizar la señal recibida. En esta caracterización se incluye en efecto debido a la medición de la viruta y el efecto producido por presencia de distintas densidades de viruta, a partir del cual se pueda concluir la necesidad o no de un sistema de aspiración para la implantación final del sistema de medición en el proceso.

Para caracterizar los resultados se expone el tratamiento de la señal recibida.

##### 4.8.2.1. Identificación de la viruta en la señal registrada

Los datos se obtenidos se agrupan en dos columnas, el tiempo de captura y la tensión relativa a la distancia del sensor láser a la pieza. El cambio de esta señal a distancia en mm se realiza mediante la corrección de la ecuación (1) en el caso en el que la tensión antes de mecanizar sea 0 V.

$$d = -V * 2.54 + 46.7 \quad (1)$$

Para el caso en el que la tensión antes de mecanizar de 10, la corrección se corresponde con la de la ecuación (2)

$$d = V * 2.54 + 21.3 \quad (2)$$



Aplicando esta corrección se obtienen gráficas como la representada en la Figura 4.26. En los ensayos se pueden identificar la entrada del sensor en la pieza, la aparición de viruta y la salida del láser de la pieza.

Por un lado, se observa que el ancho de la pieza registrado (14,24 mm) es menor al real (15 mm) aunque esta diferencia se puede aparecer al realizar la medición fuera del rango del sensor. También se observa que el tiempo de respuesta ante el cambio tanto en la entrada como en la salida en la pieza es menor al cambio real registrando pequeños escalones inexistentes.

Por otro lado, el ruido registrado por el láser es igual 0,64mm, más de tres veces superior a la tolerancia requerida por diseño. Así mismo el salto registrado por interferencia de viruta es igual a una variación de 0,85 mm, que se corresponde con los valores esperados tras la medición del tamaño de viruta.

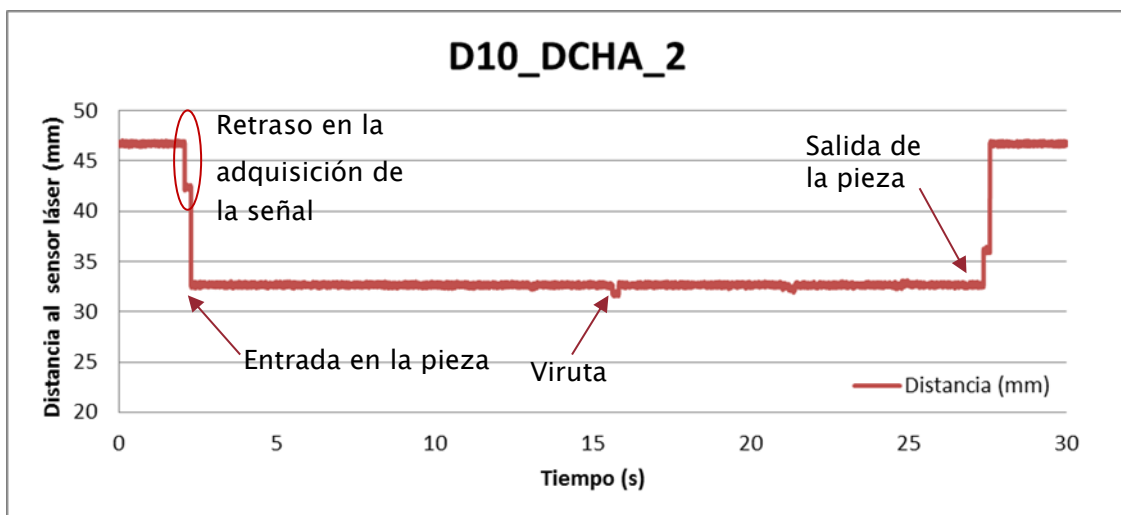


Figura 4.26 Distancia de la pieza al sensor láser durante el ensayo D10\_DCHA\_2

En la Figura 4.27 se muestran los resultados para el ensayo equivalente con el plato de planear. Se observa que la diferencia de señal debida a la viruta es mayor, ya que la espiral generada tiene un diámetro de base entre 4 y 5 mm y una longitud aproximada de 7mm. La diferencia de altura registrada está 0,1-0,16 mm por lo que puede que la medición del sensor haya capturado el espesor de la viruta.

Las virutas obtenidas en los ensayos presentan geometrías y tamaños totalmente diferentes como se puede observar en la Figura 4.28. Esto explica los diferentes comportamientos frente a la medición láser.

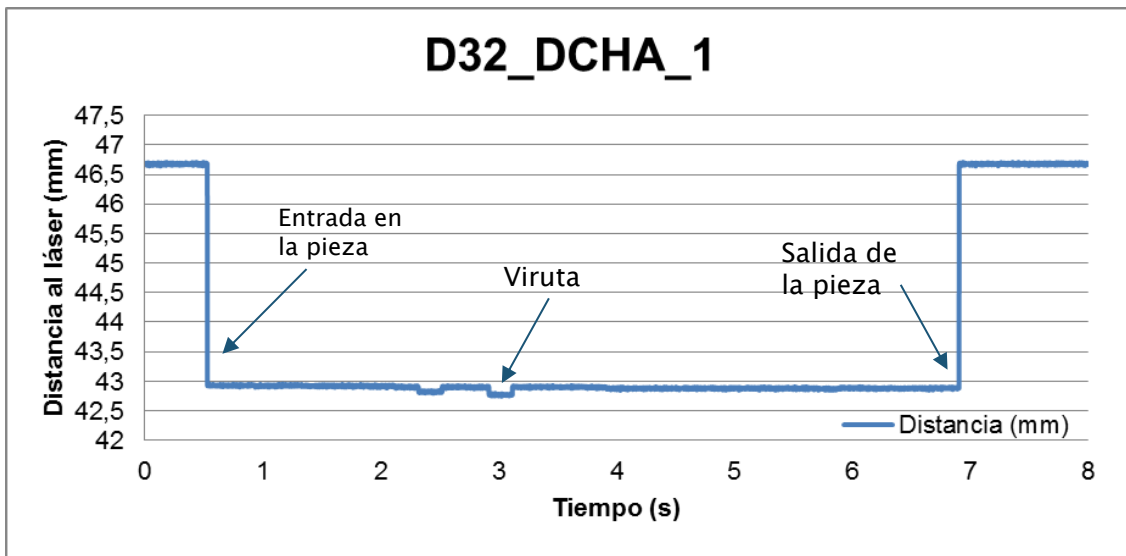


Figura 4.27 Distancia de la pieza al sensor láser durante el ensayo D32\_DCHA\_1.



Figura 4.28 Virutas obtenidas en los ensayos realizados. Izquierda, ensayo D32 y derecha ensayo D10.

#### 4.8.2.2. Vibraciones durante el mecanizado

Para el estudio de ruido registrado por el sensor láser y la identificación de su procedencia se ha realizado una aplicación en el entorno Labview que permite tratar la señal con el ajuste de la recta anterior. A su vez, esta aplicación evalúa medias, máximos y mínimos de la señal junto con su desviación estándar en un intervalo determinado de señal. El intervalo escogido de la señal ( $t=1s$ ) se encuentra situado aproximadamente en el centro de la placa pero no debe contener saltos debidos a la interferencia de la viruta. La frecuencia de adquisición de datos (1000Hz) ha sido la misma en todos los ensayos.

Este estudio permite evaluar el comportamiento del sensor (“ancho de banda”) según la herramienta utilizada y en función de la dirección de mecanizado seguida. En la Tabla 4.7 se presentan los valores obtenidos para los ensayos realizados con el plato de planear.

El cambio de altura registrado se debe a una variación en el montaje del sistema que aleja el láser de la pieza. Los ensayos de izquierda y derecha presentan resultados similares y la diferencia de altura

entre el mecanizado a izquierda y a derecha se debe a la altura del mecanizado, en el ensayo de derecha se encuentra el escalón 1 mm por debajo que el de izquierda.

**Tabla 4.7** Valores estadísticos obtenidos de los ensayo realizados con el plato de planear.

	Media	Dev. Std	Max	Min	Banda	Observaciones
D32_DELANTE_1	31,632	0,007	31,654	31,612	0,042	
D32_DELANTE_2	31,632	0,007	31,654	31,609	0,045	
D32_DELANTE_3	36,375	0,007	36,397	36,355	0,042	
D32_DELANTE_4	29,704	0,246	36,092	29,633	6,459	Deriva en la señal
D32_DETRÁS_4	37,202	0,454	37,306	26,922	10,384	Deriva en la señal
D32_DETRÁS_5	38,703	0,802	38,823	23,264	15,559	Deriva en la señal
D32_DETRÁS_6	37,736	0,473	37,823	28,772	9,051	Deriva en la señal
D32_IZDA_1	41,892	0,012	41,934	41,853	0,081	
D32_IZDA_2	41,902	0,011	41,941	41,863	0,078	
D32_IZDA_3	41,915	0,010	41,944	41,886	0,058	
D32_DCHA_1	42,879	0,009	42,908	42,846	0,061	
D32_DCHA_2	42,911	0,010	42,950	42,879	0,071	
D32_DCHA_3	42,892	0,011	42,937	42,859	0,078	

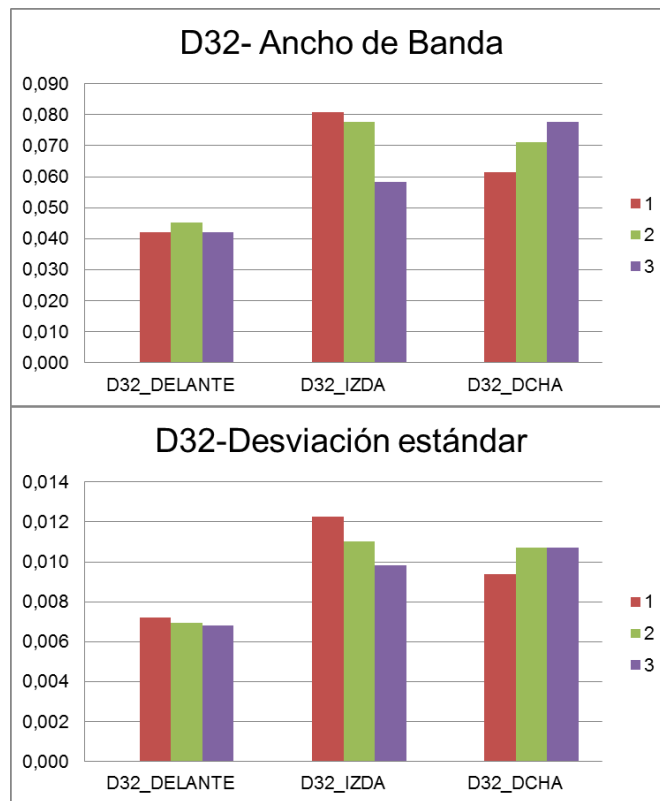
De forma más gráfica se presenta en la Figura 4.29 un diagrama de barras con la evolución de la desviación estándar de los datos obtenidos. Los ensayos D32\_DETRÁS\_X se han descartado en este estudio debido a las derivas registradas en la señal.

A continuación, en la Tabla 4.8 se muestran los valores obtenidos en los ensayos realizados con la herramienta de tórica (D10), cabe destacar que la velocidad de avance y por tanto de registro de datos desciende a casi un cuarto de la utilizada en los ensayos del plato de planear ya que la frecuencia de adquisición se mantiene constante, 1000 Hz.

Los ensayos de esta tanda son mucho más estables presentando diferencias únicamente en las alturas registradas pero este hecho es justificable con el orden de realización de los ensayos, como se observa en la Figura 4.30.

Cabe destacar, que debido a las vibraciones del mecanizado, la desviación estándar de los datos registrados y el “ancho de banda” de los resultados es mayor en los ensayos de mecanizado con la fresa que con el plato de planear, este fenómeno también podría explicarse a partir de la velocidad de avance de la herramienta.

#### 4. Resultados y discusión

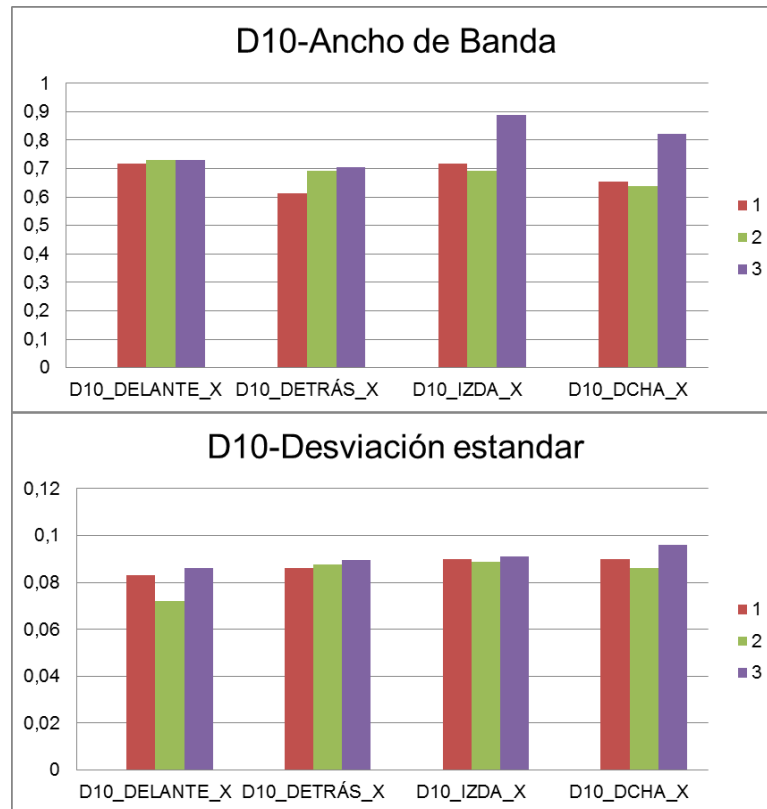


**Figura 4.29** Desviación estándar y ancho de banda (ruido) de los ensayos realizados con el plato de planear

**Tabla 4.8** Valores estadísticos obtenidos de los ensayos realizados con la fresa tórica.

	Media	Dev. Std	Max	Min	Banda	Observaciones
D10_DELANTE_1	32,989	0,083	33,407	32,689	0,718	
D10_DELANTE_2	32,989	0,072	33,433	32,702	0,731	
D10_DELANTE_3	32,976	0,086	33,368	32,636	0,731	
D10_DELANTE_4	33,616	0,094	34,073	33,080	0,992	
D10_DETRÁS_4	33,629	0,086	33,994	33,381	0,614	
D10_DETRÁS_5	33,616	0,088	33,968	33,276	0,692	
D10_DETRÁS_6	33,629	0,090	34,007	33,302	0,705	
D10_IZDA_1	31,683	0,090	32,062	31,344	0,718	
D10_IZDA_2	31,664	0,089	32,049	31,357	0,692	
D10_IZDA_3	31,683	0,091	32,101	31,213	0,888	
D10_DCHA_1	32,649	0,090	33,015	32,362	0,653	
D10_DCHA_2	32,649	0,086	33,002	32,362	0,640	
D10_DCHA_3	32,649	0,096	33,106	32,284	0,823	

Para comprobar el motivo de este efecto han realizado una serie de ensayos en vacío, sobre la placa plana sin mecanizar, en los que se evita la posible interferencia derivada de las vibraciones del cabezal durante el giro y/o el mecanizado. La elección del tramo coincide con el método anterior, intervalo central de la medida en 1 s de tiempo. los resultados obtenidos se resumen en la Tabla 4.9.



**Figura 4.30** Desviación estándar y ancho de banda (ruido) de los ensayos realizados con herramienta tórica (D10).

Se observa que existe una leve interferencia en los valores registrados durante mecanizado frente a los registrados sin mecanizar debido a la vibración de la máquina. No obstante, ésta representa un 8% de la media del ancho de banda de los ensayos de D10 y un 20% de los ensayos realizados con la D32. En el caso de la desviación estándar la reducción es de un 5,5% y un 14,5% respectivamente. De esto se puede deducir que parte del ruido registrado se debe a las vibraciones del cabezal al que está sujeto el sensor láser, por lo que una parte del ruido registrado se puede deber a las vibraciones del cabezal al estar girando. Éstas deberían cuantificarse para la correcta implantación de la técnica. Aun así, el ruido registrado, especialmente en la señal a baja velocidad, es superior a los 50  $\mu\text{m}$  en ambos casos, por lo que debe pensarse en la existencia de otro tipo de interferencias diferentes a la propia precisión del sensor.

**Tabla 4.9** Datos obtenidos en la medición realizada sin mecanizar sobre una superficie con baja densidad de viruta empleando las dos variedades de viruta recogidas en los ensayos anteriores.

	Media	Dev. Std	Max	Min	Banda
D_10_baja densidad_plano	38,917	0,083	39,322	38,643	0,679
D_32_baja densidad_plano	34,608	0,008	34,634	34,585	0,049

## 4. Resultados y discusión

### 4.8.3. Ensayo para la evaluación de la cantidad de viruta

Los últimos ensayos tienen como objetivo fijar un máximo en la cantidad de viruta acumulada en la pieza para el cuál la detección del láser siga siendo válida. Los registros obtenidos para tres densidades diferentes de viruta se encuentran en la Figura 4.31. De estos resultados se deduce que una densidad media de viruta podría llegar a ser filtrada pero un exceso de acumulación produciría errores en el sistema de medición del espesor (D10 alta densidad de viruta). Por este motivo, se recomienda realizar una prueba de mecanizado con su posterior registro que permita evaluar la presencia estadística de viruta. De esta forma se puede predecir la necesidad de un sistema de aspiración auxiliar que evite alcanzar altas densidades de viruta depositadas en la pieza.

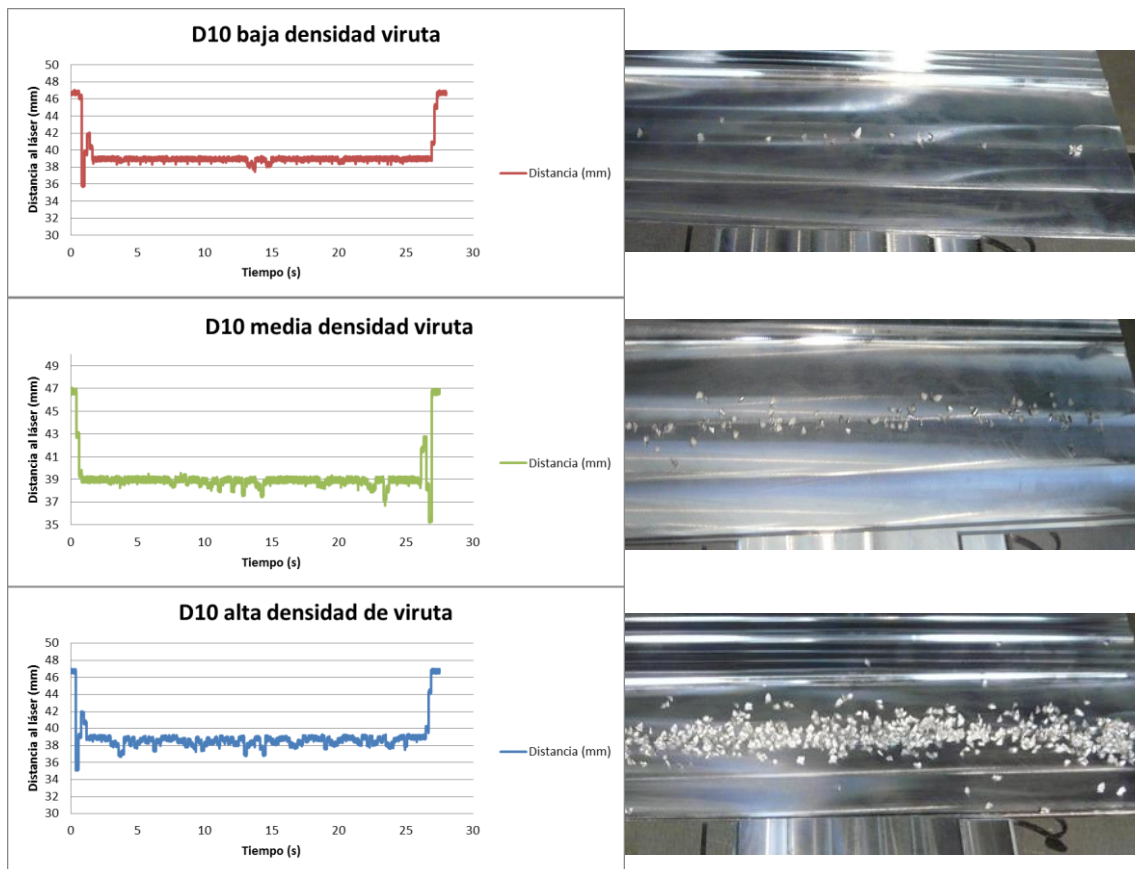


Figura 4.31 Señal obtenida en función de la densidad de viruta y la imagen de la densidad correspondiente

### 4.8.4. Desarrollo de una aplicación de filtrado on-line de las señales

Como se ha visto, las señales producidas por la aparición de viruta durante el mecanizado son fácilmente identificables. Por ello, se ha decidido desarrollar un sistema que permita discriminar la sección de la señal que corresponde con la aparición de viruta durante el mecanizado de la pieza de la correspondiente a la superficie de la misma.

Este sistema consiste en una aplicación de tratamiento de señales diseñada en el entorno de programación Labview cuya interfaz está representada en la Figura 4.32.

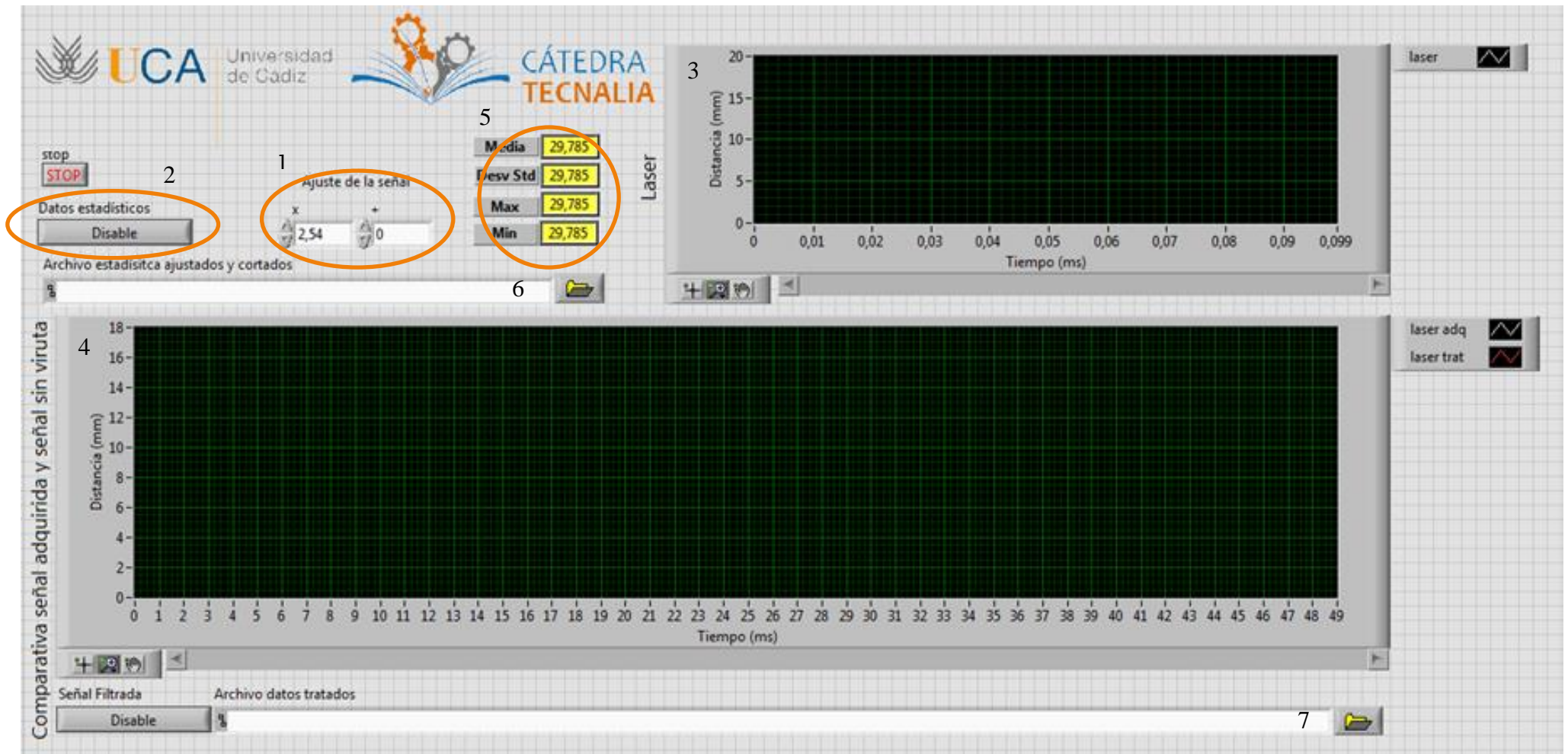


Figura 4.32 Interfaz de la aplicación para el filtrado de las señales de medición del espesor mecanizado

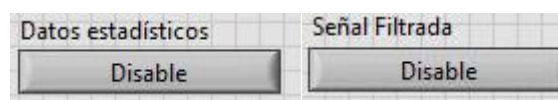
#### 4. Resultados y discusión

---

La numeración de la imagen se corresponde con:

1. Ajuste de la señal: son los parámetros de conversión de la señal en voltios a distancia. Es un indicador por lo que pueden modificarse.
2. Botón de activación: en la posición de la figura no permite el registro de los datos. Se incluye para los dos tipos de archivos.
3. Gráfica de datos adquiridos del sensor láser: representa los datos de la tarjeta de adquisición y su refresco es el que define el tamaño del pack que se filtra.
4. Gráfica comparativa de la señal adquirida y la filtrada: permite observar la señal filtrada. En el caso de que los datos reales superen la franja permitida el valor adquirido es el de la media.
5. Valores estadísticos de la señal adquirida: según se va tratando la señal se calculan e indican los valores estadísticos del tramo representado en la gráfica de datos adquiridos del sensor láser.
6. Archivo de estadística: permite grabar los valores indicados en el conjunto 5.
7. Archivo de datos tratados: archivo de salida en el aparecerán recogidos los valores correspondiente a las distancia medida por láser en mm. filtrándose las desviaciones producidas por la viruta aparecida durante el tramo analizado y tomando como valor la media del tramo en el caso en el que los valores se superen. Los datos registrados se deben guardar en un archivo con extensión .txt. Los valores estarán separados por tabulaciones y la indicación de decimales obtenidos será la empleada por el sistema. El archivo se compone de una columna vacía inicial, con el tiempo (s), una segunda con la señal láser sin filtrar y con la conversión a distancia (mm) ya realizada, y una tercera columna con la señal filtrada donde no aparecerán los valores debidos a la viruta.

La aplicación se debe utilizar durante la captura de las señales y el registro guardado se corresponderá con los el conjunto de datos habilitado para el mismo. Inicialmente se seleccionarán los parámetros de ajuste de la señal en función e las características del láser utilizado. Es importante para permitir el registro de los datos tener los botones situados debajo de las etiquetas "Captura" (Figura 4.33) en la posición "Enable".



**Figura 4.33** Activación para la captura de datos



La selección de los parámetros de referencia para eliminar los puntos se calcula de forma automática a partir de los datos estadísticos calculados. Los datos mostrados en la figura se corresponden con los iniciales proporcionados sin haber registrado ninguna señal.

El filtro se realiza por medias móviles y en función a la desviación estándar del proceso, por este motivo puede ser válido para diferentes geometrías, no sólo en pieles planas.

Finalmente, para obtener una representación gráfica de los datos obtenidos donde se observen los puntos eliminados se puede emplear cualquier programa de representación de datos. En la Figura 4.34 se muestra un ejemplo realizado con MS-Excel®.

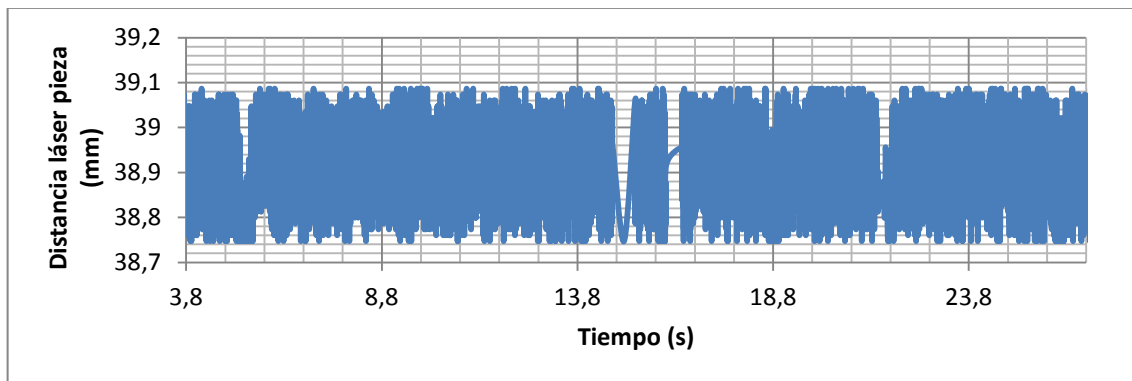


Figura 4.34. Gráfica con Interferencia de viruta filtrada.

## 4.9. Conclusiones

### 4.9.1. Análisis de las señales monitorizadas

El análisis de las fuerzas debe realizarse en función de la dirección de mecanizado bajo parámetros estadísticos y en el dominio de la frecuencia. Este segundo análisis surge tras el análisis de la evolución de las fuerzas por tramos o pasadas y por revolución de la herramienta.

De forma general, los valores de las fuerzas no varían de forma considerable al aumentar la longitud de mecanizado en  $F_x$  ni en  $F_y$  por lo que los ensayos de cajeados de pequeñas dimensiones pueden caracterizar el mecanizado de cajeados de mayor tamaño.

Sería necesario el estudio de la evolución de  $F_z$  con un sistema de adquisición fiable. Una vez analizada esta tercera componente, se considera apropiado el estudio de las fuerzas en relación al espesor mecanizar y en función de la relación espesor final-espesor inicial de la piel.

#### 4. Resultados y discusión

El análisis de las vibraciones se hará en función de los mismos niveles de evaluación que las fuerzas, parámetros estadísticos y de frecuencia. El último análisis puede relacionarse con los resultados del estudio en frecuencia de las fuerzas para determinar las amplitudes de vibración de la pieza ligadas al corte de la herramienta y no a los efectos del resto del sistema.

También se propone para líneas futuras de investigación el estudio de las vibraciones en función de la rugosidad obtenida. Para facilitar un correcto estudio de los resultados sería apropiado definir un sistema de filtrado de las señales donde se asegure que no se pierde información del proceso.

##### 4.9.2. Evaluación de las probetas

A modo de resumen, en la Figura 4.35, se presenta de forma esquemática la aceptación o rechazo de cada ensayo en función de su evaluación dimensional, macro y microgeométrica. La identificación de cada casilla y su relación con cada criterio de aceptación se encuentran en el Capítulo 3 de este trabajo.

La evaluación de la ondulación superficial se ha establecido bajo el criterio de deformación de la probeta. Esta tiende a ser cóncava por lo que en verde se representan las ondulaciones cóncavas, y en rojo las convexas. Aquellas que presentan una forma lineal o ambigua se han representado en amarillo. Se ha de tener en cuenta que el verdadero criterio de aceptación o rechazo depende de la rectitud y no de la ondulación aunque sean parámetros dependientes unos de otros. En aquellos casos en los que se dan las dos formas, una en cada dirección de la medida, se ha incluido una franja en rojo en la dirección donde el perfil de forma es convexo.

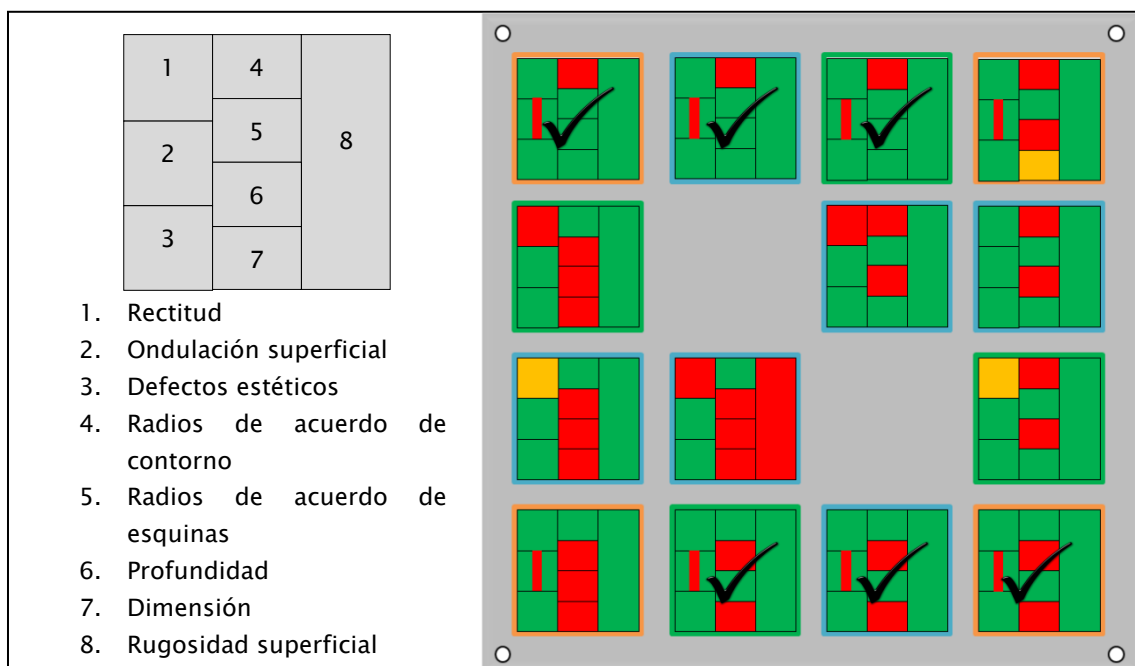


Figura 4.35 Esquema gráfico de la evaluación de las probetas

La zona central es la única que presenta valores fuera de tolerancia debidos a características macrogeométricas y estas pueden deberse a la deformación de la piel tras el mecanizado además de la producida por el sistema de amarre. Esta deducción se realiza tras observar los resultados relacionándolos con las estrategias de mecanizado o las velocidades de corte.

Para obtener más información sobre la posible relación de los resultados de macrogeometría y los parámetros de corte se han de realizar ensayos en los que el sistema de amarre y la posición del mecanizado no influyan y en los que se puedan caracterizar las tensiones residuales inducidas a la pieza.

Con respecto a los defectos estéticos sólo se observa la aparición de rebaba en los ensayos de H1. Aparentemente su altura depende del espesor mecanizado, por lo que sería necesario estudiar el valor máximo de este parámetro para el correcto funcionamiento de la pieza en servicio.

Dimensionalmente se han estudiado cuatro características. La primera, los radios de acuerdo de contorno sólo se cumple en las herramientas tóricas. Si se desea utilizar la herramienta frontal para el mecanizado H1 sería necesario asegurar que el radio de acuerdo de contorno no afecta a la funcionalidad de la pieza.

Así mismo, es necesaria la propuesta de una nueva metodología para la evaluación de los radios de contorno ya que la utilizada ha demostrado no ser válida. Se propone el uso de réplicas como método de medición indirecta de esta característica dimensional.

Los ensayos de H2 no cumplen con las especificaciones de los radios de acuerdo de esquinas ni con las dimensionales de la cajera. Sin embargo, adaptar mejor el programa en los mecanizados con H2 mejoraría los resultados obtenidos para estos.

Ninguno de los ensayos realizados en concordancia cumple con los espesores requeridos como se ha indicado anteriormente, por lo que se descarta esta estrategia para el mecanizado de pieles.

Lo mismo ocurre con los ensayos centrales, cuyo espesor de mecanizado puede estar relacionado directamente con el sistema de amarre y la planitud. La conclusión principal extraída es la necesidad de cambiar el sistema de amarre y asegurar el ajuste en la mayor cantidad de puntos posibles.

En cuanto a la evaluación macrogeométrica, el mecanizado de pieles para las condiciones ensayadas sería válido. El único ensayo que presenta valores de rugosidad mayores a los deseados es el HSM2.0\_2\_01.32, ensayo en el que aparentemente se ha producido chatter, al presentar condiciones de corte más severas debidas al aumento de espesor mecanizado. Del mismo modo, las estrategias

en concordancia producen más vibraciones en la pieza que se ven reflejadas en los parámetros de rugosidad especialmente en el Rsk y Rku.

En su conjunto se puede apreciar que los ensayos que cumplen con más características de diseño aquellos realizados en oposición y con H1. Como se ha visto en el Capítulo 2, esta herramienta produce menos vibraciones y es más estable en el mecanizado. Cabe destacar que, en los ensayos realizados con H2 y en oposición, las características que no se han cumplido pueden compensarse en la programación del mecanizado por lo que se propone una verificación de estos ensayos.

Finalmente se recomienda la realización de más ensayos para determinar la velocidad de corte óptima ya que en los registrados no se aprecian grandes diferencias.

### 4.9.3. Monitorización del espesor mediante un sensor láser

Uno de los principales objetivos ha sido evaluar la interferencia de la viruta en la monitorización. Esta altera la medida en varias décimas de mm por lo que se consideran dos soluciones paralelas de aplicación simultánea:

- Evacuar la máxima cantidad de viruta posible, mediante soplado o aspiración.
- Añadir un algoritmo de detección/filtrado para ignorar las interferencias derivadas de la viruta. Para cubrir esta necesidad se ha desarrollado una aplicación en Labview de filtrado de datos que elimine las señales correspondientes a la viruta.

Al margen de la interferencia de la viruta, se aprecia el ruido derivado de la limitada precisión del láser, 50 $\mu$ m, lo que pone de manifiesto la necesidad de utilizar en el sistema un láser de mayor precisión. Aunque, mejorar la precisión hasta 12,7 $\mu$ m, implica que el rango de trabajo se reduce hasta los +/-3,15mm.

En cuanto a la colocación del sensor láser, las dos opciones más factibles que se han identificado son:

- a) Colocar el láser amarrado al cabezal, para que se mueva solidario con él
- b) Utilizar 4 láseres colocados a 90° entre sí y con un funcionamiento sincronizado con el avance de la herramienta para registrar información en todas las direcciones del mecanizado.

A partir de los resultados obtenidos se propone un estudio a posteriori que permita describir un procedimiento de puesta a punto del sistema basándose en un “patrón” de calibración que asegure que el sensor láser se encuentra en rango y que las medidas obtenidas son representativas.

La puesta a punto del sistema se realiza sobre una plancha escalonada con diferentes alturas conocidas y que se encuentren dentro del rango del láser (21.3–46.7mm).

La medición se realiza en vacío sin mecanizar para eliminar el ruido registrado debido a las vibraciones del cabezal. El caso ideal es hacer la puesta a punto con la velocidad de avance empleada durante el mecanizado de forma que sirva de validación de la cantidad de datos obtenidos, la media de la posición de la pieza y una regulación del tiempo de respuesta con respecto a la variación de altura. Igualmente, este ensayo permite definir el “ancho de banda” máximo de la señal para seleccionar los parámetros de entrada en la aplicación del filtro de señales de viruta.

En el patrón de calibración se contempla la posibilidad de estudiar el uso del sensor láser como medida de la rugosidad obtenida en el mecanizado por lo que sería necesario que el patrón de calibración incluyese distintos perfiles de rugosidad para estudiar así mismo la velocidad de avance máxima para una correcta captura de datos.

Otra campo de estudio es la variación de la frecuencia de adquisición en función de la variación de la velocidad de avance, de forma que se compense el número de datos recogidos por superficie o distancia recorrida.

En resumen, para la monitorización del espesor mediante un sensor láser sería necesario estudiar más detenidamente el funcionamiento del láser si se quiere ampliar su funcionamiento a piezas de geometrías más complejas y comprobar su ajuste a la geometría medida reduciendo el ruido adquirido cambiando el propio sistema de adquisición.

#### 4.10. Referencia bibliográficas

- [1] Qiong W, Yidu Z, Hongwei Z. Corner-milling of Thin Walled Cavities on Aeronautical Components. *Chinese J Aeronaut* 2009;22:677-84. doi:10.1016/S1000-9361(08)60158-2.
- [2] Lacalle LNL de, Lamikiz A, Sánchez JA, Bustos IF de. Recording of real cutting forces along the milling of complex parts. *Mechatronics* 2006;16:21-32. doi:10.1016/j.mechatronics.2005.09.001.
- [3] Jean-François Chatelain, Jean-François Lalonde, Antoine S. Tahan. Effect of Residual Stresses Embedded within workpieces on the distortion of parts after machining. *Int J Mech* 2012;6(1):43-51.
- [4] Wang B, Liang YC, Zhao Y, Dong S. Measurement of the Residual Stress in the Micro Milled Thin-Walled Structures. *J Phys Conf Ser* 2006;48:1127. doi:10.1088/1742-6596/48/1/209.
- [5] Popma M. Computer aided process planning for high-speed milling of thin-walled parts. University of Twente, 2010. doi:10.3990/1.9789036530408.



## Capítulo 5

---

# Conclusiones y Trabajos futuros

---

## 5. Conclusiones y líneas futuras

---



## 5.1. Introducción

El objetivo del presente trabajo se ha centrado en la definición y validación de una metodología para el estudio del mecanizado de pieles metálicas. Esta técnica se investiga para sustituir al fresado químico como tecnología alternativa y ecológica para el mecanizado de pieles.

El desarrollo del trabajo comienza con la exposición de una base teórica fundamentada en estudios de mecanizado de piezas con características similares como son las paredes delgadas. A continuación, se ha propuesto una metodología que defina las características del mecanizado que han de estudiarse y evaluarse. Luego, se ha realizado en el laboratorio una validación de esta metodología experimentalmente, pero utilizando técnicas de fácil implantación industrial para facilitar la transferencia de este estudio.

## 5.2. Conclusiones

Resumiendo lo recogido en los capítulos anteriores se concluye:

1. El mecanizado de pieles metálicas puede ser una alternativa viable para sustituir al fresado químico como tecnología para el mecanizado de este tipo de piezas aunque sería necesario un estudio en mayor profundidad del mismo.
2. Se ha de elegir un sistema de filtrado para el tratamiento de las señales monitorizadas.
3. El estudio de estas señales se deberá realizar en dos niveles: estudio estadístico de los datos y estudio en el dominio de la frecuencia.
4. Es necesario profundizar en las relaciones de los parámetros monitorizados con respecto a los parámetros de corte y al comportamiento de la piel.
5. La mejor estrategia para el mecanizado de pieles es en oposición.
6. En los ensayos realizados con H2 y en oposición, las características que no se han cumplido pueden compensarse en la programación del mecanizado por lo que se propone una verificación de estos ensayos.
7. Excepto en el ensayo en el que se ha registrado chatter todos se encuentran dentro de tolerancias en cuanto a las propiedades microgeométricas.
8. La monitorización del espesor mediante un sensor láser requiere un más detallado del funcionamiento del sensor especialmente para su aplicación en el mecanizado de piezas con geometrías más complejas. Además, se ha de reducir el ruido adquirido y determinar su procedencia.

### 5.3. Trabajos futuros

A partir del desarrollo de la metodología se han definido nuevos horizontes de trabajo y líneas de investigación en el mecanizado de pieles metálicas. Estas líneas podrían incluirse en una investigación en mayor profundidad que permita un mejor estudio de este tipo de mecanizado y para el cual será necesario aplicar una metodología a largo plazo.

- Simulación: de las fuerzas generadas por la herramienta, de las flexiones debidas a las fuerzas de mecanizado y de vibraciones en función de las frecuencias naturales del sistema
- Modelización empírica de las variables de salida
- Estudio de las fuerzas y las flexiones obtenidas según se aleje la pieza de la zona de amarre
- Estudio el efecto en las fuerzas de mecanizado producido por la variación del espesor de la pieza mecanizada
- Estudio del efecto de la profundidad de corte en las fuerzas
- Adquisición de datos de sonido para la evaluación de vibraciones.
- Medida del efecto de la pérdida de material en el mecanizado
- Comparación de otras posibles estrategias de mecanizado
- Inversión en el orden del mecanizado, mecanizar primero la zona menos rígida y luego la más rígida.
- Estudio comparativo de cajeados en probetas individuales para evitar la influencia de la variación de la posición con respecto al sistema de amarre y para delimitar las variaciones de flexión de la chapa debidas únicamente a los parámetros.
- Desarrollo de un protocolo de evaluación de cajeras mediante réplicas
- Aproximación al desgaste sufrido por la herramienta y su influencia en las características microgeométricas.
- Utilización de herramientas de ángulo negativo
- Optimización de los parámetros de corte
- Realización de una probeta comparativa evaluada bajo los criterios de verificación de fresado químico
- Estudio de los límites de la monitorización del espesor mediante un sensor láser

Todo lo anterior se considera que puede ser el objeto de una futura Tesis Doctoral.

---

---

Anexos

---



#### 4.1. Herramientas utilizadas por otros autores

Artículo	Material	Vc (rpm)	a (mm/tooth)	P (w/d) [mm]	Hta.	Observaciones
[1]	Al 7075-T7351	3000	0.08 mm	2/10	-	Mide tensiones residuales
[2]	Al 7075-T7451	2000 n/min	0.05	2	helical fluted peripheral milling tool is two-fluted Y330 with a diameter of 12 mm, helix angle is 30°	Simulación de deformación
[2]	Al 7075-T6	244 n/min 3885 rpm	0.01	1	the helical fluted peripheral milling tool is one-fluted Co-HSS with a diameter of 20 mm, helix angle is 30°	Simulación de deformación
[3]	¿?	1500-3000n/min	0.1mm	0.5-2/4-10	(Co. HAM Tools GmbH - Type 434; diameter 16mm, helix angle $\beta=30^\circ$ chamfer b=0.1mm	Cálculo de deformación
[4]	Al 7075	50,66,75 []	0.105,0.05,0.08	5-12/6-18	Z=2 y 4; $\beta= 30$ ; $\alpha 9$ ; D=16 y 20	
[5]	Al 6082 H30	¿?	¿?	¿?	HHS 4-fluted regular cutter with diameters of 20mm	Simulación en V
[6]	Al 7050 T7	17000		1/2.6-3	12 mm diameter 2-flute solid carbide end mill. The tool has a relieved shank, a 40° helix, and a 0.76 mm corner radius	Estrategias dejando costillas rigidizadoras
[7]	Al 7075	3000	0.5	4/4.5	End mill D=8, Rake angle 26°, clearance angle 3 4°, inclination, 27°, z=2	

[8]					3 flutes and diameter of 19.05mm HANITA Ref. FZ 4AN3 19007	
[9]		2000 rad/min			end milling cutter with diameter, overhang and helix angle are 12.05 mm, 50mm and 30°	V
<b>Campa</b>	Al 7075 T6	7000 15000 (-int & out) 19000 24000	0.075	1	Kendu Kenal D 16, R 2.5	
<b>Voladizo</b>						
<b>Campa</b> <b>Cajera</b> <b>profunda</b> <b>suelo final</b> <b>1mm</b>	Al 7075 T6	2000 ranurado			Kendu 4400.60 D 16	Estrategia ida y vuelta empezando en el centro
<b>Campa</b> <b>pieza</b> <b>industrial</b>	Al 7075-T6	20000 (desbaste) 24000 (acabado)	8mm/min 4.8 mm/min	19-16/1 4/2	Plansee Tizit CHPC32R03-19- A-80 D32 R2.5 z3 KENDU 4400.60 D8 R2.5 z2 KENDU CM16052 025Z2 Pag 160	
[10]	Al alloys...	15000			End mil D 12.7 R 3	Estrategia en rampa dejando costillas interiores de dentro hacia fuera
[11]	Al-Cu4-Mg	12500- 15000	0.05	15/1.5	non-standard helix end mill of 30 mm diameter with two flutes in the case of down milling	4.5mm-3mm espesor, V Se centra en T

[12]	7050-T7451	16000	0.05-1	6/0.03-1	Carbide Grade, Rake angle 15°, clearance angle 6°, D6 y D 12	Tensiones residuales
[13]	7050-T7451	8000-20000	0.05-0.2	12/0.5-2	Carbide Grade D12, Rake angle 15°, clearance angle 6°	
[14]	7075	5000	1.2 mm/min		D 50mm	
[15]	7075	10000-20000	4-25 m/min	10/0.5-2	Z=4, helical angle 25°, length of cantilever 70, D20, rake angle 20° edge radius 65µm	
[16]	7075	8000	0.265-0.4 m/min		Z2 D12, helical angle 20, rake angle 20	ha
[17]	6082 H30				rd alloy four-flute mill cutter with 30° helical angle, a rake angle of 14° and a clearance angle of 10°	
[18]	Al 6082 T6	10000-18000	0.03-0.05-0.07-0.12	4/16	Monolithic Carbide D12 Z=2, hélix 45°	
[19]		18000			Ball end mil D6	
[20]	7075 (e=4.8mm)	t6 15000-20000		2.5/14	Carbide K10 D16 upmilling tip corner 1.5mm	
[21]	7075	24000	0.05		D16, bull nose (2.5)	

## 4.2. HSM2.0\_X\_01.XX

Ensayo	e	Hta	D hta (mm)	Z	p	Vc	a	N	f	
HSM2.0_1_01.11	2.0	Kendu HMKEN 0200.60	10	2	0,2	O	251,33	400	8000	0,05
HSM2.0_1_01.12	2.0	Kendu HMKEN 0200.60	10	2	0,2	O	314,16	500	10000	0,05
HSM2.0_1_01.13	2.0	Kendu HMKEN 0200.60	10	2	0,2	O	376,99	600	12000	0,05
HSM2.0_1_01.14	2.0	Kendu HMKEN 0200.60	10	2	0,2	C	251,33	400	8000	0,05
HSM2.0_2_01.21	2.0	Kendu uniKENAL 4400.60	10	2	0,2	C	376,99	600	12000	0,05
HSM2.0_1_01.22	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
HSM2.0_1_01.23	2.0	Kendu HMKEN 0200.60	10	2	0,2	O	314,16	500	10000	0,05
HSM2.0_1_01.24	2.0	Kendu HMKEN 0200.60	10	2	0,2	C	314,16	500	10000	0,05
HSM2.0_2_01.31	2.0	Kendu uniKENAL 4400.60	10	2	0,2	C	314,16	500	10000	0,05
HSM2.0_2_01.32	2.0	Kendu uniKENAL 4400.60	10	2	0,2	O	314,16	500	10000	0,05
HSM2.0_1_01.33	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
HSM2.0_1_01.34	2.0	Kendu HMKEN 0200.60	10	2	0,2	C	376,99	600	12000	0,05
HSM2.0_2_01.41	2.0	Kendu uniKENAL 4400.60	10	2	0,2	C	251,33	400	8000	0,05
HSM2.0_2_01.42	2.0	Kendu uniKENAL 4400.60	10	2	0,2	O	376,99	600	12000	0,05
HSM2.0_2_01.43	2.0	Kendu uniKENAL 4400.60	10	2	0,2	O	314,16	500	10000	0,05
HSM2.0_2_01.44	2.0	Kendu uniKENAL 4400.60	10	2	0,2	O	251,33	400	8000	0,05

## 4.3. Referencias bibliográficas

- [1] Guo H, Zuo DW, Wu HB, Xu F, Tong GQ. Prediction on milling distortion for aero-multi-frame parts. Mater Sci Eng A 2009;499:230-3. doi:10.1016/j.msea.2007.11.137.



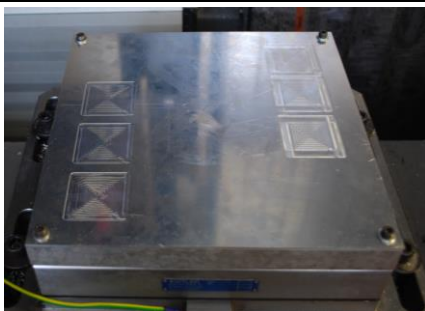
- [2] Kang Y-G, Wang Z-Q. Two efficient iterative algorithms for error prediction in peripheral milling of thin-walled workpieces considering the in-cutting chip. *Int J Mach Tools Manuf* 2013;73:55-61. doi:10.1016/j.ijmachtools.2013.06.001.
- [3] Loehe J, Zaeh MF, Roesch O. In-Process Deformation Measurement of Thin-walled Workpieces. *Procedia CIRP* 2012;1:546-51. doi:10.1016/j.procir.2012.04.097.
- [4] Rai JK, Xirouchakis P. Finite element method based machining simulation environment for analyzing part errors induced during milling of thin-walled components. *Int J Mach Tools Manuf* 2008;48:629-43. doi:10.1016/j.ijmachtools.2007.11.004.
- [5] Ratchev S, Liu S, Becker AA. Error compensation strategy in milling flexible thin-wall parts. *J Mater Process Technol* 2005;162-163:673-81. doi:10.1016/j.jmatprotec.2005.02.192.
- [6] Smith S, Wilhelm R, Dutterer B, Cherukuri H, Goel G. Sacrificial structure preforms for thin part machining. *CIRP Ann - Manuf Technol* 2012;61:379-82. doi:10.1016/j.cirp.2012.03.142.
- [7] DONG H, KE Y. Study on Machining Deformation of Aircraft Monolithic Component by FEM and Experiment. *Chinese J Aeronaut* 2006;19:247-54. doi:10.1016/S1000-9361(11)60352-X.
- [8] Guiassa R, Mayer JRR. Predictive compliance based model for compensation in multi-pass milling by on-machine probing. *CIRP Ann - Manuf Technol* 2011;60:391-4. doi:10.1016/j.cirp.2011.03.123.
- [9] Wan X-J, Hua L, Wang X-F, Peng Q-Z, Qin X. An error control approach to tool path adjustment conforming to the deformation of thin-walled workpiece. *Int J Mach Tools Manuf* 2011;51:221-9. doi:10.1016/j.ijmachtools.2010.11.007.
- [10] Smith S, Dvorak D. Tool path strategies for high speed milling aluminum workpieces with thin webs. *Mechatronics* 1998;8:291-300. doi:10.1016/S0957-4158(97)00058-5.
- [11] Ming C, Fanghong S, Haili W, Renwei Y, Zhenghong Q, Shuqiao Z. Experimental research on the dynamic characteristics of the cutting temperature in the process of high-speed milling. *J Mater Process Technol* 2003;138:468-71. doi:10.1016/S0924-0136(03)00120-1.
- [12] Jiang X, Li B, Yang J, Zuo XY. Effects of tool diameters on the residual stress and distortion induced by milling of thin-walled part. *Int J Adv Manuf Technol* 2013;68:175-86. doi:10.1007/s00170-012-4717-8.
- [13] Jiang X, Li B, Yang J, Zuo X, Li K. An approach for analyzing and controlling residual stress generation during high-speed circular milling. *Int J Adv Manuf Technol* 2013;66:1439-48. doi:10.1007/s00170-012-4421-8.
- [14] Richter-Trummer V, Koch D, Witte a., Dos Santos JF, De Castro PMST. Methodology for prediction of distortion of workpieces manufactured by high speed machining based on an accurate

- through-the-thickness residual stress determination. *Int J Adv Manuf Technol* 2013;68:2271-81. doi:10.1007/s00170-013-4828-x.
- [15] Wu Q, Li D-P. Analysis and X-ray measurements of cutting residual stresses in 7075 aluminum alloy in high speed machining. *Int J Precis Eng Manuf* 2014;15:1499-506. doi:10.1007/s12541-014-0497-4.
- [16] Qiong W, Yidu Z, Hongwei Z. Corner-milling of Thin Walled Cavities on Aeronautical Components. *Chinese J Aeronaut* 2009;22:677-84. doi:10.1016/S1000-9361(08)60158-2.
- [17] Ratchev S, Liu S, Huang W, Becker AA. A flexible force model for end milling of low-rigidity parts. *J Mater Process Technol* 2004;153-154:134-8. doi:10.1016/j.jmatprotec.2004.04.300.
- [18] Arnaud L, Gonzalo O, Seguy S, Jauregi H, Peigné G. Simulation of low rigidity part machining applied to thin-walled structures. *Int J Adv Manuf Technol* 2010;54:479-88. doi:10.1007/s00170-010-2976-9.
- [19] Biermann D, Kersting P, Surmann T. A general approach to simulating workpiece vibrations during five-axis milling of turbine blades. *CIRP Ann - Manuf Technol* 2010;59:125-8. doi:10.1016/j.cirp.2010.03.057.
- [20] Bravo U, Altuzarra O, López de Lacalle LN, Sánchez J a., Campa FJ. Stability limits of milling considering the flexibility of the workpiece and the machine. *Int J Mach Tools Manuf* 2005;45:1669-80. doi:10.1016/j.ijmachtools.2005.03.004.
- [21] Campa FJ, Seguy S, Lacalle LNL De, Arnaud L, Dessein G, Aramendi G. Stable Milling of Thin-Walled Parts with Variable Dynamics 2007:1-6.

HERRAMIENTA	
IDENTIFICACIÓN	<i>HSM2.0_2_01.43</i>
FABRICANTE	<i>Kendu</i>
DIÁMETRO $\varnothing$	<i>10</i>
MATERIAL	<i>CW</i>
RECUBRIMIENTO	-
ÁNGULO DE HÉLICE	<i>30</i>
REF. FABRICANTE	<i>4400.60</i>

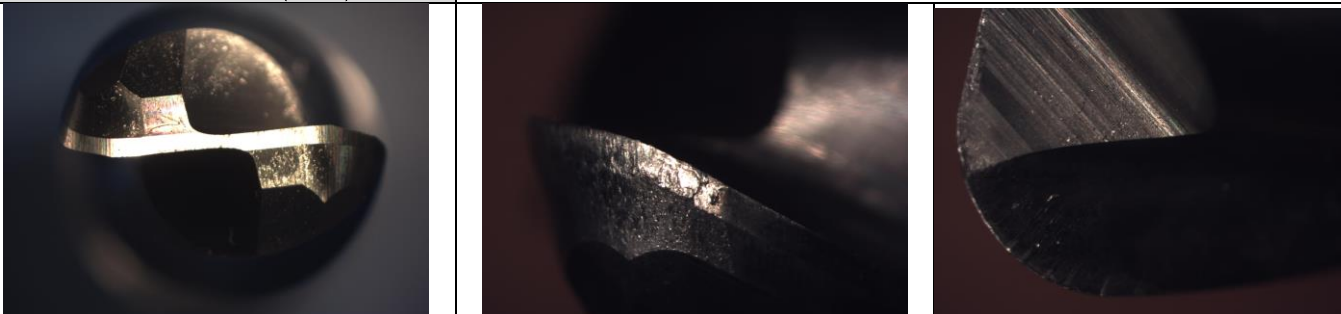
CONDICIONES DE TRABAJO	
MATERIAL	<i>Al</i>
ESPEJOR PIEL	<i>2 mm</i>
ESTRATEGIA	<i>oposición</i>
OTRAS TÉCNICAS	-
LUBRICACIÓN	-
INCIDENCIAS	
VELOCIDAD	<i>10000 rpm</i>
AVANCE	<i>0.05 mm/diente</i>
PROFUNDIDAD	<i>0.2</i>

### UTILLAJE DE AMARRE

General del ensayo


OBSERVACIONES
No se consigue una planitud inferior a las tolerancias requeridas

### HERRAMIENTA

MACROSCOPÍA (SOM)


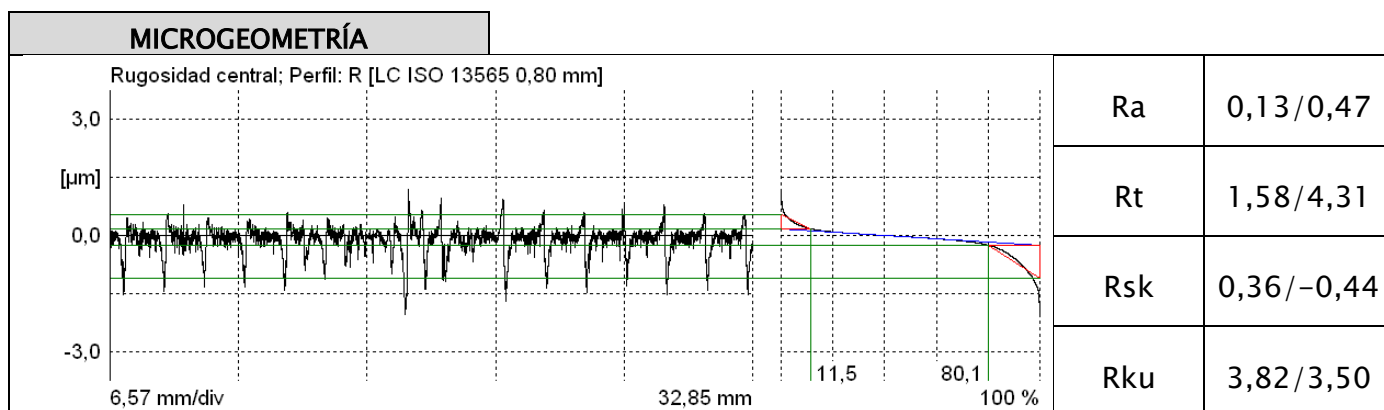
MICROSCOPIA (SEM/EDS)		

OBSERVACIONES
Leve desgaste por adhesión

PROBETA

MACROGEOMETRÍA		
Rectitud	25,8	33,29
Planitud	-	-
Defectos	-	-
Ondulación Superficial	(	)

DIMENSIONAL		
Radios de acuerdo esquinas	3,53	
Radios de acuerdo contorno	-	
Profundidad	0,199	
Dimensiones	46,83	46,93





Propiedades F-Q		
Microdureza		
Cambios microestructurales		
Tensiones Residuales		
Resistencia a la Corrosión		
Resistencia a la Tracción		
Resistencia a la Fatiga		
Otras propiedades F-Q		

OBSERVACIONES

## MONITORIZACIÓN

OBSERVACIÓN DIRECTA
<a href="#">..\Experimental\hsm2.0_01\HSM-01\Video01-43.wmv</a>

FUERZAS DE CORTE		
Fuerzas	<a href="#">..\Experimental\hsm2.0_01\HSM-01\HSM1y2 op -1\HSM.01.4X.txt</a>	
Fx	Fy	Fz

VIBRACIONES CABEZAL		
Vibraciones	<a href="#">..\Experimental\hsm2.0_01\HSM-01\HSM1y2 op -1\HSM.01.4X.txt</a>	
Ax	Ay	Az

VIBRACIONES PIEZA		
V pieza	<a href="#">..\Experimental\hsm2.0_01\HSM-01\HSM1y2 op -1\HSM.01.4X.txt</a>	
	Vz	



MEDICIÓN ESPESOR MECANIZADO	
Láser	-
Vz	

OBSERVACIONES

## Agradecimientos

Dedico estas líneas para agradecer su colaboración a todas las personas e instituciones que han ayudado en el desarrollo este trabajo fin de máster y que han formado parte del mismo.

A Mariano Marcos y Asunción Rivero, directores del trabajo, por sus consejos durante toda la realización del trabajo.

Al grupo TEP-027, por enseñarme a desenvolverme en este tipo de actividades y apoyarme en tantísimos aspectos.

Al Centro de Metrología Industrial de la Universidad de Cádiz, tan necesarios en la evaluación del experimental.

A Tecnalía, por la concesión de la beca de colaboración a través de la Cátedra Tecnalía y por la estancia en su centro que ha permitido la realización de parte de los ensayos.

A mi familia.