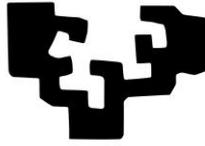


eman ta zabal zazu



Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea

TRABAJO DE FIN DE MASTER

Fabricación y optimización de herramienta para mecanizado trocoidal en titanio

Antxon Gabiola Idoiagabeitia

Master Universitario en Ingeniería Industrial

Dirigido por Aitzol Lamikiz Mentxaka

Curso 2015-2016



Ingeniaritza Goi Eskola Teknikoa
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Bilbao

ÍNDICE

ÍNDICE.....	1
1. RESUMEN	3
2. LISTA DE TABLES E ILUSTRACIONES.....	6
2.1. Tablas.....	6
2.2. Ilustraciones.....	7
3. MEMORIA.....	9
3.1.Introducción y alcance	9
3.2.Objetivos.....	10
3.3.Beneficios	10
3.4.Estado del arte	12
3.5. Análisis de alternativas.....	20
3.6. Análisis de riesgos	22
5. METODOLOGÍA.....	25
5.1.Equipos y Materiales	25
5.2.Diseño de ensayos	29
6. DESARROLLO DEL TRABAJO	38
6.1. Prueba de herramientas de fabricantes en mecanizado trocoidal	38
6.2. Fabricación de herramienta	39
6.3. Optimización de la geometría.....	45
7. ASPECTOS ECONÓMICOS	49
8. CONCLUSIONES	51
9. BIBLIOGRAFÍA	53



Libros.....	53
Referencias web	53
ANEXO I.....	54
ANEXO II.....	58

1. RESUMEN

CASTELLANO

Este trabajo trata de conseguir fabricar una herramienta para que haga operaciones de desbaste en titanio aeronáutico o Ti6Al4V. Pero la manera de mecanizar de esta herramienta no es la convencional. Concretamente se va utilizar un patrón de corte que es el fresado trocoidal. Y para exponer como se va hacer esto, se seguirán los siguientes apartados.

Primero se hace una introducción explicando de donde surge el trabajo y en que contexto. Para entenderlo mejor, se procede a exponer cuales son los objetivos del trabajo y los distintos beneficios que puede traer tanto técnicamente como económicamente. Después, en el estado de arte, están los conceptos que rodean al trabajo y que ayudan a entenderlo mejor. Y para terminar con la primera parte del trabajo, se explica las distintas alternativas para afrontar el trabajo y cuales son los riesgos que hay al cuando se empieza a trabajar.

En el siguiente punto se explica cual es la metodología que se sigue para conseguir distintas geometrías de herramienta. Primero están las descripciones de los equipos y materiales que se necesitan para hacer los ensayos y después se explican los pasos que se siguen para llevarlos a cabo. Como resumen del los ensayos se hace un diagrama de flujo de los experimentos a realizar.

Después se expondrán los resultados obtenidos de los ensayos y como han salido las distintas geometrías de fresas. También se describirán qué experiencias se han tenido al hacer los experimentos.

Para finalizar, observando los resultados obtenidos se sacarán conclusiones y se hará una breve descripción de los aspectos económicos.

EUSKERA

Lan hau aeronautikan erabiltzen den titanioan edo Ti6Al4V arbastaketa operazioak egingo dituen fresa bat fabricatzean datza. Baina herramintak mekanizatzeke modu arrunta erabili bearrean “Volumill” deritzon patroia jarraituko du. Eta hau nola lortu azaltzeko, hurrengo puntuak jarraituko dira.

Lehenik sarrera bat egiten da lanaren nondik norakoak azaltzen eta ze testuinguruan. Hau hobeto ulertzeko, lanaren helburuak zeintzuk diren jartzen dira eta ze onura dakartzan, bai teknikoki eta bai ekonomikoki. Gero lanaren inguruko kontzeptu batzuk deskribatzen dira hau hobeto ulertzeko. Eta lehen atal hau bukatzeko, lana burutzeko dauden bideak azaltzen dira eta zeintzuk diren arriskuak lanean hasten garenean.

Hurrengo puntuan jarraitu beharreko metodologia deskribatzen da harramintaren geometria ezberdinak lortzeko. Hemen, erabili behar diren gailuak eta materialak zeintzuk diran jartzen dira eta bakoitzaren azalpentxo bat. Ondoren lana burutzeko jarraitu bearako pausuak azaltzen dira, eta hobeto ulertzeko, fluxu diagrama bat ere egiten da.

Ostean, esperimenduetan izandako esperientzia eta hauetan lortutako emaitzak jartzen dira, hau da, nolakoak izan diren lortutako herraminten geometriak.

Azkenik, emaitzak ikusita ondorioak ateratzen dira eta alderdi ekonomikoaren azalpanak jarri.

INGLES

This project tries to make a cutting tool that can do roughing operations on Ti6Al4V. But the way to machining of this tool is not the conventional. In fact, will be used a cutting pattern called “Vollumill”. To explain how this is done, the steps that must be followed are explained in the next paragraphs.

First an introduction explaining the context and why this project is necessary is prepared. Then the objectives of this project and the several advantages that this will bring technically and economically will be explained. After, all the concepts related to the project that help us to understand it better will be explained. To finish the first part of the project, the different alternatives are explained in order to start with the project and to be aware of the risks that can be faced.

The methodology to get different tool geometries are explained in the next chapter. First the descriptions of the necessary equipment and materials needed to do

the experiments and after, the steps that are followed in order to do the project are explained in the next chapter. To summarize the experiments that must be done are drawn in a flowchart.

Then, the final results of the test we have done and the different tool geometries will be shown. The experience lived while doing the test will also be described.

Finally, after observing the results that are given the conclusions will be drawn and the economic aspects will also be described.

2. LISTA DE TABLES E ILUSTRACIONES

2.1. Tablas

Tabla 1: tabla de riesgos.....	24
Tabla 2: % de tiempo para cada ap.....	32
Tabla 3: comparación entre herramientas.....	39
Tabla 4: datos da las dos fresas fabricadas	40
Tabla 5: valores de los factores en cada nivel	45
Tabla 6: resultados de los experimentos y los efectos de cada factor	46
Tabla 7: datos de la geometría final	48
Tabla 8: coste del personal.....	49
Tabla 9: coste de máquinas.....	49
Tabla 10: inversiones	50
Tabla 11: gastos	50
Tabla 12: presupuesto total	50
Tabla 13: datos geométricos de las fresas de los fabricantes.....	58

2.2. Ilustraciones

Ilustración 1 : Aleaciones de Titanio utilizadas en el Boeing 787	12
Ilustración 2: trayectoria de la herramienta en fresado trocoidal	14
Ilustración 3: trayectoria de los dientes en fresado trocoidal	16
Ilustración 4: canal (en verde) y desahogo (en morado) de una fresa de cuatro dientes	19
Ilustración 5: primer y segundo ángulo de incidencia de una fresa.....	19
Ilustración 6: ángulos del frente de la herramienta	20
Ilustración 7: fresa de plaquitas intercambiables.....	21
Ilustración 8: fresas enterizas de metal duro	22
Ilustración 9: Maquina Walter para fabricación y afilado de herramientas	25
Ilustración 10: datos técnicos de la maquina	26
Ilustración 11: máquina de medición de herramientas Zoller	26
Ilustración 12: centro de mecanizado Mitsui Seiki.....	27
Ilustración 13: características de los ejes del centro de mecanizado	28
Ilustración 14: barras de metal duro	29
Ilustración 15: portaherramientas weldom-D16.....	33
Ilustración 16: entalla de una fresa después de mecanizar	34
Ilustración 17: ángulo de hélice de una fresa.....	35
Ilustración 18: ángulo de desprendimiento del canal	41
Ilustración 19: primer ángulo de incidencia en el diámetro	41
Ilustración 20: ancho de la primera faceta en el diámetro.....	42
Ilustración 21: segundo ángulo de incidencia en el diámetro	42
Ilustración 22: ancho de la segunda faceta en el diámetro	43
Ilustración 23: primer ángulo de incidencia en el frente.....	43
Ilustración 24: ancho de la primera faceta en el frente	44
Ilustración 25: segundo ángulo de incidencia en el frente	44
Ilustración 26: taco de pruebas desbastado	45

Ilustración 27: Grafico de los efectos de los factores.....	46
Ilustración 28: filo de fresa del fabricante 1.....	59
Ilustración 29: filo de fresa del fabricante 1.....	59
Ilustración 30: filo de fresa del fabricante 2.....	60
Ilustración 31: filo de fresa del fabricante 2.....	61
Ilustración 32: filo de fresa del fabricante 5.....	62
Ilustración 33: filo de fresa del fabricante 5.....	62
Ilustración 34: filo de fresa del fabricante 5.....	63
Ilustración 35: filo de fresa del fabricante 6.....	63
Ilustración 36: filo de fresa del fabricante 6.....	64

3. MEMORIA

3.1. Introducción y alcance

Este trabajo esta sale del trabajo realizado por un alumno en practicas en una empresa. Es una empresa que se dedica a la fabricación de equipos y sistemas dirigidos al sector aeronáutico y espacial. En los últimos años su actividad principal ha sido el mecanizado de piezas para conseguir productos integrales desde la ingeniería de desarrollo, su fabricación, acabados de tratamientos superficiales y montajes.

Entre las piezas que se fabrican en esta empresa, muchos son de aleaciones de titanio o, en concreto, de Ti6Al4V o más conocido como titanio aeronáutico. Este material es muy utilizado en el mundo aeronáutico y biomédico debido a sus buenas propiedades mecánicas (alta resistencia) y químicas (resistencia a la corrosión y biocompatibilidad), así como su baja densidad (4,51 g/cm³) o alto punto de fusión (1675 °C). Debido a estas características, su uso se esta incrementando mucho y está reemplazando a otros materiales como pueden ser los aceros inoxidables o el aluminio.

Aunque el titanio posee grandes ventajas, también posee grandes inconvenientes a la hora de mecanizarlos. Al ser un material que tiene una mala conductividad térmica y por tanto difícil de refrigerar, puede deteriorar el filo de corte de las herramientas a consecuencia de las altas temperaturas que se alcanzan en la zona de corte.

Por otro lado, utilizando un patrón de corte que es el fresado trocoidal, se consigue ahorrar tiempo en operaciones de desbaste. Pero el inconveniente de esto es que la herramienta que se tiene que utilizar no es muy común debido a las condiciones de corte a las que se someten. Como es algo nuevo en la industria, los fabricantes de herramientas están sacando sus herramientas y se están haciendo pruebas.

Por todo esto, en este trabajo se va proceder a fabricar una herramienta que funcione bien con el mecanizado trocoidal. Para esto, la empresa cuenta con una maquina para tallar y afilar herramientas, que es donde se van a fabricar las fresas

para después probarlos en un centro de mecanizado de cinco ejes.

3.2. Objetivos

El objetivo del trabajo es conseguir la geometría de una fresa que trabaja en operaciones de desbaste de titanio. El método utilizado para el desbaste es el de mecanizado trocoidal o más conocido como “Volumill”. Como esto es algo nuevo en el mundo del mecanizado, no existen herramientas concretas que funcionen bien con este método y cada fabricante está sacando su herramienta.

Por esto, se van a probar distintas herramientas de distintos fabricantes y después se sacará la geometría de la herramienta que mejor funcione. Así, aprovechando de que se dispone de una máquina Walter para fabricar herramientas, se fabricarán en la propia empresa en vez de comprarlos fuera. Con esto se ahorra dinero porque es más barato fabricar una fresa que comprarla (teniendo la máquina). Además una vez se desafilan, se pueden afilar en la propia máquina sin tener que mandarlos fuera a que las afilen.

Una vez conseguido una geometría que se comporte bien, el siguiente objetivo es el de optimizar la geometría. Así se conseguirá mejorar la herramienta para que dure más y que esté lo más cerca posible de una herramienta comprada a un fabricante. Esto es muy difícil ya que los fabricantes de herramienta solo se dedican a fabricar herramientas y una empresa que se dedica a la fabricación de piezas no puede invertir tanto en hacer e investigar nuevas herramientas. Pero aun así, si se consigue una herramienta que se comporte parecido a los de los fabricantes de herramientas, sale más barato fabricar una herramienta en la propia empresa que comprar una cada vez que se desgasten.

Uno de los objetivos secundarios (pero que también es importante) de este trabajo es conseguir un procedimiento para sacar la geometría de una herramienta que sirva para otra herramienta con una geometría distinta al de este trabajo. Se comprobará si el método utilizado es rentable para saber si merece la pena aplicarla en otras herramientas.

3.3. Beneficios

3.3.1. Contribuciones científico-técnicas. Plan de difusión

Con este proyecto la mayor contribución científico-técnica que se conseguirá es que se probará un procedimiento para conseguir nuevas geometrías de herramientas

para después fabricarlas. Es decir, partiendo de una herramienta de un fabricante que funciona bien para unas determinadas operaciones, se puede sacar la geometría de la herramienta del fabricante siguiendo el procedimiento. Así, la empresa podrá fabricar sus propias herramientas en vez de comprarlas fuera.

Este procedimiento también sirve para mejorar la geometría de una herramienta que ya se fabricaba de antes. Así se consigue alargar la vida de la herramienta y, por lo tanto, la producción de las piezas sube porque se gasta menos tiempo en cambiar las herramientas que se hayan roto.

Resumiendo, si los resultados del proyecto son buenos el procedimiento utilizado aquí se podrá utilizar para cualquier herramienta de cualquier geometría, siempre y cuando la maquina del que se dispone pueda fabricarla.

3.3.2. Contribuciones económicas. Plan de explotación.

Como siempre suele ocurrir, cuando hay un adelanto científico-técnico también suele haber una ganancia económica. Por lo tanto, se puede decir que los avances técnicos y ganar dinero van juntos de la mano.

En este caso, la mayor contribución económica que trae este trabajo es que si se dispone de una máquina para fabricar herramientas, sale mucho más barato fabricar herramientas que comprarlas fuera. Si la herramienta fabricada se comporta similar a las herramientas compradas la empresa se ahorra mucho dinero.

Por otra parte, al fabricar herramientas en la propia empresa donde se utilizan, estas son mucho más fáciles de afilar una vez que estén desgastados. Esto se debe a que ya se conoce la geometría de la herramienta y todos sus parámetros. Cuando se le compra una herramienta a un fabricante, este no suele dar los parámetros geométricos que tiene y esto se nota a la hora de afilar la herramienta. Se intenta afilar con la geometría que más se le acerca, pero es muy difícil afilarla con la geometría con la que se ha comprado y, por lo tanto, no dura lo mismo una vez afilada. En cambio, la herramienta fabricada se afila con los mismos parámetros geométricos y se comporta siempre de la misma manera. Por eso, a la larga una herramienta fabricada puede durar más que una fabricada porque se afila mejor y con esto también se ahorra dinero.

3.4. Estado del arte

3.4.1. Las características del mecanizado de titanio y sus limitaciones

Las propiedades físicas, químicas y térmicas del titanio lo convierten en un material extremadamente exigente a la hora de mecanizar. Existen una serie de aleaciones de titanio, con diferentes propiedades, cuya maquinabilidad varía considerablemente: desde la tradicional aleación Ti6Al4V hasta aleaciones más resistentes como Ti10-2-3 y, en la actualidad, Ti5553. Entre las principales características del mecanizado del titanio se encuentra el riesgo de desgaste de la herramienta, como consecuencia de las altas temperaturas a las que se expone el filo de corte (se absorbe más calor porque el titanio es un mal conductor térmico).

El Ti6Al4V es el material más utilizado en aeronáutica debido a la relación existente entre su ligero peso y su elevada resistencia. Sin embargo, las aleaciones de titanio presentan unas características metalúrgicas que hacen que su mecanizado sea más difícil que el de aceros de equivalente dureza.

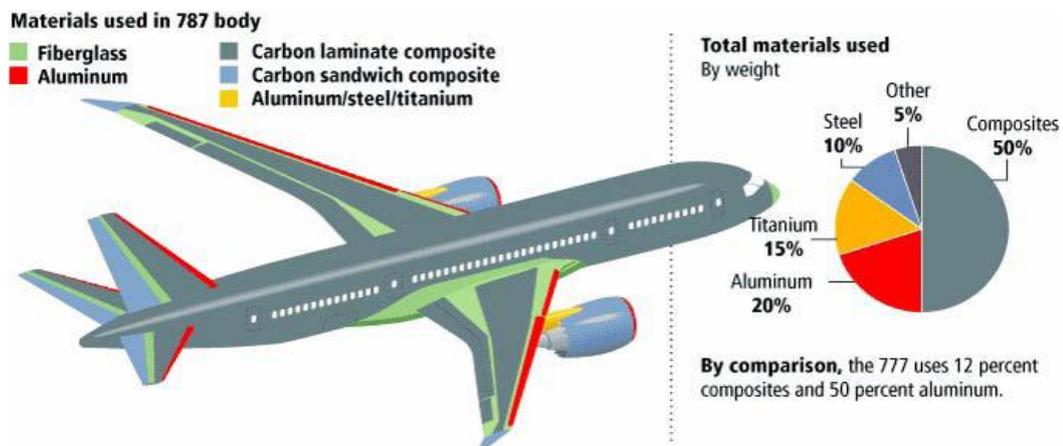


Ilustración 1 : Aleaciones de Titanio utilizadas en el Boeing 787

El titanio es conocido por su capacidad de endurecimiento. Esta condición obliga a emplear ángulos de corte positivos en el mecanizado, que hace que la superficie de contacto de la viruta con la zona de corte de la herramienta sea muy pequeña. La elevada presión junto con la fricción generada por el paso de la viruta da como resultado un aumento de la temperatura en una zona localizada de la herramienta. El calor generado durante el mecanizado de titanio no se disipa rápidamente, debido a la escasa conductividad. Por tanto, una sustancial cantidad de calor queda atrapada entre el filo de corte y la superficie frontal de la herramienta.

Esta combinación de elevadas fuerzas de rozamiento y temperatura produce un

mecanismo de desgaste por craterización en la proximidad del filo de corte, dando como resultado una rápida rotura de la herramienta.

Dado su relativamente bajo módulo de elasticidad, el titanio es más flexible que el acero, por lo que el área que se está cortando tiende a rechazar la herramienta, a menos que el amarre de la pieza sea el idóneo o que se apliquen condiciones de mecanizado pesado. Las piezas de paredes delgadas tienden a curvarse bajo la presión de la herramienta, ocasionando vibraciones, erosión en la herramienta y problemas de tolerancia. La solución es garantizar la rigidez de todo el sistema y utilizar herramientas con filos de corte vivos y las correctas características geométricas.

Para empeorar las cosas, las aleaciones de titanio tienen una fuerte tendencia a alearse o reaccionar químicamente con el material de la herramienta a la temperatura generada durante el mecanizado, y a ocasionar desgaste por transferencia de material, ya que las virutas se sueldan al filo de corte.

3.4.2. Mecanizado trocoidal

El complejo diseño de las piezas y la creciente demanda ha forzado el desarrollo de nuevas tecnologías y soluciones de mecanizado.

La estrategia que está cobrando fuerza para obtener unos elevados índices de extracción de metal en el mecanizado de titanio es el fresado trocoidal. El mecanizado de cavidades en titanio, ya sean de poca o mucha profundidad, es una tarea difícil. Para empezar, una gran porción de la herramienta está continuamente en contacto con la pieza, por lo que las fuerzas de corte y el calor generado son muy elevados. Un segundo punto a tener en cuenta es la desigual carga de viruta por diente, más elevada en el punto de la herramienta que más ha avanzado, y menor en el resto. El último punto es la evacuación de viruta, ya que la herramienta ocupa casi todo el ancho de la ranura. Queda muy poco espacio, por lo que la posibilidad de volver a introducir viruta en el corte es muy elevada y nada recomendable, debiéndose evitar en lo posible.

En este sentido, el fresado trocoidal puede aplicarse fácilmente utilizando una gran variedad de fresas. Sin embargo, para obtener unos excelentes resultados se recomienda utilizar el nuevo desarrollo Chaterfree (antivibratorias) y las líneas Helido o Helimill (geometrías helicoidales) con plaquitas intercambiables.

El reto en el mecanizado de titanio es todavía mayor cuando las ranuras son relativamente profundas en relación con su ancho, ya que la evacuación de la viruta es más difícil. Este punto se dificulta aún más en el caso de ranuras curvas.

Normalmente estas dificultades hacen necesario que se trabaje con bajos avances y profundidades de corte, para evitar vibraciones y una rotura prematura de la herramienta. Estas condiciones hacen que la productividad disminuya. Incluso con bajos avances, la duración de la herramienta es menor cuando se mecanizan ranuras.

El fresado trocoidal, o espiral, ofrece una solución potencial a este problema. La idea básica es que la fresa se mueva siguiendo un patrón circular en el que cada círculo avance en el corte.

Las ventajas clave del fresado trocoidal son:

- Sólo una pequeña parte de la fresa está en contacto con la pieza
- El avance es constante

-El fresado trocoidal hace posible utilizar una fresa de menor diámetro que la ranura o cajera y facilita la evacuación de viruta (ver imágenes 1 y 2)

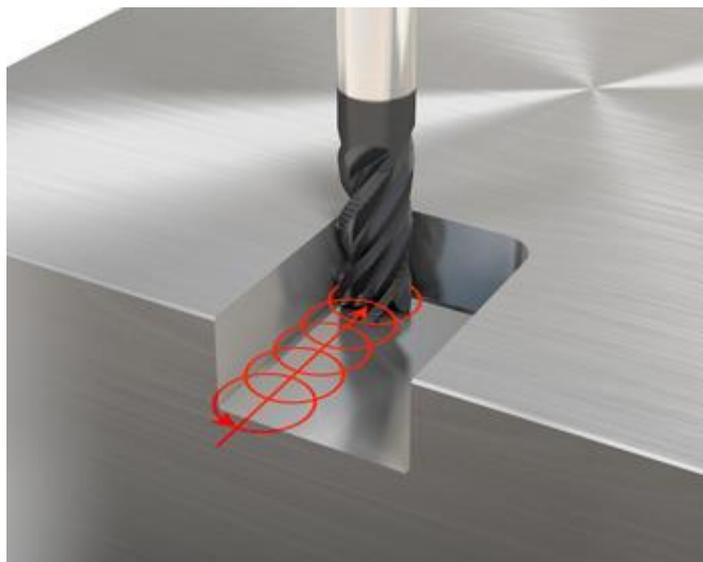


Ilustración 2: trayectoria de la herramienta en fresado trocoidal

Las fresas Chaterfree, disponen de una configuración de paso variable, que no sólo elimina la vibración armónica durante el fresado trocoidal, también ha demostrado tener una extraordinaria capacidad para abrir ranuras completas y cavidades, en cuanto a los índices de extracción de metal. Chaterfree también ofrece la ventaja adicional de tener una vida de los filos más prolongada gracias a la reducción de vibraciones.

Se pueden mecanizar ranuras completas de hasta 2xD con 4 ó 5 labios, incluso en máquinas de baja potencia con adaptaciones ISO40 ó BT40, sin reducir la

productividad.

La calidad del metal duro recomendable es la de estructura base submicron — entre 0,6 y 0,8 micron máximo— y recubrimiento PVD TiAlN de última generación ofrece unas incomparables propiedades mecánicas que hacen que esta fresa de metal duro integral sea un muy buen ejemplo en la selección óptima para el fresado trocoidal.

Una alternativa es la utilización de plaquitas intercambiables, con fresas multidiente como las mencionadas líneas Helido o Helimill de Iscar. Básicamente estamos hablando de las operaciones de desbaste ya que la calidad superficial presentara leves pero apreciables escalones por debajo de los 0,04 mm.

Una vez que la fresa multidiente ha iniciado el fresado trocoidal, cada filo de corte individual entra en la pieza generando un calor y un esfuerzo mínimos. La ventaja de utilizar fresas multidiente es el elevado avance por diente que se puede aplicar, lo que se traduce en una productividad mucho mayor.

A pesar de su potencial, el fresado trocoidal también presenta algunos retos. La fresa debe realizar un complicado movimiento que puede ir más allá de la capacidad de los sistemas de programación CNC convencionales. Además, la máquina debe ser lo suficientemente rígida y rápida para el fresado trocoidal. La fresa debe ser capaz trabajar a velocidades elevadas y ser adecuada para el material. La rigidez de la máquina determina el grado de agresividad posible del fresado trocoidal. Otros factores que influyen son el tamaño de la fresa, el material de la pieza y la profundidad de corte.

La idea básica del mecanizado trocoidal implica un sustancial aumento de las velocidades de corte y de los índices de avance; las virutas se cortan a su máximo espesor al principio del corte y va disminuyendo hasta el final del mismo (fresado en concordancia). La trayectoria de cada diente se basa en los resultados de ciclos de mecanizado anteriores, eliminando movimientos en el aire y minimizando los movimientos de retracción.

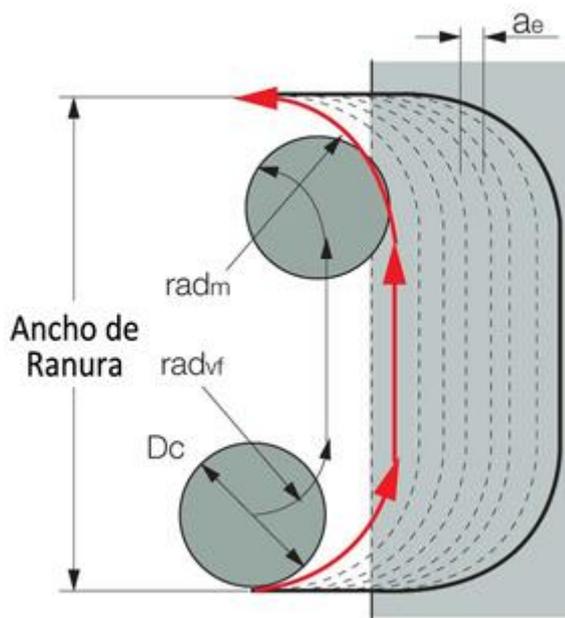


Ilustración 3: trayectoria de los dientes en fresado trocoidal

Uno de los beneficios es que se pueden mecanizar ranuras de mayor ancho que el diámetro de corte. Esto quiere decir que se pueden mecanizar diferentes anchos de ranuras con el mismo diámetro de herramienta de una forma eficiente. Como la profundidad de corte radial es pequeña, se pueden utilizar fresas con mayor número de dientes, lo que implica mayores avances y velocidades de corte que en aplicaciones convencionales de fresado de ranuras.

3.4.3. Fabricación de herramientas

Para fabricar herramientas se utilizan máquinas rectificadoras ya que el material con el que se trabaja suele tener una gran dureza. La mayoría de las herramientas que se fabrican suelen ser de HSS (High Speed Steel) o de metal duro (Hard metal) y en función de esto el material de la muela que se utiliza para tallar la herramienta también cambia.

Características del metal duro:

Son compuestos metálicos de altísima dureza. Estos compuestos metálicos se producen con una especie de “mortero metálico” donde la “arena” es polvo gris de carburo de tungsteno y el “cemento” o aglutinante es cobalto. El proceso para que esta mezcla “fragüe” se llama sinterización. Ésta consiste en un tratamiento a alta presión y temperatura, pero sin llegar al punto de fusión de todos componentes. En el proceso se alcanzan presiones de hasta 20.000 kg/m² y temperaturas de 1600°C. Con estas condiciones el cobalto se funde (a 1495°C) aglutinando así el polvo de carburo de tungsteno cuyo punto de fusión no se alcanza hasta los 2780°C. El Metal Duro

resultante posee unas propiedades perfectas para las herramientas de corte, la elevada dureza del carburo de tungsteno y la tenacidad que le confiere el cobalto.

La composición del Metal Duro puede ser de un 85 a un 98% de carburo de tungsteno, de un 2 a un 15% de cobalto y de un 0 a un 1% de otros metales como níquel y hierro. Según la composición del "mortero" se obtiene Metal Duro con diferentes valores de dureza, tenacidad o resistencia a la abrasión y a la fractura.

Otro aspecto importante que confiere al Metal Duro diferentes características de dureza y resistencia al desgaste, es el tamaño de grano del carburo de tungsteno. El tamaño de grano oscila entre 0,2 a 2,5 μm ($1 \text{ mm} = 1 \text{ micrómetro} = 0,001 \text{ mm}$). Una cucharilla de café con polvo de carburo de tungsteno contiene entre 60.000 millones y más de 2 billones de granos.

Características del HSS:

Las siglas HSS son el acrónimo en inglés "High Speed Steel" y se conocen en español como "aceros rápidos" debido a que pueden ejecutarse cortes a alta velocidad sin que se afecte apreciablemente el filo de la herramienta. Son en general más duros que los aceros al carbono y mucho más resistentes a la corrosión.

En estos aceros, además del carbono, existen otros elementos aleantes que aumentan la dureza y reducen en mucho la pérdida de esta durante el calentamiento, razón por la cual pueden hacerse cortes a alta velocidad sin que el calentamiento propio de este trabajo afecte la capacidad de corte de la herramienta. Entre los elementos aleantes principales se encuentran el cromo y el vanadio.

Estos aceros son sometidos a un tratamiento térmico complejo para lograr las mejores propiedades.

De aceros rápidos se fabrica herramientas de corte como brocas, cuchillas de torneado, fresas de corte etc.

Tipos de muelas:

Dependiendo de la dureza del material de la herramienta que se va a fabricar la muela que se debe elegir es diferente. Para fabricar herramientas de metal duro se utilizan muelas de diamante y para HSS muelas de CBN (Nitruro de Boro Cúbico). En el tallado de herramientas estos son los dos tipos de muelas que se utilizan dado que, como se ha comentado antes, la mayoría de las herramientas son de metal duro o HSS.

Cada fabricante de muelas tiene su forma de codificar las muelas, pero en todos aparece la misma información:

- Tipo de grano: de diamante o CBN

- Tamaño de grano: cuanto mayor sea el tamaño de grano se podrá arrancar más material por pasada, pero el acabado superficial será peor (y viceversa).
- El grado: nos indica si es un abrasivo blando, medio o duro.
- Tipo de aglomerante: material con el que se unen los granos de abrasivo. Dependiendo de esto la muela se podrá afilar o no, por ejemplo, los que tienen aglomerante metálico no se pueden afilar.
- Dimensiones de la muela: el diámetro exterior de la muela, la anchura y el diámetro de agujero interior.

Para fabricar una herramienta se siguen unas operaciones y para cada operación la forma de la muela cambia. En los **anexos** están todas las formas de muela que se utilizan en fabricación y afilado de herramientas. También aparecen en que operaciones se puede utilizar cada tipo de muela.

Operaciones para fabricar herramientas:

Como este proyecto se centra en fabricar una fresa estas son las operaciones que se siguen para hacer una y los parámetros más importantes a tener en cuenta en cada una de ellas:

- Acanalado: lo primero que se mecaniza es el canal de la fresa, que es por donde se evacua la viruta cuando esta está cortando material. En esta operación el parámetro más importante es el ángulo de desprendimiento del canal. Dependiendo de esto el filo puede ser más positivo o negativo. En función de esto el filo quedará más fuerte o más débil, pero la capacidad para evacuar la viruta también cambia. Cuanto más positivo sea el filo, será más débil, pero la viruta se evacua mejor y no rozará mucho con el canal evitando grandes subidas de temperatura debido a la fricción entre canal y viruta. En cambio, si el filo es más negativo será más fuerte, pero en el contacto entre canal y viruta se darán grandes subidas de temperatura desgastando el canal.
- Desahogo: son los canales que se le hacen a la fresa en el frente. Ayudan a evacuar la viruta que sale por los filos del frente de la fresa. En esta operación el parámetro más importante es el ángulo de desprendimiento de del desahogo por razones similares que se han dicho en el punto anterior.

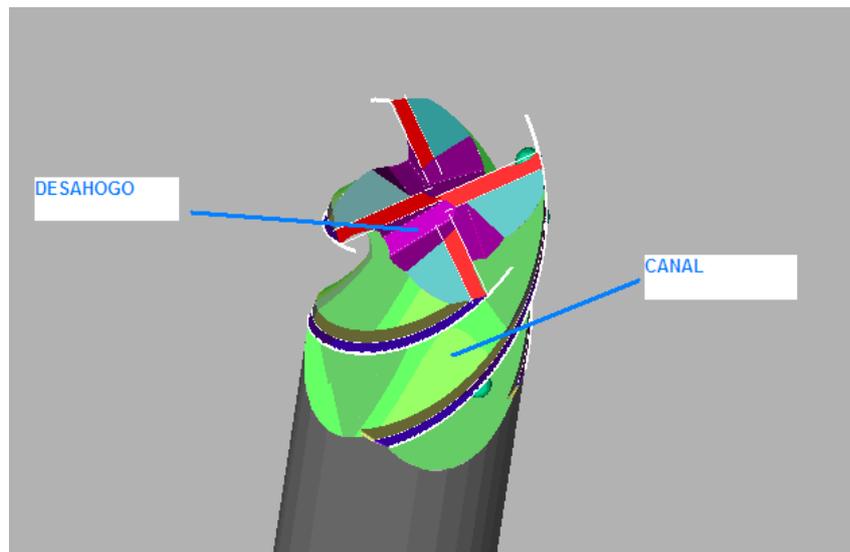


Ilustración 4: canal (en verde) y desahogo (en morado) de una fresa de cuatro dientes

- Ángulo de incidencia en el diámetro: es la primera faceta del diente en el diámetro. Aquí el parámetro más importante es el ángulo de incidencia. Dependiendo de esto el filo queda más negativo o positivo. Con este ángulo y con el de desprendimiento del canal el queda definido el ángulo que va a tener el filo. Normalmente las fresas suelen tener dos facetas con sus respectivas anchuras. El primero es el más importante dado que esta en contacto con el filo de corte. El ángulo de incidencia de la segunda suele ser para que la herramienta no talone al girar, por lo tanto, tiene que ser un ángulo mayor que el del primero.

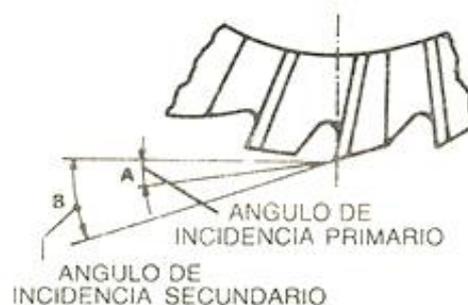


Ilustración 5: primer y segundo ángulo de incidencia de una fresa

- Ángulo de incidencia en el frente: los dientes del frente también suelen tener dos facetas cada uno su ángulo de desprendimiento y su anchura. Estos ángulos y anchuras normalmente coinciden con los del diámetro, pero no en todos los casos.

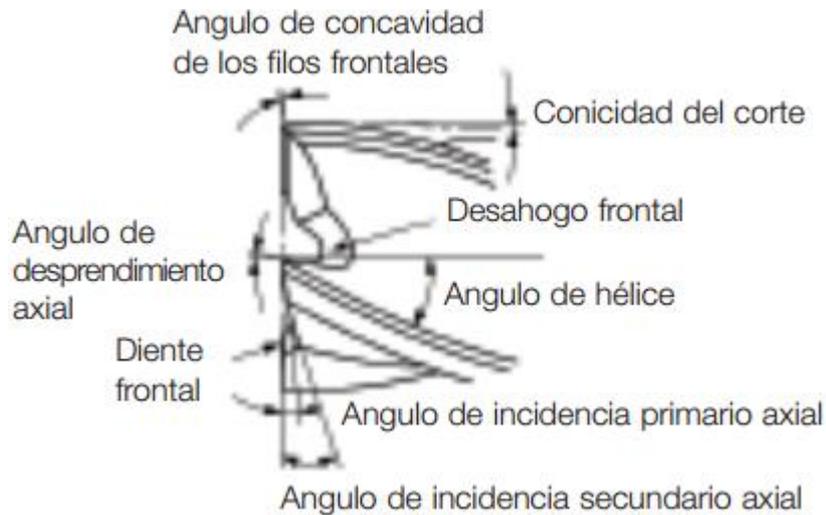


Ilustración 6: ángulos del frente de la herramienta

3.5. Análisis de alternativas

Para conseguir una geometría de herramienta adecuada, primero hay que analizar las alternativas nos ofrece la industria en este aspecto. Como el mecanizado de titanio es muy agresivo debido a su baja conductividad térmica, las herramientas sufren mucho. Por eso, hay que elegir bien que tipo de herramienta hay que utilizar.

En el mercado existen muchos tipos de herramienta para mecanizar titanio. Estas herramientas pueden ser de distintos materiales y formas, pero los dos materiales más utilizados son el HSS y el metal duro. En cuanto a la estructura, hay herramientas enterizas y de plaquitas intercambiables, pero dentro de estos también hay muchas alternativas.

Para empezar, la selección de una fresa especializada para el titanio debe basarse en las opciones de programación necesarias. Para el titanio, las características básicas de la herramienta siempre incluyen un ángulo de desprendimiento relativamente positivo con un agudo pero resistente filo de corte en una buena calidad de metal duro. Estas características le proporcionan a la herramienta la resistencia necesaria para resistir las especiales exigencias térmicas y químicas del titanio. La tecnología de plaquita intercambiable ha avanzado considerablemente en lo que se refiere a geometría y material de la herramienta, y están ganando terreno como la solución más eficiente y rentable con respecto a la gran variedad de opciones de herramientas enterizas de metal duro y HSS disponibles, incluso para herramientas de tamaño mediano a grande. Hasta hace poco, el progreso en el mecanizado del titanio

parece no haber sido muy espectacular, pero, ahora, una serie de innovadores desarrollos han optimizado el rendimiento del fresado.



CorMill 690 de Sandvik Coromant.
interpolación circular procedente de
agujero taladrado previamente

Ilustración 7: fresa de plaquitas intercambiables

Debido a la naturaleza de los típicos componentes aeroespaciales, el fresado radial es un método de mecanizado muy apropiado para el titanio. Las piezas, frecuentemente, presentan varias escuadras, esquinas, perfiles y cavidades, que, a menudo, deben mecanizarse a partir de piezas en bruto. No obstante, una gran profundidad de corte radial puede reducir de forma considerable la vida útil de la herramienta, mientras que una gran profundidad de corte axial tiene relativamente poca influencia en la temperatura de corte y, por tanto, no afecta a la vida útil de la herramienta de la misma manera. Por ello, una fresa de paso reducido de filo largo con un empañe radial de un 30% y tanto empañe axial como permita la aplicación es la manera más efectiva de mecanizar el titanio.

La resistencia al desgaste, que le permite al metal duro alcanzar altas velocidades, tiene su precio. Ese precio se paga en la "tenacidad volumétrica", o la habilidad del material de resistir fractura y descascaramiento. El metal duro, en general, es más frágil que el acero rápido.

Esto es significativo en el fresado de titanio porque, generalmente, el desgaste del borde no es la causa de fallas de la herramienta en este material. Más bien, el descascarado o el rompimiento conducen a la falla. Adicionalmente, la generación de calor puede hacer imposible sacar ventaja de la alta velocidad de corte que el metal duro permite. Estos dos factores sugieren que la tradicional tenacidad puede no ser de mucho valor. Con una herramienta más tenaz (de acero rápido, por ejemplo) se puede lograr una mayor profundidad de corte sin el temor de que los choques puedan causar rompimiento de los bordes. Particularmente, en una máquina-herramienta menos

rígida, es importante que el material de la herramienta admita una mayor tasa de remoción de metal a partir de una mayor profundidad de corte que haciendo uso de la velocidad.

Algunas veces el metal duro es necesario. Por ejemplo, los cortes con inmersiones radiales bajas sorpresivamente pueden permitir alta velocidad. En corte como ese, lo importante no es la resistencia al desgaste sino la resistencia al desgaste a altas temperaturas. Este requisito sugiere una herramienta de metal duro con recubrimiento.

Visto lo todo lo anterior, la herramienta más adecuada para este trabajo tiene que ser de metal duro y enteriza. Por un lado, en el mecanizado trocoidal la fresa entra con poca profundidad radial y gran profundidad axial, por lo tanto, los dientes tienen tiempo de enfriarse y no se calientan tanto como cuando entran con mucha profundidad radial. La trayectoria circular que sigue la herramienta también ayuda a que los dientes se calienten menos. Por otra parte, la maquina que fabrica herramientas solo puede fabricar herramientas enterizas y por esto quedan descartadas las de plaquitas intercambiables.



Ilustración 8: fresas enterizas de metal duro

3.6. Análisis de riesgos

Cundo se hace un trabajo como este, se planea hacerlo en un periodo de tiempo determinado y se tiene que terminar antes de que se acaben los plazos de entrega. Pero como en todos los trabajos, pueden surgir retrasos por distintos motivos y, por lo tanto, costara más en terminar el trabajo si surgen problemas. Por eso, se hace un análisis de los distintos riesgos que hay, los cuales atrasan la fecha de terminar el trabajo.

Los problemas que pueden surgir pueden ser muchos, pero algunos tienen más riesgo que otros de que aparezcan. Por eso se van a analizar cuales son los mayores riesgos que hay en este trabajo. A continuación se explica que riesgos puede haber:

- Uno de los riesgos que hay y que aparece en todo tipo de trabajos es el de la salud. La persona o las personas que se encargan de llevar el trabajo adelante pueden tener en cualquier momento problemas de salud que les impide seguir con sus tareas. Estos problemas pueden ser de mayor o menor gravedad y, por eso el trabajo puede retrasarse más tiempo o menos. Por ejemplo, si se enferma con un gripe, el trabajo se retrasará, pero solo unos días y no afectara mucho a los plazos de entrega. Pero si hay un problema de salud que sea grave, entonces hay mucho riesgo de que el trabajo no se termine en los plazos estimados.
- Como este trabajo se ha hecho en una empresa que se dedica a la producción de distintas piezas, como es lógico, la prioridad se la dan terminar las piezas en los plazos exigidos. Por esto, para realizar las pruebas en las maquinas que se utilizan para la fabricación de estas piezas tiene que haber momentos en los cuales no haya mucha producción. Por tanto, existe el riesgo de que haya que producir mucho y no haya tiempo para realizar los ensayos. Esto puede ser un gran problema porque dependiendo de la demanda que tenga la empresa el trabajo puede atrasarse mucho.
- Otra de las cosas que puede surgir es que los equipos que se tienen que utilizar para realizar el trabajo se estropeen y no se puedan usar en un tiempo. Por ejemplo, puede ser que la maquina que fabrica las herramientas tenga algún tipo de avería y no se arregle hasta que pasen unos días. O puede que los programas informáticos que se utilizan tengan problemas de licencia impidiendo seguir adelante con el trabajo. Dependiendo el tipo de problema que surja el retraso puede ser grande.
- Como en todos los trabajos, pueden surgir problemas relacionados con el mismo trabajo. Pude pasar que al realizar ensayos no se hayan hecho bien y que haya que repetirlos otra vez. Algunas pruebas se pueden repetir varias veces hasta que tengan buenos resultados y esto conlleva necesitar más tiempo para terminar el trabajo. Dependiendo de cómo de largos sean los ensayos el tiempo que se perderá repitiéndolos será mayor.

		Consecuencias		
		Ligeramente dañino	Dañino	Extremadamente dañino
Probabilidad	Baja		Avería	
	Media	Ensayos fallidos	Salud	
	Alta			Producción

Tabla 1: tabla de riesgos

En esta tabla se puede ver la probabilidad de cada riesgo y si las consecuencias de estos son más o menos graves. Pero esto puede ser que no sea del todo exacto puesto que puede ocurrir que algún problema que se pueda pensar que no es muy grave, al final lo sea más de lo esperado. Entonces, en la tabla de arriba, pasa de color amarillo a rojo (o de verde a amarillo o rojo). Cuanto más dañino sea la consecuencia, más se atrasará el trabajo aumentará el riesgo de no terminarlo a tiempo.

5. METODOLOGÍA

5.1. Equipos y Materiales

A continuación se describen los distintos equipos y materiales que se utilizan para realizar el trabajo.

5.1.1. Máquina para fabricar y afilar herramientas

Para la fabricación de herramientas se utiliza una maquina rectificadora de Walter. Esta máquina dispone de cinco ejes, por lo que se pueden fabricar casi todo tipo de herramientas partiendo de unas barras de metal duro o HSS.



Ilustración 9: Máquina Walter para fabricación y afilado de herramientas

Esta máquina dispone de dos husillos para las muelas, es decir, que se pueden poner dos trenes de muelas. En cada tren de muelas se ponen las muelas que se necesitan para fabricar la herramienta y normalmente se suelen poner dos muelas (pero esto depende del tamaño de la máquina). Así se pueden montar distintos trenes de muelas con distintas combinaciones de muelas. Esto depende de las operaciones que se tienen que hacer para fabricar la herramienta. En este caso, las muelas que se

utilizan son diamante porque la herramienta que se fabrica es de metal duro.

Mechanical axes	
X axis	460 mm
Y axis	320 mm
Z axis	660 mm
Rapid traverse speed X, Y, Z	max. 15 m/min
C axis	± 200 °
A axis	∞
Linear resolution	0,0001 mm
Radial resolution	0,0001 °
Grinding spindle drive	
Max. grinding wheel diameter	200 mm
Grinding spindle speed	0 – 10,500 rpm
Others	
Machine weight	approx. 4,200 kg
Power consumption at 400 V/50 Hz	approx. 25 kVA
Control	FANUC
Software standard	HELITRONIC TOOL STUDIO

Ilustración 10: datos técnicos de la maquina

Como se ve en los datos la maquina tiene cinco ejes, tres de translación (X, Y, Z) y dos de giro (A y C). Los de translación tienen una resolución de 0,0001mm y los de giro de 0,0001º. El diámetro máximo de las muelas que se pueden montar es de 220mm y la velocidad de giro máxima que estos alcanzan es de 10 500rpm. Por otro lado, el control es de FANUC y el software con el que se programa la máquina es el de la propia Walter “Helitronic Tool Studio”.

5.1.2. Máquina de medir herramientas

Para hacer las mediciones de las herramientas se utiliza una maquina de Zoller con el que se pueden hacer muchos tipos de mediciones para distintas herramientas. La máquina dispone de cámaras de alta resolución y de gran aumento con los que se pueden hacer mediciones a niveles microscópicos.



Ilustración 11: máquina de medición de herramientas Zoller

Tiene un software donde tiene guardados los programas de medición de distintas herramientas, por lo que con cargar el programa adecuado para la herramienta, hace las mediciones automáticamente. Esto sirve para la calibración de herramientas, es decir, si las mediciones que hace no entran en las tolerancias deseadas la máquina te avisa de que no se puede utilizar. Y si para una herramienta nueva no existe un programa de medición se puede crear uno para que así la siguiente vez que se mida esa herramienta se haga de forma automática.

Pero no solo funciona con programas determinados, si no que se pueden hacer todo tipo de mediciones de forma manual. Si se esta experimentando con alguna herramienta se toman distintas medidas en el transcurso de estos. Por esto, en estos casos las medidas siempre se toman de forma manual porque es mucho más rápido que andar haciendo un programa de medición cada vez que se necesite medir algo.

5.1.3. Centro de mecanizado

El centro de mecanizado en donde se prueban las herramientas es uno de Mitsui Seiki. Esta máquina es un centro de mecanizado horizontal de cinco ejes.



Ilustración 12: centro de mecanizado Mitsui Seiki

Esta máquina dispone de un equipamiento básico de control numérico, sistema automático de cambio de herramientas y sistema automático de cambia de ballet (el cubo donde se atan las piezas). Es decir, que las piezas entran y salen automáticamente desde el exterior y las herramientas también se cambian de forma automática. En la parte de atrás tiene un almacén donde se depositan las herramientas, cada una con su portaherramientas y de ahí la maquina coge la herramienta que necesita en cada momento.

En la siguiente imagen se muestran las características de los ejes de la máquina como los avances y las resoluciones de cada uno.

<i>Axis Traverse Rates</i>	
<i>Rapid traverse rates</i>	
X axis:	24,000 mm / min. (945 IPM)
Y and Z axes:	36,000 mm / min. (1,418 IPM)
A axis:	1,440° / min.
B axis:	4,000° / min.
<i>Cutting Feed Rates</i>	
X, Y and Z axes:	0.1 ~ 20,000 mm/min. (0.004 ~ 788 IPM)
B axis:	Not applicable for 1° table
B axis infinite (option):	0.1~3,600°/min.
A axis:	1,440° / min.
B axis:	4,000° / min.
<i>Minimum Resolution</i>	
X, Y and Z axes:	0.001 mm (0.00004")
A axis:	0.001°
B axis:	0.001°

Ilustración 13: características de los ejes del centro de mecanizado

5.1.4. Materiales utilizados

Los materiales utilizados para realizar el trabajo han sido dos. Por un lado, se necesitan barras de metal duro para fabricar las herramientas, y por otro, tacos de Ti6Al4V para realizar los ensayos de mecanizado probando las herramientas.

Los tacos de Ti6Al4V que se utilizan son de dimensiones: 270x200x80. Dependiendo lo que duren las herramientas se necesitan más tacos o menos. Y dado que este material es bastante caro, hay que planificar bien los ensayos para no echar a perder mucho material.

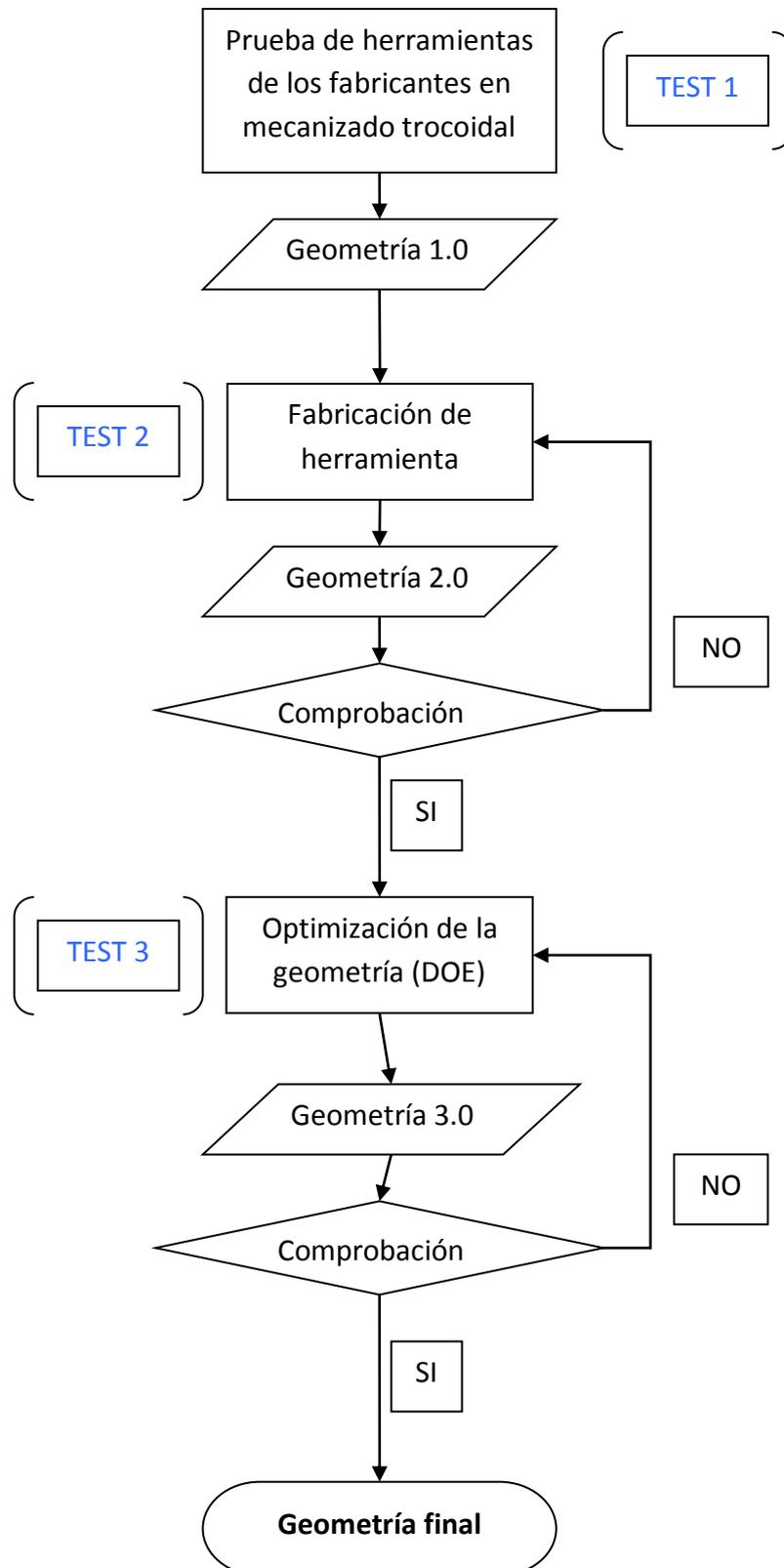
Las barras de metal duro son de distintas calidades y distintos tamaños. En este caso la calidad del metal duro es de HB30F, que es una de las mejores y sirve para mecanizar distintos materiales. En cuanto a las dimensiones, tienen un diámetro de 16mm y una longitud de 300mm.



Ilustración 14: barras de metal duro

5.2. Diseño de ensayos

Para realizar la parte experimental del trabajo se siguen unos pasos que se describen más adelante. Se sigue el siguiente esquema donde aparecen todas las etapas de la parte experimental del trabajo.



Como se ve en este diagrama de flujo, se siguen tres pasos principales que son los tres Test que aparecen. De cada Test, se saca una geometría de herramienta que se irá mejorando hasta llegar a la geometría final. Con esta geometría final se fabricará la herramienta definitiva que se va usar en producción.

En el prime Test se cogen distintas marcas de herramientas y se ve cual es el que mejor funciona trabajando en las mismas condiciones. Así se elegirá la fresa del cual se sacará la geometría para después fabricarla.

En el segundo Test se sacan todos datos geométricos de la fresa elegida en el anterior paso para después fabricarla con esto datos. Hay que intentar coger todos los datos geométricos posibles para que la geometría sea lo más cercano posible al del fabricante. Una vez fabricada la fresa, se prueba como se comporta a la hora de mecanizar y si tiene un comportamiento similar al del fabricante se pasa al siguiente paso. Si la fresa fabricada no se comporta adecuadamente, hay repetir este paso comprobando si se han cogido bien los datos y fabricándola otra vez hasta que se consigan buenos resultados.

En el tercer y último Test se procede a mejorar la geometría obtenida en el anterior apartado mediante diseño de experimentos (DOE). Aquí se preparan una serie de experimentos haciendo pequeños cambios en la geometría de la herramienta. Con el resultado de estos experimentos se obtiene la geometría final de la herramienta y esta herramienta será el que se utilizara en producción.

5.2.1. Test 1: Prueba de herramientas de los fabricantes en mecanizado trocoidal

En este apartado se prueban distintas fresas de desbaste utilizando un patrón de corte que es el fresado trocoidal. Para calcular estas trayectorias se va a utilizar el programa “Volumill” que está integrado dentro del CAM de NX.

Las ventajas de un fresado trocoidal frente a uno tradicional es que obtenemos un caudal de viruta mayor y también una vida de herramienta mayor. Esto se consigue con las trayectorias que se generan, que nunca contienen giros bruscos y además mantiene constante el espesor de viruta (para esto cambia el avance de la fresa en función de lo enterrada que esté). También es un mecanizado seguro ya que aunque se rompa la herramienta, es difícil que dañe la pieza. No es como cuando se va ranurando que si se rompe la herramienta, lo más probable es que se dañe la pieza.

La desventaja que tiene es que para aprovechar este tipo de mecanizado, el ap tiene que ser muy alto. Además es recomendable que el ap sea como mínimo una vez el diámetro de la herramienta.

El titanio es un material muy caro y no es viable desbastar tacos para hacer las pruebas. Por ello se aprovechan dos piezas muy parecidas que se tienen en producción para realizar las pruebas. La parte que se mecaniza es un desbaste previo a un tratamiento térmico donde se queda como mínimo a 2mm de la pieza final. Por lo tanto, aunque se rompa la herramienta no se daña la pieza.

La pieza se ha desbastado con trayectorias trocoidales en todas las zonas en las que se ha podido. El ap de las trayectorias ha sido muy variado y en ocasiones se han mecanizado profundidades por debajo de una vez el diámetro de la herramienta (aunque no es recomendable). En la tabla 1 se puede ver el % de tiempo aproximado que se mecaniza en cada altura.

AP(mm)	TIEMPO (%TOTAL)
25,75	40
46,75	16
17	16
15,5	8
38,5	5
38	5
42	3
15	3
9	3
9,5	2

Tabla 2: % de tiempo para cada ap

El fresado trocoidal es un mecanizado del que no se tiene experiencia en la empresa y como se desconoce quienes son buenos fabricando fresas para este tipo de mecanizado, se han probado una gran cantidad de fresas de diferentes fabricantes.

Las fresas que se han probado son de D16 y con un voladizo de 63mm (algunas incluso con más voladizo). El portaherramientas seleccionado es un weldom-D16 de 100mm de longitud.

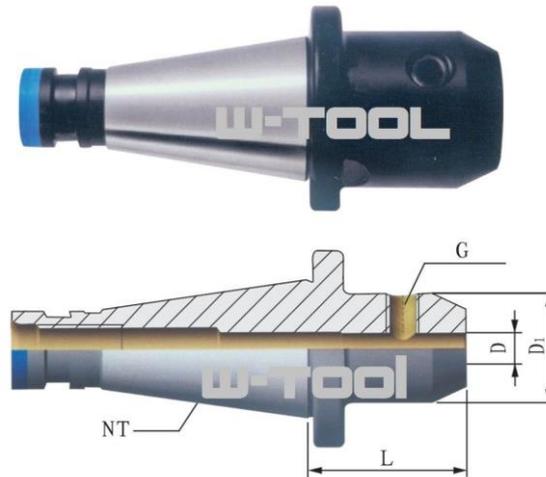


Ilustración 15: portaherramientas weldom-D16

Para seleccionar la mejor herramienta se va a tener en cuenta el precio de la herramienta, el precio de la hora máquina y la vida de la herramienta. Con estos valores se calcula el coste que tiene mecanizar cada cm³ de material. Y en función de esto se selecciona la herramienta más rentable.

Para las pruebas se han calculado diferentes caudales: Caudal máximo, caudal/ap, caudal medio teórico y caudal real. El caudal máximo es el caudal que se obtiene mecanizando con el ap máximo de la pieza y además suponiendo que la fresa mecaniza al avance programado. El caudal/ap es el caudal máximo dividido por el ap máximo y este valor es útil para comparar fresas con operaciones de ap diferentes. El caudal real es el caudal verdadero que estamos obteniendo en la pieza, que se calcula dividiendo el caudal medio teórico por 2,3. El caudal medio teórico se obtiene de suponer que la fresa siempre avanza al avance programado, pero en realidad el programa de Volumill ajusta el avance en función del empañe de la herramienta. A mayor empañe menor es el avance y por lo tanto el caudal real siempre es menor que el teórico. El valor de 2,3 lo hemos calculado comparando el caudal real con el caudal medio teórico en una de las pruebas. En el resto de pruebas el caudal real se ha calculado dividiendo por 2,3 el valor teórico.

El coste de la herramienta se calcula con el caudal real y con un precio de hora máquina de 40 euros.

También se calcula el espesor de viruta máximo ya que es representativo del esfuerzo que tiene que realizar la fresa.

Para determinar que una fresa ha llegado al final de su vida útil, se mide la entalla en el filo. Cuando llega a 0,2mm se puede considerar que la fresa hay que reafilarla.

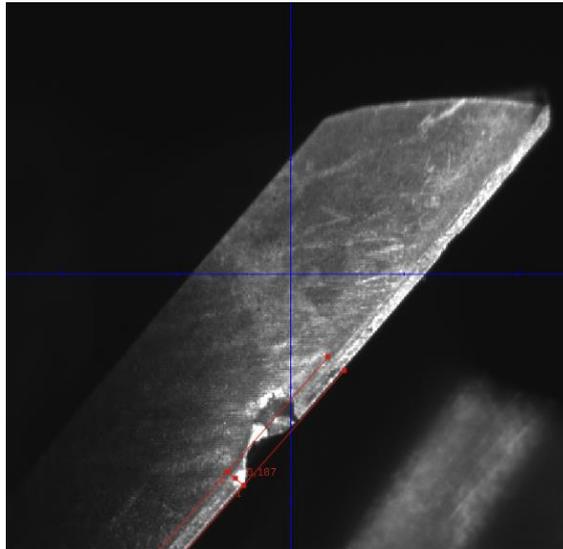


Ilustración 16: entalla de una fresa después de mecanizar

Después de hacer las pruebas, se selecciona una herramienta para que en la siguiente fase se examine para sacarle la geometría. La geometría de esta herramienta es la geometría 1.0 que aparece en el diagrama de flujo.

5.2.2. Test 2: Fabricación de herramienta

En esta fase se coge la herramienta elegida en el anterior apartado y se sacan todos los datos geométricos que sean posibles. Cuantos más datos se saquen, la herramienta que se fabrique se parece más al del fabricante. Así se consigue antes una geometría que se comporte lo más parecido posible a la herramienta del fabricante y se gasta menos material y tiempo. Por lo tanto, es importante observar bien la herramienta y sacar todos los datos posibles.

Las primeras medidas a coger son los que se pueden medir sin hacerle ningún corte a la herramienta, puesto que para coger algunas medidas hay que cortar la herramienta. Por eso, primero hay que tomar los datos que sean posibles antes de cortar porque después de cortar no se podrán coger. Algunas medidas como el diámetro (ya se sabe que es de 16mm) y la longitud de corte (longitud de los filos) se pueden tomar con el calibre puesto que no hay que ser muy preciso ya que no influyen tanto como otras medidas. Las medidas que se necesitan coger con más precisión se toman con la Zoller.

Una de los datos geométricos más importantes es el ángulo de hélice y para medirlo se aprovecha el palpador que dispone la Walter. Se amarra la herramienta como si se fuese a afilarlo y después se le mete un programa donde solo palpa el filo. Así el palpador va palpando los filos y nos da el ángulo de hélice de cada filo. Esto se hace para todos los filos porque hay herramientas que tienen distinto ángulo de hélice

en cada diente.

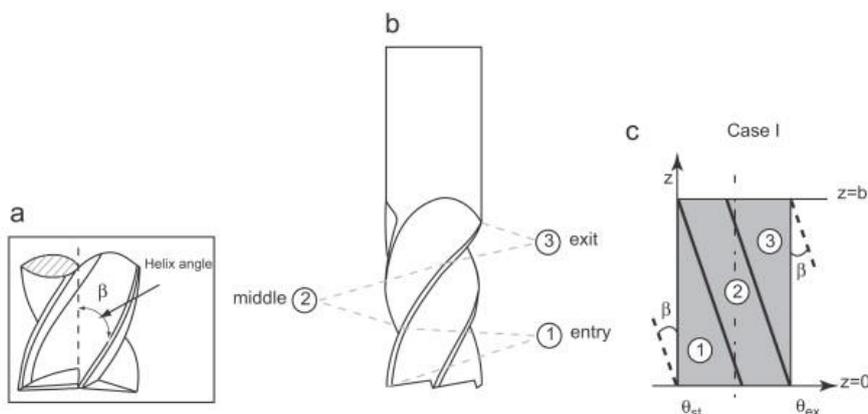


Ilustración 17: ángulo de hélice de una fresa

Para coger el primer y segundo ángulo de incidencia de los dientes frontales se utiliza la Zoller. Se coloca la fresa de forma adecuada y enfocando bien el filo se miden los dos ángulos tirando líneas tangentes a las facetas delanteras. Con esto en la pantalla aparece el ángulo que tienen estas líneas respecto al horizontal y esos ángulos son los de incidencia. También se mide el ancho que tiene la primera faceta con otra opción que tiene para medir distancias entre dos puntos.

Una vez hecho todo lo anterior, se corta la herramienta perpendicularmente respecto a su eje. Con esto se pueden observar de forma correcta los ángulos de incidencia de los filos del diámetro y el ángulo de desprendimiento del canal. Esto solo se puede hacer cortando la herramienta porque los dientes frontales no dejan enfocar bien la parte del canal y los ángulos mencionados antes. Una vez cortada la herramienta, se enfoca con la cámara desde la parte frontal (mirando de frente a la punta de la herramienta) de la herramienta y se tiran las líneas necesarias para medir los ángulos y las anchuras de las facetas. Pero para medir las anchuras de las facetas la cámara tiene que enfocar desde un lado de la herramienta en vez de la parte frontal.

Con todos estos datos que se sacan se consigue una geometría de herramienta que en el diagrama de flujo se ha llamado geometría 2.0. Con esto se fabrica la herramienta y se procede a probarlo en el centro de mecanizado. Si la herramienta no funciona bien se repiten los pasos anteriores hasta conseguir un geometría con el que funcione bien en fresado trocoidal.

5.2.3. Test 3: Optimización de la geometría

Una vez se obtiene una geometría que funcione lo más parecido posible al del fabricante se procede a mejorarla. Para esto se basa en el diseño de experimentos (DOE) que es una herramienta estadística que se utiliza para la mejora productos,

procesos o servicios para que cumpla con nuestras expectativas usando el mínimo número de experimentos o pruebas. DOE es muy útil cuando tenemos entre manos un producto complicado cuyo resultado puede depender de una gran cantidad de variables que no controlamos y que debemos ajustar para optimizarlo.

Para resolver estas dudas la metodología del diseño de experimentos nos dará una solución a todo esto haciendo el mínimo número de pruebas posible. Por lo tanto tras aplicar esta metodología sabremos exactamente cómo influye cada factor (y cada combinación de factores, ya que a veces varios factores producen efectos inesperados) para así poder tomar una decisión de qué nos conviene poner o quitar en nuestro producto.

Para preparar los experimentos lo primero que se tiene que hacer es elegir los factores que se van a variar en cada experimento. En este caso se decide que los factores a modificar sean el ángulo de desprendimiento del canal, el ángulo de la primera incidencia en el diámetro y el ángulo de hélice. Se eligen estos factores porque la experiencia dice que son los más influyentes en el comportamiento de una herramienta. Por lo tanto, se parte de los valores obtenidos en el anterior apartado y se trata de modificar un 10% cada factor arriba y abajo. Dicho de otro modo, hay tres factores y cada factor tiene dos niveles que se han llamado como el nivel “-1” y el nivel “+1”. En el nivel “-1” es el valor de cada factor se baja un 10% y en el nivel “+1” se sube un %10. Así, para cada factor se tienen dos valores con los que hacer combinaciones y ver la influencia de cada factor. Como son tres factores y cada factor tiene dos niveles salen ocho combinaciones distintas (2^3). Para cada combinación se fabrica una fresa y se prueba mecanizando para ver cuanto dura.

Resumiendo, se tienen que hacer ocho experimentos o, mejor dicho, se tienen que probar ocho fresas distintas y observar cuanto dura mecanizando cada fresa. Con los datos obtenidos se hace una tabla de donde se saca el efecto que tiene cada factor y las distintas combinaciones de factores.

Al final tendremos una función de regresión que nos relaciona el resultado con cada una de las variables:

Resultado = constante0 + constante1 * Factor A + constante2 * Factor B + constante3 * Factor C + constante4 * Factor AB + constante5 * Factor AC + constante6 * Factor BC + constante7*Factor ABC

Cada uno de los sumandos de la función nos da la aportación de cada uno de los factores, pudiendo ser estos valores discretos o “niveles” (0=No, 1=Sí), o bien pudiendo ser valores continuos. En este caso, todos son continuos puesto que son datos geométricos de la fresa que pueden tener cualquier valor dentro de un rango.

Una vez que consigamos esto, se saca cuales son los valores óptimos de los factores para que el resultado sea mejor. En este caso, se eligen los mejores valores para que la vida de la herramienta sea mayor. Y con esto se consigue la que será la geometría final, que será el de la fresa que se va a fabricar para utilizarlo en producción.

6. DESARROLLO DEL TRABAJO

En este apartado se describe como ha sido el desarrollo del trabajo y se pondrán los resultados obtenidos en cada fase de ensayos que se han descrito en el anterior punto. Con esto se entienden mejor como son los experimentos realizados para obtener las distintas geometrías de herramienta.

6.1. Prueba de herramientas de fabricantes en mecanizado trocoidal

Como se ha explicado antes, en este apartado se probaron unas herramientas de distintos fabricantes en mecanizado trocoidal. A continuación se resume en una tabla las herramientas que se probaron con sus características y el tiempo que estuvieron mecanizando las piezas de titanio antes de llegar al final de su vida útil. En los **anexos** están más detalladas las pruebas que se hicieron con cada fresa y las imágenes de cómo quedaron después de usarlas.

FRESA	AP MAX (mm)	AE (mm)	FZ (mm)	VC (m/min)	VF(mm/min)	N (rpm)
FABRICANTE 1	46,75	1,6	0,1	90	835,246	1890,493
FABRICANTE 2	46,75	1,5	0,14	75	1105,453	1592,077
FABRICANTE 3	46,75	1,28	0,14	75	1105,453	1592,077
FABRICANTE 4	46,75	1,28	0,14	75	1105,453	1592,077
FABRICANTE 5	46,75	1,28	0,175	75	1105,453	1592,077
FABRICANTE 6	46,75	1,6	0,1	90	995,246	1690,493
FABRICANTE 7	46,75	1,6	0,093	111	851,478	2108,274
FABRICANTE 8	46,75	1,6	0,08	90	778,197	1690,493
FABRICANTE 9	46,75	0,85	0,145	140	1893,278	2685,211

CAUDAL (cm ³ /min)	CAUDAL/AP	CAUDAL REAL (cm ³ /min)	EV MAX (mm)	VIDA (min)	COSTE (E/cm ³)
66,964	1,432	17,099	0,06	242	0,077
73,242	1,566	17,874	0,087	210	0,0781
62,5	1,337	15,093	0,076	276	0,0809
62,5	1,337	15,496	0,076	172	0,088
62,5	1,337	15,176	0,095	195	0,114
66,964	1,432	16,721	0,06	156	0,101
61,446	1,314	15,416	0,056	195	0,114
53,571	1,145	13,193	0,048	264	0,115
80,241	1,716	20,039	0,065	58	0,171

Tabla 3: comparación entre herramientas

Mirando la tabla se puede decir que las herramientas más rentables son el del fabricante 1 el del fabricante 2.

De estas dos fresas se decanto por elegir el fabricante 2 porque la fresa del fabricante 1 tenia entallas en todo el filo el del fabricante 2 solo en zonas puntuales. Además, este ultimo ofrecía un coste bajo de reacondicionamiento (reafilado y recubrimiento) comparado con los otros fabricantes.

Por tanto, de esta herramienta se sacó la primera geometría para tomarlo como referencia en las siguientes pruebas.

6.2. Fabricación de herramienta

Una vez elegido la fresa del cual se sacarían los datos geométricos, se empezaron a hacer las mediciones para fabricar una fresa. Para la primera fresa que se fabricó no se sacaron muchos datos de la fresa del fabricante. Se midieron algunas cosas con el calibre como la longitud de corte y la profundidad del canal. Después se sacó el ángulo de hélice con la Walter y con estos datos se fabricó una fresa para hacer una primera prueba. No se midieron los ángulos de incidencia ni de desprendimiento y se pusieron los que la el programa de la máquina pone por defecto. Se hizo esto para no cortar la herramienta del fabricante ya que si así funcionaba bien no se necesitaría cortar y no de desperdiciaría la herramienta.

Con esos datos se fabricó la fresa y se probó mecanizando un taco de titanio aeronáutico. Pero nada más empezar la prueba la fresa empezó a vibrar y se le rompió la punta a lo 15 minutos. Por eso, se paró la prueba porque la fresa estaba sin la punta, los dientes laterales salieron lleno de entallas y ya no podía seguir mecanizando.

Después de esto se decidió que se tenía que cortar la fresa para sacarle más datos.

Visto lo que pasó con la primera herramienta, el siguiente paso fue sacar todos los ángulos de incidencia y de desprendimiento que tiene la fresa. Para eso, se cortó una herramienta del fabricante en perpendicular a su eje. Así, se sacó el perfil de la sección perpendicular al eje de la herramienta y con esto se pudieron medir los ángulos de incidencia en el diámetro y el ángulo de desprendimiento del canal. Para la medición se utilizó la Zoller y se sacaron dos ángulos de incidencia en el diámetro con sus respectivos anchos y el ángulo desprendimiento del canal. También se sacaron los ángulos de incidencia en el frente con sus anchos, pero esto se hizo antes de cortarlo como ya se ha dicho en el anterior punto. En la siguiente tabla se ve que diferencias hay entre la primera y la segunda fresa:

DATOS	FRESA 1	FRESA 2
Diametro (mm)	16	16
Angulo de helice (°)	40	40
Longitud de corte (mm)	50	50
Profundidad del Canal (mm)	2,3	2,3
Ángulo de desprendimiento del canal (mm)	10	13
Primer angulo de incidencia en el diametro (°)	8	11
Segundo angulo de incidencia en el diametro (°)	16	20
Primer angulo de incidencia en el frente (°)	8	5
Segundo angulo de incidencia en el frente (°)	16	17
Ancho de la primera faceta en el diametro (mm)	1,8	0,7
Ancho de la primera faceta en el frente (mm)	1,8	1,5
Angulo del chaflan (°)	45	45

Tabla 4: datos da las dos fresas fabricadas

A continuación se ven las imágenes sacadas de la Zoller de las distintas mediciones:

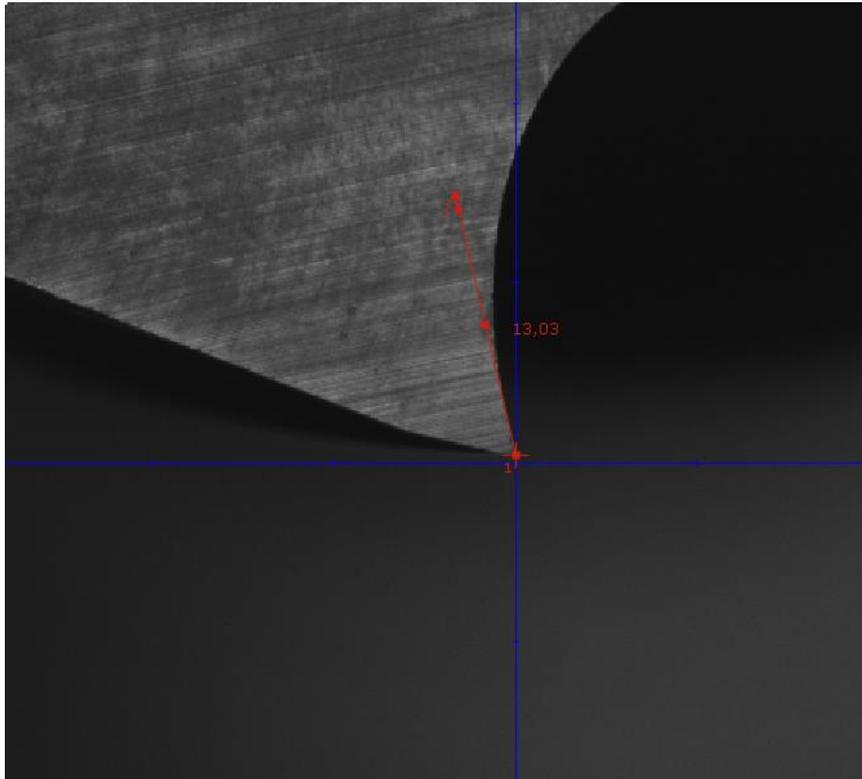


Ilustración 18: ángulo de desprendimiento del canal

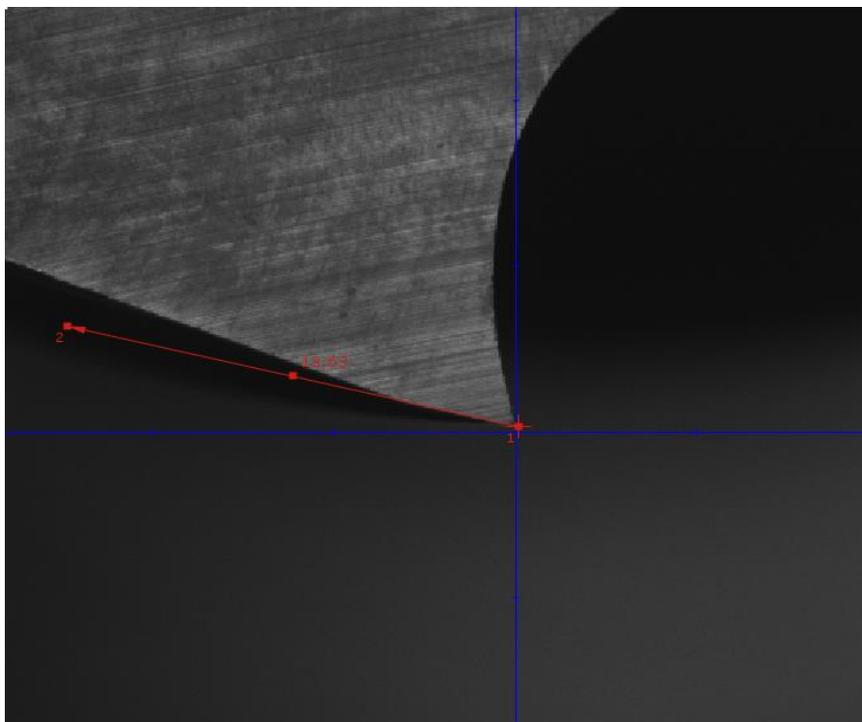


Ilustración 19: primer ángulo de incidencia en el diámetro

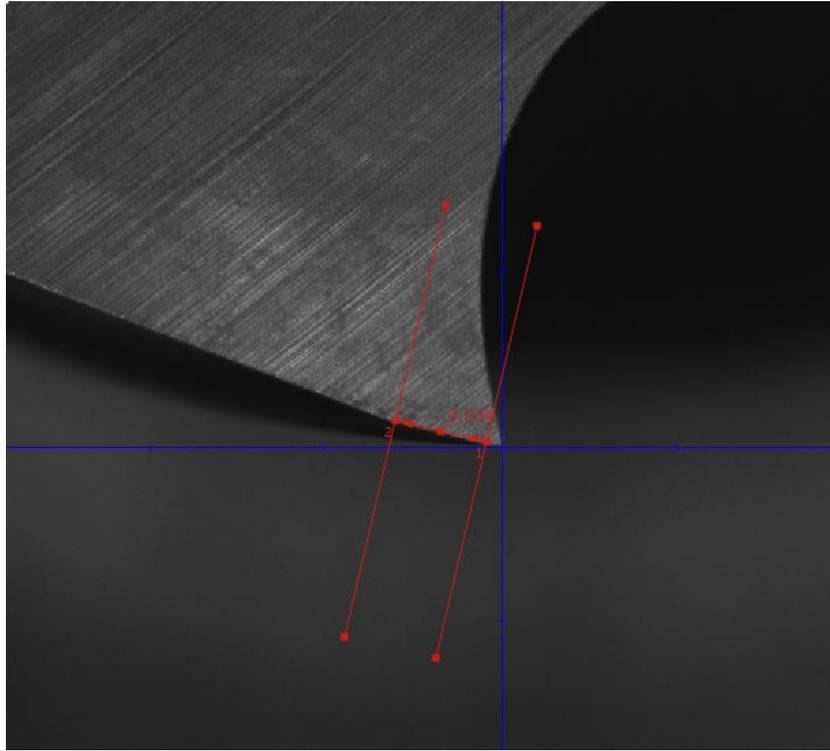


Ilustración 20: ancho de la primera faceta en el diámetro

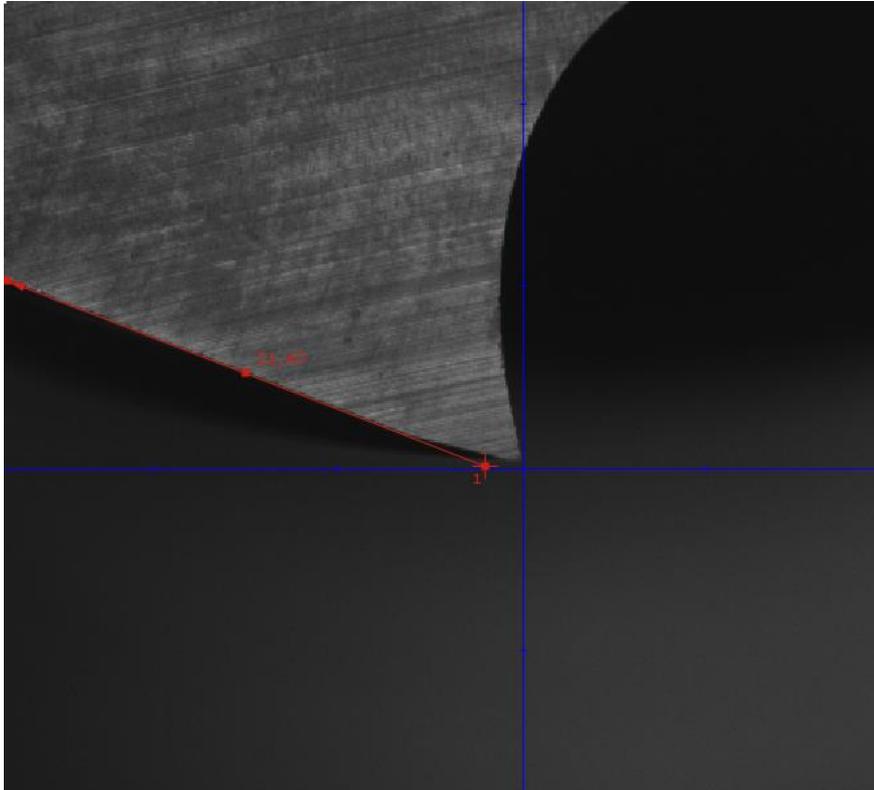


Ilustración 21: segundo ángulo de incidencia en el diámetro

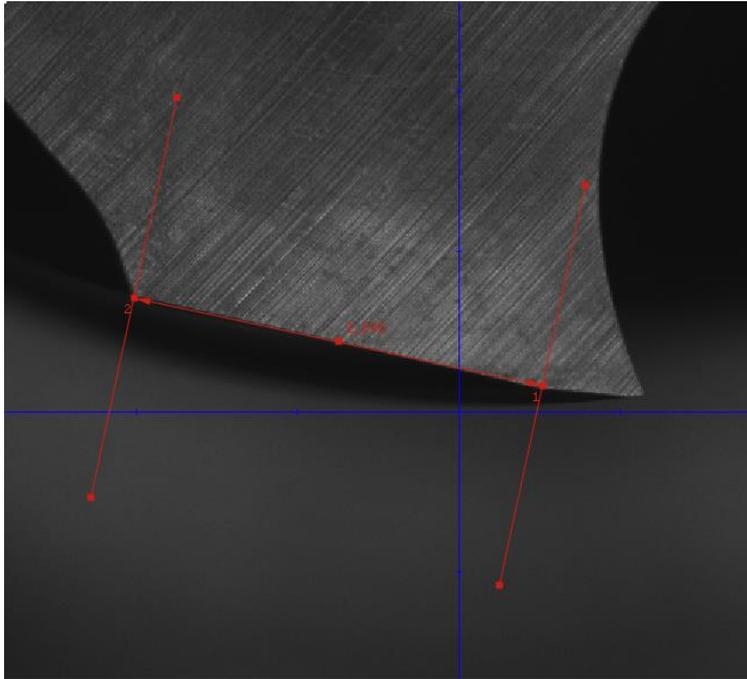


Ilustración 22: ancho de la segunda faceta en el diámetro

En estas imágenes se ve el diente de la herramienta después de ser cortada y ser rectificada para que quedase plano. Como al cortar la sección no queda muy plana la cámara no enfoca muy bien y por eso se rectifica.

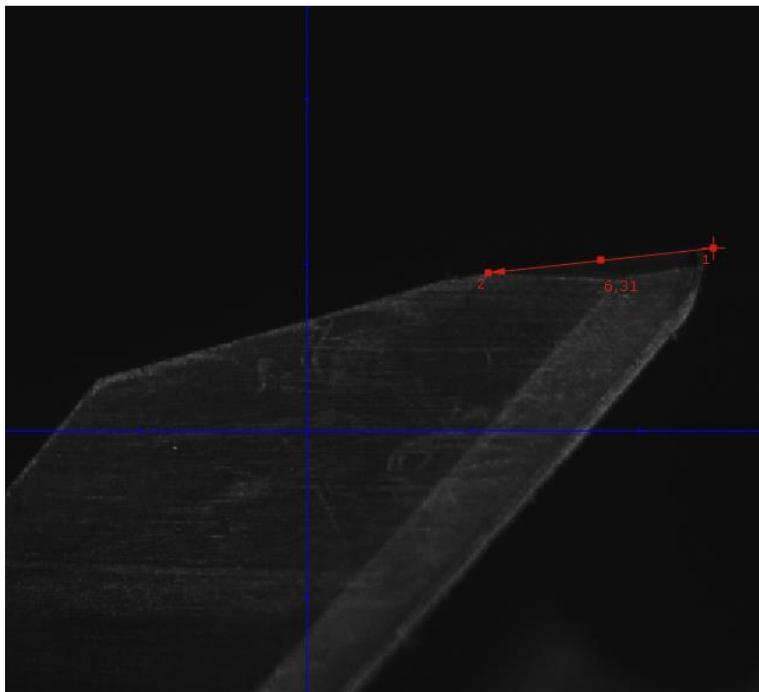


Ilustración 23: primer ángulo de incidencia en el frente

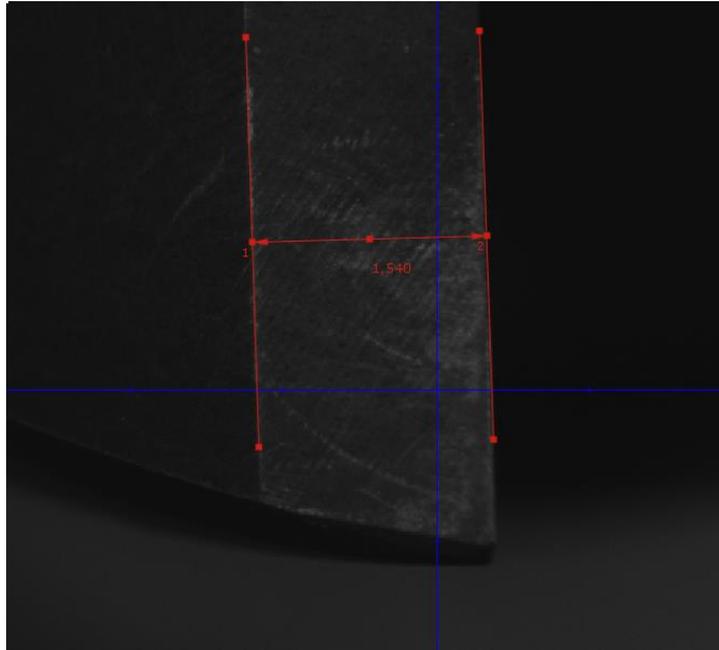


Ilustración 24: ancho de la primera faceta en el frente

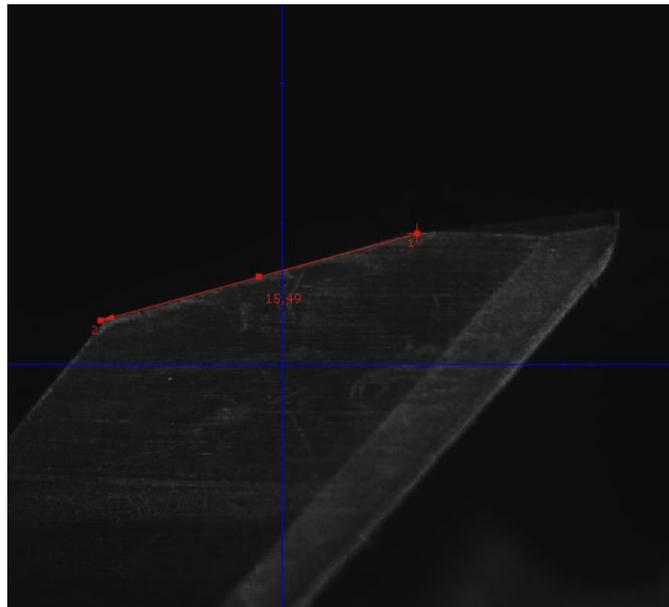


Ilustración 25: segundo ángulo de incidencia en el frente

En estas imágenes se ve un diente del frente de la herramienta y como se ha dicho antes esto se hizo antes de cortarlo.

Una vez medido la fresa, se fabrico la segunda herramienta con los datos que sacamos de la Zoller. Esta fresa, a la hora de mecanizar, tuvo un comportamiento muy similar al la fresa del fabricante. Estuvo mecanizando más de dos horas y no se rompió ni le salieron grandes entallas. Todavía podía seguir trabajando y por eso se decidió

que la geometría era buena y que todavía se podría mejorar. Por eso, se tomo esta geometría (geometría 2.0) como referencia para mejorarlo mediante el diseño de experimentos.

Para las pruebas se utilizó un taco de titanio con unas dimensiones de: 270x200x80 mm.



Ilustración 26: taco de pruebas desbastado

6.3. Optimización de la geometría

Como se ha dicho antes, para el diseño se tienen que elegir unos factores que se modificaran en cada experimento para ver la influencia que tienen en la respuesta. En este caso se eligen el ángulo de desprendimiento del canal, el primer ángulo de incidencia en el diámetro y el ángulo de hélice. Cada factor se modifica un 10% arriba y abajo, es decir, hay dos niveles.

	Valor de Geometría 2.0 (°)	Valor "+1" (°)	Valor "-1" (°)
A: Ángulo de desprendimiento	13	14,3	11,7
B: Angulo de incidencia	11	12,1	9,9
C: Ángulo de helice	40	44	36

Tabla 5: valores de los factores en cada nivel

Con estos datos se hace una tabla en Excel, donde se combinan todos los valores de los dos niveles. En este caso, se pueden hacer ocho combinaciones distintas que son ocho fresas para probarlos mecanizando. De esta tabla se saca el efecto que tiene cada factor en la respuesta.

En cada experimento se fabricó una herramienta, cada uno con los valores de cada factor que le correspondía. Y todas las fresas mecanizaron el taco de titanio en las mismas condiciones, es decir, todos tenían las mismas condiciones de corte y seguían la misma trayectoria. Y para cada fresa se apuntaba cuanto había durado siguiendo el

mismo criterio que se siguió hasta ahora, es decir, cuando en algún filo salía una entalla de más de 0,2mm se daba por terminado su vida útil. Con los resultados se obtuvo esta tabla:

Nº Experimento	A	B	C	AB	AC	BC	ABC	Resultado
1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	210
2	1	-1	-1	-1	-1	1	1	195
3	-1	1	-1	-1	1	-1	1	384
4	1	1	-1	1	-1	-1	-1	259
5	-1	-1	1	1	-1	-1	1	211
6	1	-1	1	-1	1	-1	-1	246
7	-1	1	1	-1	-1	1	-1	312
8	1	1	1	1	1	1	1	358
Media 1	264,5	328,25	281,75	259,5	299,5	268,75	287	
Media -1	279,25	215,5	262	284,25	244,25	275	256,75	
Efecto	-14,75	112,75	19,75	-24,75	55,25	-6,25	30,25	

Tabla 6: resultados de los experimentos y los efectos de cada factor

En esta tabla se saca el efecto de cada factor haciendo la resta de “Media 1” menos “Media -1” en cada columna. Cada media es la de los resultados de los “+1” y “-1” en cada columna.

Para ver mejor el efecto de cada factor y de las combinaciones de factores se hizo un gráfico.

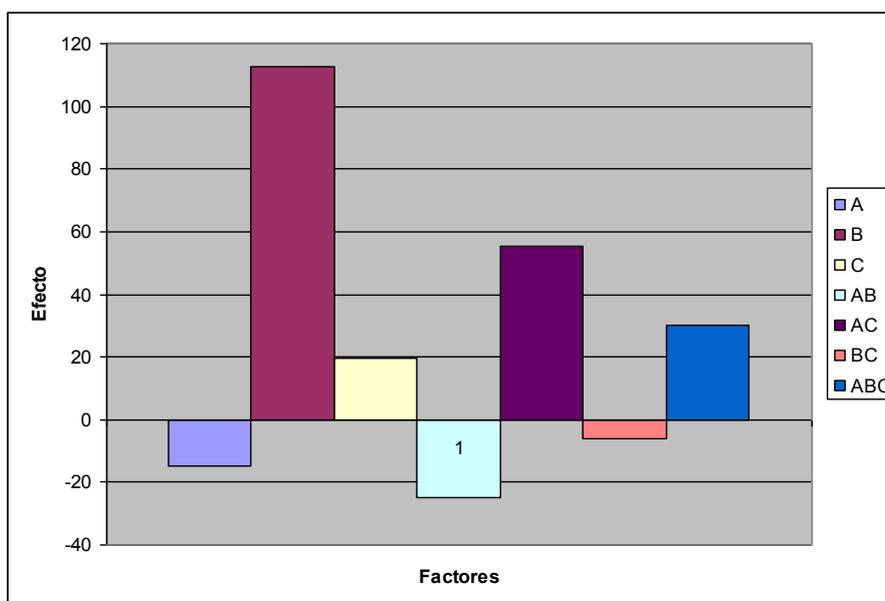


Ilustración 27: Grafico de los efectos de los factores

A continuación se sacó la contribución básica de cada factor (el “efecto” tiene en cuenta las interacciones entre factores, mientras que la “contribución básica” es lo que esperabas obtener sin tener en cuenta estas interacciones) mediante unos cálculos con la siguiente tabla de Excel.

	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
Efecto	-14,75	112,75	19,75	-24,75	55,25	-6,25	30,25
Operaciones:	-45	82,5	-10,5	-55	25	-36,5	
		119	26				
	-70		-35,5				
	-15	174					
Contribucion basica	-15	174	-35,5	-55	25	-36,5	30,25

Por lo tanto, una vez vistos los resultados de los efectos y contribuciones básicas podemos deducir que en este DOE el Factor B, es el que más relevancia tiene (tanto teniendo en cuenta las interacciones como sin tenerlas en cuenta), por lo que para optimizar el resultado tendremos que controlar este factor, siendo los demás menos relevantes.

Para saber cuales son los valores óptimos de los factores se utilizó un software estadístico llamado “Minitab”. Este software calcula el efecto de los factores de forma automática metiendo los resultados obtenidos en los experimentos. Pero la ventaja principal que tiene es que te calcula automáticamente la función de regresión que relaciona el resultado con los valores de los factores y combinación de factores. En este caso, el resultado es la vida de la herramienta y cambia según el valor que le das a cada factor. Una vez obtenida la función de regresión, tiene la opción de sacar los valores óptimos para maximizar o minimizar el resultado. Por lo tanto, se sacaron los valores óptimos de los tres factores para que la vida de la herramienta fuera el máximo.

Con todo esto, en la siguiente tabla se ve como quedaron los parámetros geométricos de la geometría final:

DATOS	FRESA FINAL
Diámetro (mm)	16
Angulo de hélice (°)	43,6
Longitud de corte (mm)	50
Profundidad del Canal (mm)	2,3
Angulo de desprendimiento del canal (mm)	12,3
Primer ángulo de incidencia en el diámetro (°)	12,1
Segundo ángulo de incidencia en el diámetro (°)	20
Primer ángulo de incidencia en el frente (°)	5
Segundo ángulo de incidencia en el frente (°)	17
Ancho de la primera faceta en el diámetro (mm)	0,7
Ancho de la primera faceta en el frente (mm)	1,5
Ángulo del chaflán (°)	45

Tabla 7: datos de la geometría final

Por último, se fabricó una fresa con estas características y se puso a mecanizar un taco de titanio para ver la duración. La herramienta duro unos 400 minutos aproximadamente. Con lo cual, era la herramienta fabricada que más tiempo duro mecanizando. Y a partir de entonces se fabricaran con esa geometría para usarlas con las piezas de producción.

7. ASPECTOS ECONÓMICOS

A continuación se explica el presupuesto que se necesita para realizar el trabajo.

PERSONAL

En este apartado entra el coste de los trabajadores que han participado en el trabajo. Son costes aproximados dado que se en cada empresa puede variar lo que cobra cada trabajador. Para esto se multiplican las horas que han trabajado por el coste por hora de cada uno.

PERSONAL	Coste por hora (€/h)	Horas dedicadas al TFM (h)	Coste total (€)
Alumno: Antxon Gabiola	25	625	15625
Tutor de empresa: Ruben Gonzalez	50	10	500
		TOTAL	16125

Tabla 8: coste del personal

MÁQUINAS

Como utilizar máquina supone un gasto de electricidad y se disminuye su vida útil debido al uso, también hay que contar esto. Aquí se suma los costes que supone utilizar cada máquina y para esto multiplican las horas que han sido utilizadas en cada máquina su por la hora maquina.

MÁQUINAS	Coste hora máquina (€/h)	Horas dedicadas al TFM (h)	Coste total (€)
Centro de mecanizado Mitsui Seiki	40	1000	1040
Afiladora Walter	30	300	330
Medidor de harremientas Zoller	10	5	15
		TOTAL	1385

Tabla 9: coste de máquinas

INVERSIONES

Aquí se cuentan los gastos que supone utilizar los distintos activos fijos. A pesar de utilizarlos para este trabajo, se pueden utilizar para otros que no tengan nada que ver con este. Por lo tanto, hay que contar la pérdida de valor que han tenido al ser utilizados en este trabajo.

INVERSIONES	Coste inicial (€)	Vida útil (h)	Horas dedicadas al TFM (h)	Amortización (€)
Ordenador	500	43800	625	7,134703196
Licencia NX	30000	17520	300	513,6986301
Licencia Microsoft Office	100	17520	500	2,853881279
			TOTAL	523,6872146

Tabla 10: inversiones

Para calcular la amortización se utiliza la siguiente fórmula:

Amortización = $(A/B) * C$, donde

A: Coste inicial

B: Vida útil

C: Horas que se han dedicado a este trabajo utilizándolas

GASTOS

Dentro de los gastos se cuentan las cosas que se utilizan para el trabajo, pero que luego no tienen utilidad en otros.

Gastos	Coste (€)
Material de oficina	10
Tacos de titanio	6000
Barras de metal duro	300
TOTAL	6310

Tabla 11: gastos

PRESUPUESTO TOTAL

Para sacar el presupuesto total se suma todo lo anterior:

Concepto	Coste (€)
Personal	16125
Máquinas	1385
Inversiones	523,687215
Gastos	6310
TOTAL	24343,6872

Tabla 12: presupuesto total

8. CONCLUSIONES

El objetivo principal de este trabajo era conseguir fabricar una herramienta con la geometría adecuada para hacer operaciones de desbaste en Ti6Al4V. Pero a la hora de mecanizar, en vez de hacerlo de una forma convencional tiene que seguir un patrón de corte que es el fresado trocoidal. Y después de observar los resultados obtenidos, se puede decir que se ha conseguido cumplir con los objetivos en líneas generales puesto que se ha conseguido una geometría adecuada para hacer este tipo de mecanizados.

Para el desarrollo del trabajo se han seguido distintos pasos y de cada uno de ellos se han sacado distintas conclusiones. Digamos que el trabajo ha tenido tres apartados principales que son los que se han llamado como TEST en el diagrama de flujo donde se explica la metodología que se ha utilizado. Y de estos tres TEST se han sacado unas conclusiones que se explican en los siguientes párrafos.

El primer TEST ha sido el de elegir una fresa que los fabricantes de herramientas ofrecen para este tipo de mecanizado. Para ello se han probado distintas fresas y se ha elegido el que mejor comportamiento ha tenido, o en este caso, el que más rentable salía. Al hacer estas pruebas, la principal conclusión que se saca es que el todavía no todos los fabricantes han sido capaces de lograr una fresa que funcione bien en mecanizado trocoidal. Esto es normal puesto que esta manera de mecanizar es relativamente nueva y todavía no es algo que se ha estandarizado, y por lo tanto, aún no se utiliza en muchos sitios. Pero viendo las herramientas que han funcionado bien, se puede decir que comparado con la manera convencional de desbastar los tiempos de mecanizado bajan mucho y las herramientas tienen más vida útil puesto que el desgaste es menor. Por esto, merece la pena seguir investigando y haciendo pruebas con el fresado trocoidal porque una vez que se consiga mecanizar de este modo y sin tener problemas, se ahorrará mucho tiempo de mecanizado y se gastará menos dinero en herramientas. Esto significa que la empresa ganará más dinero porque cada vez se mecaniza más titanio y de esta manera aumenta la producción de piezas puesto que se tarda menos en mecanizar.

El segundo TEST ha sido el de sacar una geometría de una herramienta

basándose en la del fabricante que se ha elegido anteriormente. Y una vez sacados todos los datos posibles, fabricar una fresa y probarlo mecanizando un taco de titanio. Hay que decir que en la empresa nunca se hizo algo así y, por eso, al principio no se sabía muy bien cuantos datos coger ni como cogerlos. Así, se tuvieron que hacer pruebas cada vez que se conseguían sacar nuevos datos de la fresa del fabricante. Pero aun así, se consiguió dar con una geometría adecuada bastante rápido, concretamente con la segunda fresa que se fabricó. Esta fresa se comportó muy similar a la del fabricante y esto es bastante sorprendente puesto que los fabricantes invierten mucho tiempo en crear nuevas geometrías de herramienta y aquí se consiguió la geometría relativamente rápido. Por esto, se puede decir que los métodos utilizados para medir la geometría de la herramienta son bastante eficaces. Por lo tanto, el procedimiento de medición que se ha utilizado para esta herramienta también serviría para otra distinta. Así, se podrían coger las geometrías de las fresas de los fabricantes y fabricarlas en la propia empresa para obtener una herramienta similar.

El tercer y último TEST ha sido el de optimizar la geometría obtenida anteriormente para que la herramienta durase más. Para esto se utilizó el método de diseño de experimentos y se fabricaron ocho herramientas distintas para que con cada una se hiciera un ensayo de y ver lo que duraba. Como resultado se obtuvo una geometría de herramienta que funcionó muy bien y se tomó esta geometría como la definitiva. La conclusión que se saca de este apartado es que el diseño de experimentos funciona bien, pero para hacer los experimentos se necesita gastar bastante material y tiempo al hacer los ensayos (o en otras palabras mucho dinero). Por lo tanto, se puede decir que es un método que consigue mejorar la geometría de la herramienta, pero que si esa herramienta no es una que se utilice mucho no sale rentable mejorarlo de este modo. Esto es porque la mejora que se obtiene no es tan alta como se espera después de invertirle tanto tiempo. La fresa duro mucho, pero no marcaba mucha diferencia comparando con la fresa que se fabricó en el segundo TEST. Pero como esta fresa se utilizará mucho en el futuro, en este caso merece la pena haber optimizado la herramienta.

Resumiendo, la metodología utilizada para el desarrollo del trabajo ha sido buena. Se han conseguido los objetivos, por lo tanto, se puede decir el procedimiento utilizado se puede usar para otras herramientas. Pero siempre teniendo en cuenta si merece la pena, puesto que si es una herramienta a la que no se le da mucho uso no vale la pena hacer todo el proceso.

9. BIBLIOGRAFÍA

Libros

- [1] Tecnología Mecánica. Departamento de ingeniería mecánica de la escuela técnica superior de ingeniería de Bilbao
- [2] Procesos Abrasivos. Jose Antonio Sanchez Galíndez. Aula de Maquina Herramienta
- [3] Dormer. Technical Handbook
- [4] Helical. Machining Guidebook
- [5] Introducción de Diseño de experimentos. Coceptos basicos sobre DOE. Universidad de Mondragon

Referencias web

- [1] <http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos>
- [2] <http://www.metalmecanica.com/temas/La-herramienta-apropiada-para-el-mecanizado-de-titanio+7033365>
- [3] http://www.sandvik.coromant.com/es-es/knowledge/milling/application_overview/holes_and_cavities/slicing_methods/pages/default.aspx
- [4] <http://www.decomag.ch/pdf/2009/tornos-dmag-200901048-rpv-titan-material-es.pdf>
- [5] <http://www.demaquinasyherramientas.com/mecanizado/que-es-el-metal-duro>
- [6] <http://www.elferherramientas.com/es/fabricacion.asp>
- [8] <http://www.walter-tools.com/en-gb/pages/default.aspx>

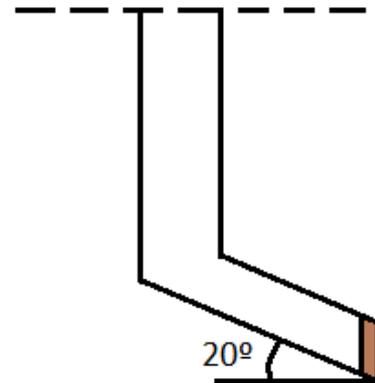
ANEXO I

A continuación se muestran que tipos de muela se utilizan para la fabricación y afilado de muelas. Se muestran la forma que tienen y su nombre según la norma FEPA. También aparece para qué tipo de operaciones se utiliza cada uno.

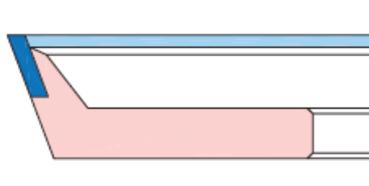
11V9

Operaciones:

- Exteriores (facetas) → diámetro y frente
- Chaflán
- Afilado de facetas de broca
- Destalonados en fresas de bola y fresas toricas



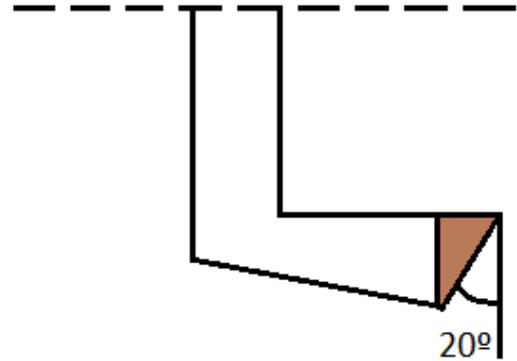
11V9



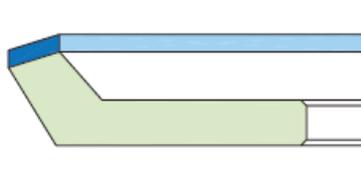
11V5

Operaciones:

- Punta de fresa de bola
- Radio de esquina
- Exteriores (facetas) en fresas de bola y fresas toricas



11V5

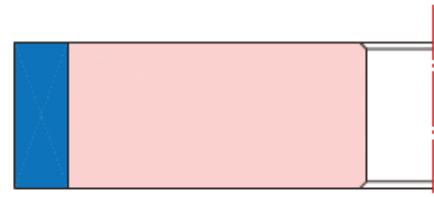


1A1

Operaciones:

- Fabricación de canales
- Desahogo de fresas de dos dientes
- Desahogo de brocas

1A1

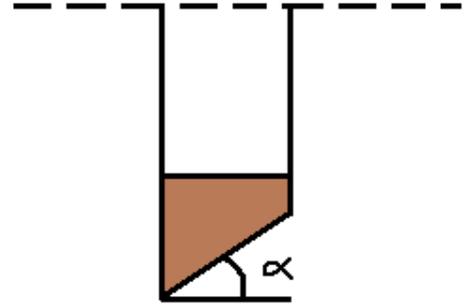


1V1

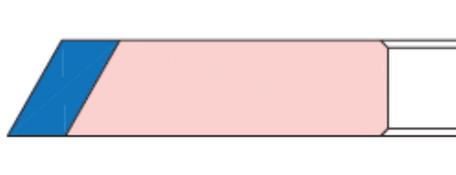
Operaciones:

$\alpha = 45^\circ \rightarrow$ Desahogos de fresas de bola

α con pocos grados \rightarrow Fabricación de canales



1V1

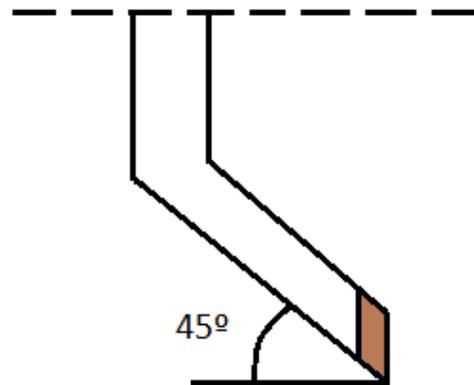


12V9

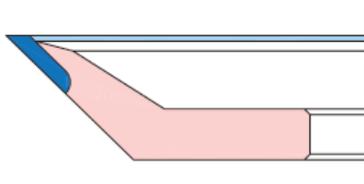
Operaciones:

-Desahogo de fresas

-Reafilado de canales



12V9

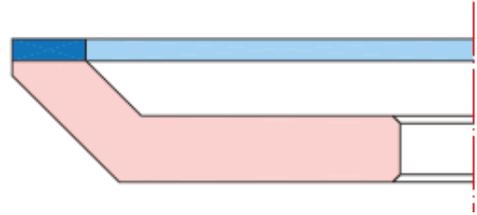


12A2

Operaciones:

-Punta estándar de brocas

12A2



ANEXO II

A continuación vamos a listar las diferentes herramientas de los fabricantes que se han probado sus datos geométricos y las imágenes de los filos después de llegar al final de su vida útil. Las condiciones de corte de cada uno están en la tabla 3

	DIÁMETRO	LONG.TOTAL	VOLADIZO	REBAJE	LONG. CORTE	Nº DIENTES	RADIO/CHAFLAN	ANG. HELICE
FABRICANTE 1	16	108	54	55	48	5	0,3	41º-42º
FABRICANTE 2	16	115	42	67	50	4	4	40
FABRICANTE 3	16	117	43	67	49	4	4	40
FABRICANTE 4	16	92	44	40	32	5	0,2x45º	38º42º
FABRICANTE 5	16	92	44	43	32	4	0,2	45º VARIABLE
FABRICANTE 6	16	92	44	42	36	5	0,3	38ºVARIABLE
FABRICANTE 7	16	92	44	-	32	4	0,2x45º	45ºVARIABLE
FABRICANTE 8	16	128	80	75	64	5	0,2x45º	38º42º
FABRICANTE 9	16	108	60	55	48	5	0,3	45ºVARIABLE

Tabla 13: datos geométricos de las fresas de los fabricantes.

En las siguientes imágenes se ven las fotos de los distintos fabricantes. Hay que decir que no se han podido conseguir todas las fotos de todos los fabricantes.

Estas son las imágenes de la fresa del fabricante 1 después de llegar al final de su vida útil:

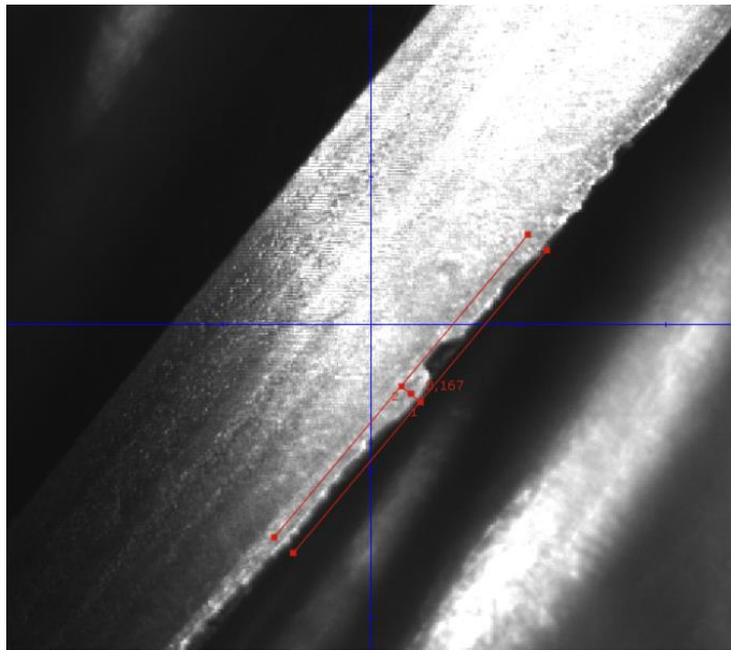


Ilustración 28: filo de fresa del fabricante 1

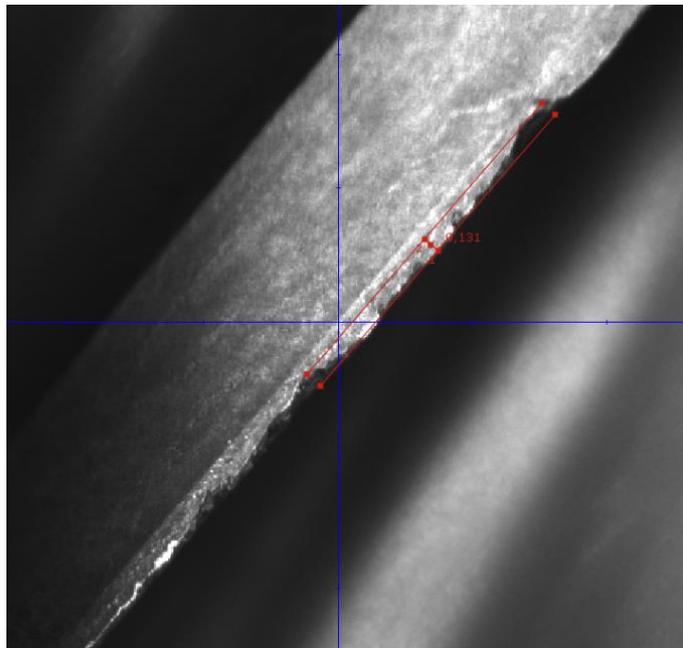


Ilustración 29: filo de fresa del fabricante 1

Estas son las imágenes de la fresa del fabricante 2 después de llegar al final de su vida útil:

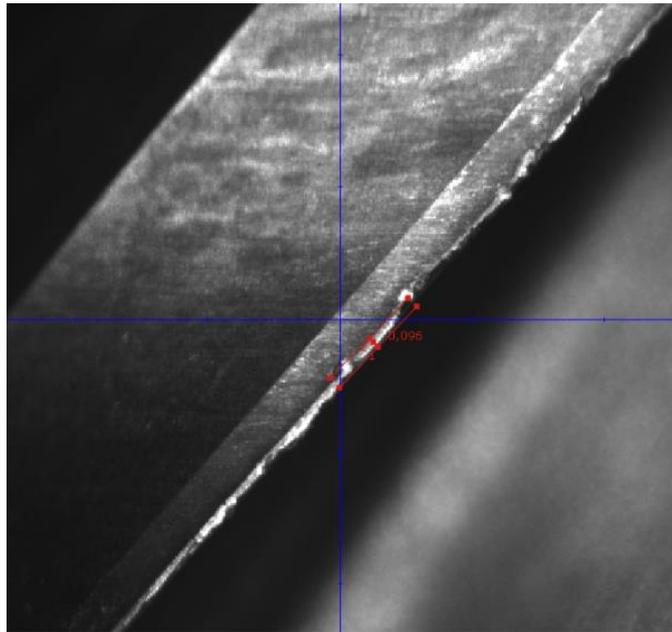


Ilustración 30: filo de fresa del fabricante 2

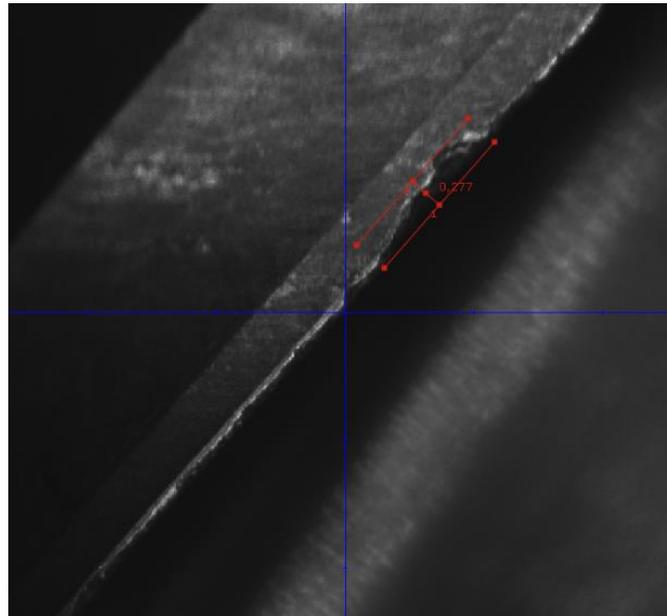


Ilustración 31: filo de fresa del fabricante 2

Estas son las imágenes de la fresa del fabricante 5 después de llegar al final de su vida útil:

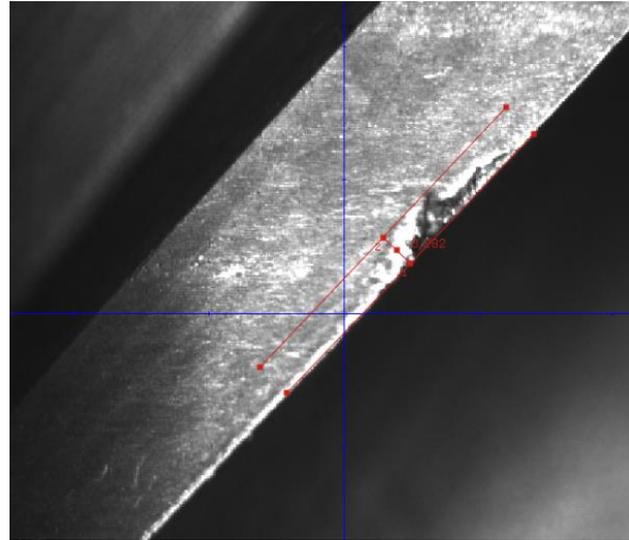


Ilustración 32: filo de fresa del fabricante 5

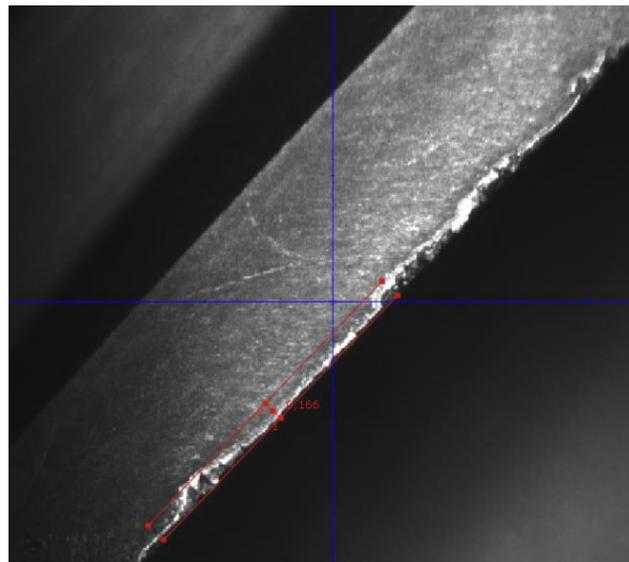


Ilustración 33: filo de fresa del fabricante 5

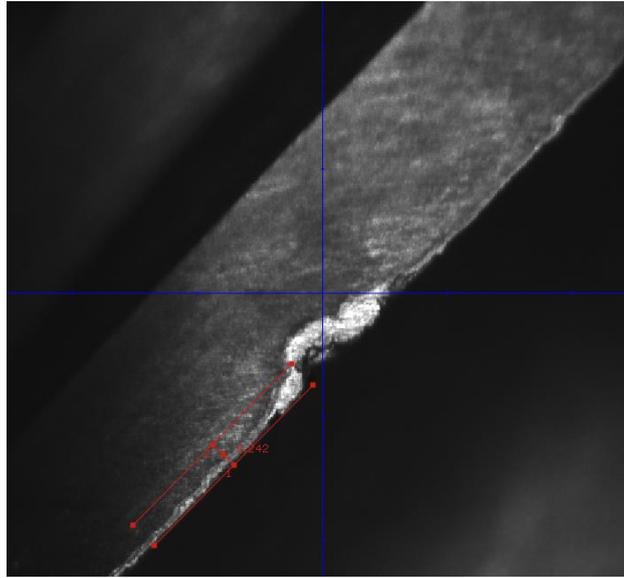


Ilustración 34: filo de fresa del fabricante 5

Estas son las imágenes de la fresa del fabricante 6 después de llegar al final de su vida útil:

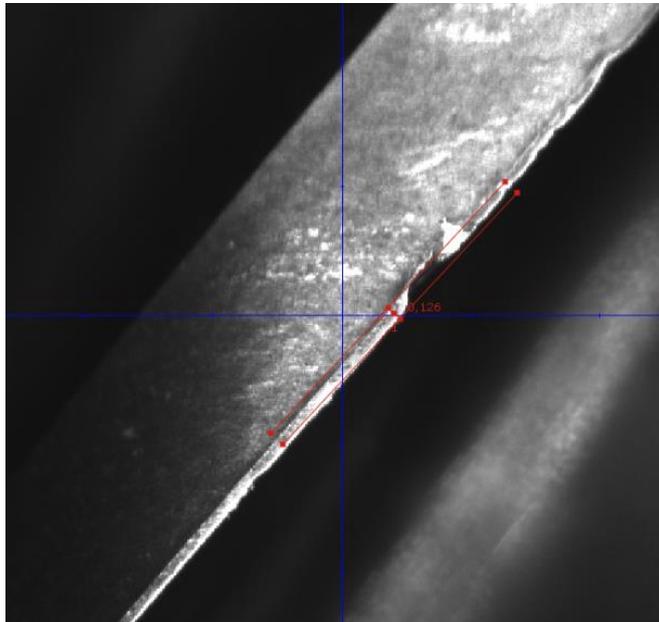


Ilustración 35: filo de fresa del fabricante 6

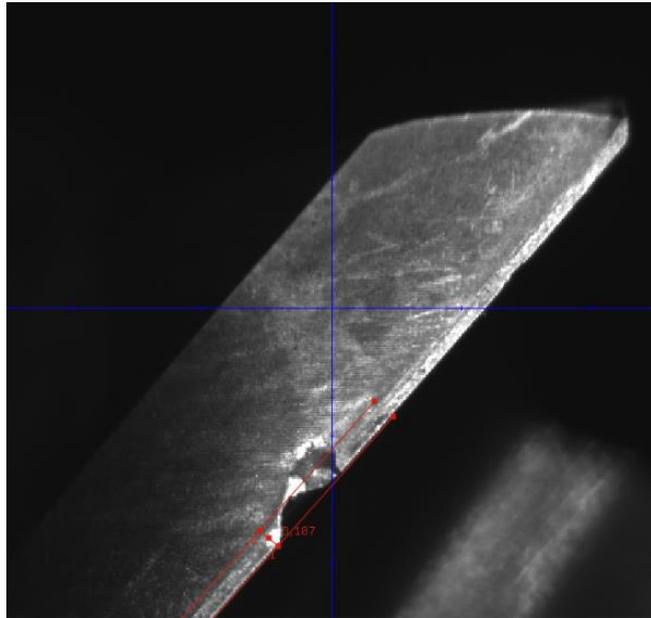


Ilustración 36: filo de fresa del fabricante 6