



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

EFFECTOS DE LOS PARÁMETROS DE MANUFACTURA EN LA RESISTENCIA A LA FATIGA DE UNA ALEACIÓN Ti-6Al-4V

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

CAMILO SOTO DE AMESTI

PROFESOR GUÍA:
RODRIGO PALMA HILLERNS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
AQUILES SEPÚLVEDA OSSES
EDELMIRO VARELA IZARNOTEGUI

Este trabajo ha sido financiado parcialmente por la Universidad de Chile y por el Advanced Manufacturing Research Centre with Boeing, The University of Sheffield.

SANTIAGO DE CHILE
2016

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL

TÍTULO DE: Ingeniero Civil Mecánico

POR: Camilo Soto de Amesti

FECHA: 01/09/2016

PROFESOR GUIA: Rodrigo Palma Hillerns

EFFECTOS DE LOS PARÁMETROS DE MANUFACTURA EN LA RESISTENCIA A LA FATIGA DE UNA ALEACIÓN Ti-6Al-4V

Este estudio se realizó en el Centro Avanzado de Manufactura [AMRC], Universidad de Sheffield con Boeing, Reino Unido, dentro de departamento Fábrica del Futuro (FoF), que busca generar estudios de avanzada en la manufactura de materiales de uso aeroespacial. El objetivo de este trabajo fue estudiar la influencia que presentan los parámetros de corte en torno sobre la vida a la fatiga en una muestra de Ti-6Al-4V, mediante la observación de la rugosidad superficial obtenida.

Inicialmente se establece la base teórica que modela el fenómeno de fatiga y, paralelamente se estudian las variables de corte de mayor incidencia en la integridad superficial de una operación de torno. Se escogen las variables velocidad de corte, profundidad de corte, avance y estado de la herramienta como las variables manipuladas del experimento. Se trabajó con un diseño factorial fraccionado de ocho niveles con doble centro, lo cual se traduce en doce especificaciones centradas en 100 [m/s], 0,3 [mm] y 0,2 [mm/rev] respectivamente para cada variable. El tipo de estudio de fatiga escogido corresponde a un ensayo axial con $R=0,1$ y frecuencia de 10 [Hz], controlado en fuerza y probeta de sección transversal cuadrada.

La manufactura necesaria para obtener mediante una operación de torno, las probetas de fatiga, se genera principalmente mediante el doble refrentado de un disco con el perfil de la norma ASTM: E606. Mediante electroerosión con hilo se cortan radialmente estas probetas, logrando que para las doce especificaciones del diseño experimental, se cuente con cuatro probetas por cada una.

Las mediciones de rugosidad superficial mediante un método de contacto con rugosímetro Mitutoyo y un método óptico con el uso del microscopio confocal Alicona, se observa una clara influencia del avance como variable principal en este parámetro. La velocidad de corte pareciera incidir, pero con una menor influencia evidente. Estos dos métodos presentaron diferencias entre ellos, pero comparten datos dentro de cierto rango estadístico, dando cuenta de la variabilidad del parámetro medido, dependiendo del método escogido y la variabilidad intrínseca del parámetro.

La vida a la fatiga aproximada inicial se establece en los 10^4 ciclos. Mediante criterios de fatiga Gerber y Sodeberg, se establece una carga máxima nominal de 40 [kN]. Se obtienen resultados de vida a la fatiga en torno a los $1,5 \cdot 10^4$ ciclos. Seguidamente se aumenta la carga a 43 [kN], disminuyendo el número de ciclos. Con la unión de ambos resultados, se obtiene un gráfico SN que permite visualizar el comportamiento de fatiga de cada especificación. Al realizar una ampliación en rango de interés e interpolaciones a niveles de esfuerzo común, se diferencian las especificaciones de acuerdo a su avance y rugosidad, presentando una mayor influencia de la rugosidad en las zonas de bajo número de ciclo y una mayor heterogeneidad en mayores números de ciclos. Para mayores esfuerzos la rugosidad disminuye el número de ciclos esperado. Al disminuir la carga, aumenta el número de ciclos esperado y la influencia de la rugosidad tiende a atenuarse.

Tabla de Contenido

1	Introducción	1
1.1	Antecedentes generales	1
1.2	Objetivos	1
1.2.1	Objetivo general	2
1.2.2	Objetivos específicos	2
1.3	Alcances	2
2	Antecedentes	3
2.1	Definiciones generales de fatiga	3
2.1.1	Factores de modificación al límite de fatiga	5
2.1.2	Aproximaciones de vida a la fatiga	7
2.1.3	Estudios de fatiga y normas relacionadas	9
2.2	Rugosidad superficial	12
2.2.1	Aproximación teórica a la rugosidad superficial	12
2.2.2	Irregularidades superficiales	14
2.3	Operaciones de torno y desgaste de herramienta	15
2.3.1	Parámetros de corte en torno	15
2.3.2	Desgaste de herramienta	16
2.4	Estado del arte y estudios previos	17
2.4.1	Efectos de manufactura en titanio	17
2.4.2	Ensayos de fatiga en función de integridad superficial	18
3	Metodología	19
3.1	Secuencia metodológica	19
3.2	Recursos	20
3.2.1	Recursos no financieros	20
3.2.2	Recursos financieros	21
4	Resultados y análisis	22
4.1	Selección del tipo de ensayo	22

4.1.1	Materia prima.....	22
4.1.2	Geometría de la Probeta.....	23
4.1.3	Proceso de manufactura para conformación de probetas.....	24
4.2	Diseño experimental.....	27
4.2.1	Parámetros de corte y valores medios.....	28
4.2.2	Arreglos Ortogonales.....	30
4.3	Resultados de fabricación.....	31
4.3.1	Desgaste de la herramienta.....	32
4.3.2	Ensayo de tracción.....	35
4.4	Rugosidad superficial.....	36
4.4.1	Perfilómetro de contacto.....	36
4.4.2	Microscopía óptico digital.....	37
4.4.3	Relación con las variables.....	39
4.5	Ensayos de fatiga.....	40
4.5.1	Determinación de cargas.....	40
4.5.2	Numero de ciclos de falla.....	41
4.5.3	Desplazamiento, deformación y endurecimiento.....	43
5	Discusiones.....	45
5.1	Variables de corte e integridad superficial.....	45
5.2	Diseño experimental y fabricación.....	46
5.3	Vida a la fatiga.....	47
6	Conclusiones.....	48
7	Bibliografía.....	49
	ANEXOS.....	51
	A. Desgaste de las herramientas.....	51
	B. Tablas de rugosidad con perfilómetro de contacto.....	66
	C. Gráficos de endurecimiento.....	68

Índice de Figuras

Figura 2.1: a) Representación genérica de un diagrama esfuerzo vida y b) un ciclo alternante de esfuerzos [1].....	3
Figura 2.2: Diagrama de la resistencia a la fatiga en función del límite elástico [1].....	5
Figura 2.3: Diagrama de los criterios de fatiga [1]	8
Figura 2.4: Geometrías de ASTM E606 para ensayo uniaxial [3].....	9
Figura 2.5: Viga rotativa de Moore y las especificaciones para la geometría. [1]	10
Figura 2.6: Flexión a cuatro puntos genérica.....	11
Figura 2.7: Esquemas de montaje para el estudio de fatiga en una viga en voladizo [10]	11
Figura 2.8: Esquema de superficie mecanizada con herramienta elíptica. Adaptado de [3]	12
Figura 2.9: Representación gráfica de diferenciación entre ondulación y rugosidad en una superficie. Adaptado de [4].....	15
Figura 2.10: Esquema de los parámetros de corte en torno. [5]	16
Figura 2.11: Representación genérica de curva de desgaste de herramienta. [6]	17
Figura 3.1: Diagrama de flujo metodológico involucrado. Elaboración propia.	19
Figura 4.1: Barra inicial de Ti-6Al-4V para la fabricación de probetas de fatiga	22
Figura 4.2: Dimensiones nominales de las probetas de fatiga. Elaboración propia	24
Figura 4.3: Diagrama CAD del cilindrado y ranurado de la materia prima. Elaboración propia.	25
Figura 4.4: Imagen del proceso de corte en sierra de banda. Elaboración propia.	25
Figura 4.5: Secuencia de refrentado y generación de cuello en cada disco. Elaboración propia.	26
Figura 4.6: Esquema de corte con electroerosión para la obtención de seis probetas en cada disco. Elaboración propia.	27
Figura 4.7: Insertos utilizados identificando los bordes de ataque y de alivio. Fuente catálogo SECO Tools.	28
Figura 4.8: Gráficos de desgaste de acondicionamiento para insertos desgastados. Elaboración propia.	29
Figura 4.9: Ejemplo de imágenes de desgaste de inserto. En este caso es el inserto WCP-3-Derecho. Elaboración propia.	30
Figura 4.10: Grafico de desgaste de las herramientas. Elaboración propia.	33
Figura 4.11: Desgaste versus tiempo de corte final de las herramientas nuevas y pre-acondicionadas. Elaboración propia	34
Figura 4.12: Imagen de falla de herramienta WCP-5	34
Figura 4.13: Gráficos del ensayo de tracción. Elaboración propia.	35
Figura 4.14: Perfilómetro de contacto Mitutoyo SJ-210 y zonas de medición. Catálogo Mitutoyo y elaboración propia.....	37
Figura 4.15: Grafico de las rugosidades con perfilómetro para cada especificación del diseño experimental. Elaboración propia.	37
Figura 4.16: Comparación de los datos de rugosidad con ámbos métodos y la aproximación teórica. Elaboración propia.	38
Figura 4.17:Gráficos para la respuesta de la rugosidad sobre cada una de las variables de corte. Elaboración propia.	39
Figura 4.18: Referencia del diseño experimental con criterios de fatiga y proyecciones del esfuerzo alternante equivalente. Elaboración propia.	40
Figura 4.19: Gráfico S-N de los ensayos de fatiga, separados por grupos de prueba. Elaboración propia.	41

Figura 4.20: Gráfico general de los resultados de fatiga identificando la especificaciones. Elaboración propia.....	42
Figura 4.21: Gráfico S-N, identificando la especificación y una proyección exponencial. Elaboración propia.....	42
Figura 4.22: Curvas de numero de ciclos en funcion de la rugosidad para distintos niveles de esfuerzo. Elaboración propia	43
Figura 4.23: Gráficos de endurecimiento. Elaboración propia.....	44
Figura 5.1: Esquema del efecto “wiper”. [26]	45

Índice de Tablas

Tabla 2-1: Resumen del factor de modificación de calidad superficial [1]	5
Tabla 2-2: Factores de modificación de confiabilidad para diversos intervalos [1]	7
Tabla 2-3: Resumen de las expresiones para cada criterio de falla. Adaptado de [1]	8
Tabla 2-4: Longitudes de onda de corte para rangos de rugosidad. Adaptado de ISO 4288-96 ..	15
Tabla 2-5: Efectos de los parámetros de torno sobre el material y herramienta. Adaptado [15]..	18
Tabla 4-1: Requerimientos químicos para Ti-6Al-4V. Adaptado de ASTM B265 [11]	23
Tabla 4-2: Requerimientos Mecánicos para Ti-6Al-4V. Adaptado de ASTM B265 [11].....	23
Tabla 4-3: Parámetros de corte y los niveles de variación para cada uno. Elaboración propia....	31
Tabla 4-4: Arreglos ortogonales para diseños de Taguchi L9 y Factorial Fraccionado. Elaboración propia.	31
Tabla 4-5: Resultados para los desgastes de herramientas. Elaboración propia.....	32
Tabla 4-6: Resumen de resultados de rugosidad para cada especificación. Elaboración propia. .	38
Tabla 4-7: Cargas propuestas para cada grupo nominales y las cargas medias obtenidas. Elaboración propia.	41

1 Introducción

El fenómeno de fatiga, un modo de falla ampliamente estudiado en los materiales metálicos, es el producto de cargas de esfuerzos cíclicos que no necesariamente sobrepasan el límite de fluencia del material. En consecuencia, materiales que estén sometidos a cargas repetidas pueden eventualmente sufrir fracturas catastróficas sin señales premonitorias de falla, incluso para cargas relativamente bajas (en comparación con la resistencia última a la tracción o el límite de fluencia). Dado que la fatiga se presenta como un modo de falla contingente a las aplicaciones de ingeniería, surge la posibilidad de estudiar cómo distintos parámetros de conformación pueden favorecer o mitigar este fenómeno. Así, parte de un estudio inicial para comprender estos factores. El presente proyecto aborda cómo los efectos de las operaciones de mecanizado influyen y afectan en la vida de fatiga de una muestra de material específico.

1.1 Antecedentes generales

El marco bajo el cual se realiza el estudio corresponde a una investigación en conjunto entre la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas (FCFM) de la Universidad de Chile y el Centro de Investigación en Manufactura Avanzada (AMRC) de la Universidad de Sheffield, Inglaterra, bajo un memorando de entendimiento firmado entre ambas partes en Junio de 2015.

El departamento del AMRC donde se realizan las actividades es el Factory of the Future (FoF), el cual se compone de un edificio de 6400m² equipado con distintos centros de maquinado y equipos de laboratorio, además de oficinas y salas de reunión. El eje principal de la investigación se enfoca en los procesos de mecanizado y el estado del arte en centros de manufactura. Esto permite que las distintas empresas y compañías afiliadas puedan desarrollar y probar nuevas tecnologías y procesos antes de incluirlos en sus propias fábricas.

Dentro del FoF, el equipo de trabajo donde nace el proyecto es el grupo de Machinability, el cual estudia las características de materiales aeroespaciales de alto rendimiento y herramientas de corte. En este contexto se presenta el estudio interno designado ABG110 – “Machining and Fatigue”, el cual corresponde a un proyecto investigativo, acordado por toda la junta de socios, y de orden genérico donde, por lo mismo, los resultados se distribuyen a todos los miembros. Los miembros más destacados son Boeing, Rolls Royce, BAE Systems, Mori Seiki, Sandvik y Seco Tools. El proyecto ABG110 tiene asignado un presupuesto de £22.000 y busca caracterizar el comportamiento a la fatiga de una aleación de Ti-6Al-4V frente a distintas condiciones de corte, estudiando el material y las herramientas utilizadas.

1.2 Objetivos

Dado la gran variedad de mecanismos mediante los cuales una fractura de fatiga se puede generar, es indispensable fijar una serie de objetivos que permitan guiar el proyecto. De esta forma se plantea un objetivo general, como también un grupo de objetivos específicos que permiten lograr este propósito fundamental.

1.2.1 Objetivo general

El objetivo general de este proyecto es diseñar y ejecutar un procedimiento experimental para estudiar experimentalmente cómo los parámetros de corte en torno afectan la resistencia a la fatiga en una muestra de Ti-6Al-4V.

1.2.2 Objetivos específicos

En orden a completar y obtener un análisis transversal de lo propuesto, se tienen los siguientes objetivos específicos:

- Identificar las variables de corte que presenten las mayores influencias en la integridad superficial y los mecanismos mediante los cuales estas variables afectan la vida a la fatiga.
- Desarrollar de un diseño experimental que permita, dentro de los márgenes presupuestarios y temporales, ejecutar pruebas de fatiga sobre probetas con distintos parámetros de manufactura.
- Estudiar experimentalmente el efecto de las variables de corte en torno para una aleación de Ti-6Al-4V sobre la rugosidad superficial.
- Estudiar el efecto de la rugosidad superficial sobre la vida a la fatiga de las probetas mecanizadas.

1.3 Alcances

Se encuentran dentro del proyecto la definición de las variables características de un fenómeno de fatiga, como también el análisis de los mecanismos de fatiga disponibles en la literatura. También se engloba en este proyecto el análisis de experiencias previas que expliquen los efectos que la manufactura imparte sobre la integridad superficial para aleaciones de Ti-6Al-4V. Similarmente, se busca revisar la literatura que relacione la integridad superficial con la vida a la fatiga.

En el ámbito experimental, este proyecto propone la realización física de un estudio de fatiga, por lo que la definición de la probeta a ser utilizada y los procesos de manufactura necesarios para obtenerla también caen dentro de los alcances de este estudio. En cuanto a las mediciones posteriores a la conformación de las probetas, se determina que estudios de esfuerzos residuales no se incluyen como un entregable, debido a restricciones presupuestarias y de extensión temporal del proyecto. Sin embargo se incluyen las mediciones de rugosidad superficial con distintos métodos, y sus efectos en los estudios de vida a la fatiga. Respecto al desgaste de la herramienta, solo se presentan los niveles de desgaste posteriores al corte, ya que no se puede interrumpir el corte para analizar la evolución del desgaste. El endurecimiento por deformación cíclica de las probetas se analiza cualitativamente.

2 Antecedentes

Esta sección tiene la finalidad de presentar la base técnica desde el cual se estudia el fenómeno de fatiga y el comportamiento mecánico de materiales. En lo que sigue se presenta un breve resumen de los métodos más comunes de estudio, como también las ecuaciones relevantes que describen los niveles de esfuerzo y la vida a la fatiga estimada. Se establece una aproximación teórica para la medición de rugosidad superficial, en base a la mecánica de la operación de torno. Finalmente se presenta un resumen sobre el estado del arte y algunos estudios previos sobre interdependencia entre la manufactura y la fatiga.

2.1 Definiciones generales de fatiga

Cuando un material experimenta cargas externas se genera en el interior un *estado de esfuerzos* a como resultado de una distribución de dichas cargas. De manera específica, cuando se analizan fallas de fatiga, las cargas impartidas al material son usualmente menores a las críticas de un estado estático, sin embargo, la naturaleza cíclica de estas cargas implica que exista una relación entre el número de ciclos que un material puede resistir y la magnitud de ellas.

En la parte a) de la Figura 2.1 se muestra una representación de la relación existente entre los niveles de esfuerzo y el número de ciclos al cual falla. De este diagrama, es posible identificar distintas zonas. En primera instancia aquella zona limitada hasta los 10^3 ciclos se denomina fatiga de bajo ciclo [1]. Esta zona se caracteriza por la deformación plástica generalizada en toda la pieza y elevados niveles de esfuerzo, usualmente sobre el límite elástico del material.

Para niveles inferiores de esfuerzo, la siguiente zona se denomina fatiga de alto ciclo y se delimita entre los $10^6 - 10^7$ ciclos, donde la deformación plástica es localizada, ubicándose en los concentradores de esfuerzo. Para niveles aun inferiores de esfuerzo, la vida a la fatiga supera los 10^7 ciclos y se denomina vida infinita ya que la generación de una falla por fatiga ha de requerir grandes números de ciclo y tiempo. El nivel de esfuerzo que delimita esta frontera entre la vida finita y la vida infinita se denomina límite de resistencia a la fatiga. Este límite es de gran relevancia al diseñar elementos mecánicos que sean predispuestos a fallas por fatiga.

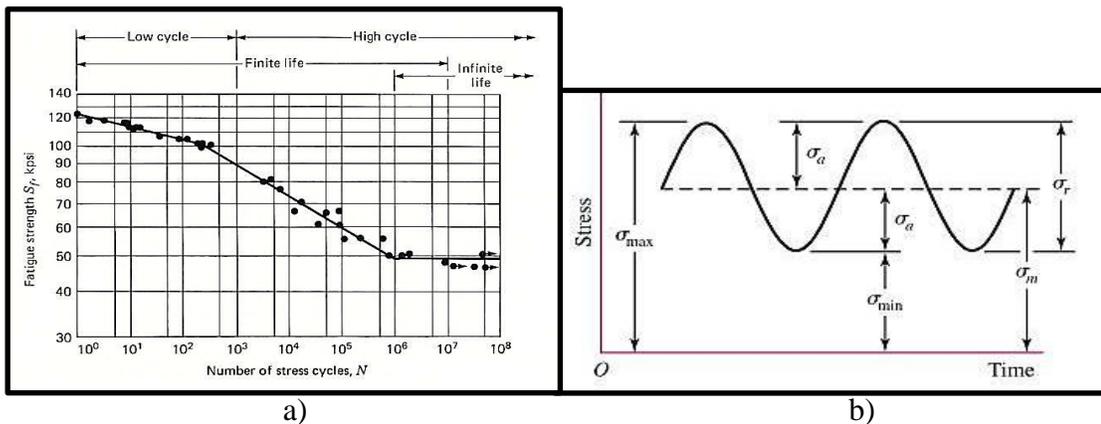


Figura 2.1: a) Representación genérica de un diagrama esfuerzo vida y b) un ciclo alternante de esfuerzos [1].

La naturaleza fluctuante del estado de esfuerzos también se caracteriza por definiciones representativas. La primera aproximación adoptada para el estudio del estado de esfuerzos variable es asumir un patrón sinusoidal en la carga establecida. De esta forma se definen una serie de componentes característicos que describen los límites entre los cuales oscila la carga, ver parte b) de la Figura 2.1. De esta forma se definen los siguientes parámetros:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (2.1)$$

$$\sigma_r = \sigma_{max} - \sigma_{min} \quad (2.2)$$

$$\sigma_a = \left| \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \right| \quad (2.3)$$

donde: σ_m es el esfuerzo medio, $\sigma_{m\acute{a}x}$ el esfuerzo máximo, σ_{min} el esfuerzo mínimo, σ_r el rango de esfuerzo y σ_a la amplitud de esfuerzo.

Dependiendo del carácter tensional o compresivo, el estado alternante puede adoptar distintas denominaciones. Por ejemplo, un *esfuerzo repetido* ocurre cuando $\sigma_{min} = 0$, o alternativamente un *esfuerzo completamente reversible* ocurre si $\sigma_m = 0$.

Independiente de cual caso es el que ocurra, las siguientes definiciones se aplican a todos ellos y facilitan la caracterización del estado. Así, se define la razón de esfuerzos (R) y la razón de amplitud (A) como:

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad (2.4)$$

$$A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} \quad (2.5)$$

La determinación del límite de resistencia a la fatiga tiene una influencia directa y relevante en las aplicaciones ingenieriles de elementos de alto ciclo. Sin embargo, es común que los gráficos esfuerzo vida no estén disponibles para todos los materiales y no exista una documentación de este límite. Es así como surge una primera aproximación, representado en la Figura 2.2, del límite de resistencia a la fatiga como función de la resistencia a la tracción. Se observa que éste se encuentra usualmente entre el 40% y el 60% del límite elástico del material [1].

Tomando en cuenta estas relaciones experimentales y estocásticas entre ambos parámetros, la aproximación inicial para el límite de fatiga se define como:

$$S'_e = \begin{cases} 0.5 \cdot S_{ut} & S_{ut} \leq 1400 \text{ MPa} \\ 700 \text{ MPa} & S_{ut} \geq 1400 \text{ MPa} \end{cases} \quad (2.6)$$

donde S'_e es el límite de resistencia a la fatiga nominal (determinado por viga rotativa) y S_{ut} la resistencia a la tracción del material. Independiente de ser determinado para aleaciones ferrosas, estas expresiones también son, en cierta medida, aplicables para aleaciones de titanio. Por un lado, los límites de resistencia máxima a la tracción de dichas aleaciones se encuentran por bajo de los 1400 [MPa], y por otro, el límite de resistencia a la fatiga se encuentra entre los 529 [MPa] y los 566 [MPa] (para aleaciones de titanio grado 5, Fuente: *AZO Materials Catalogue*) el cual corresponde cercanamente al 50% de un UTS de 1030 [MPa].

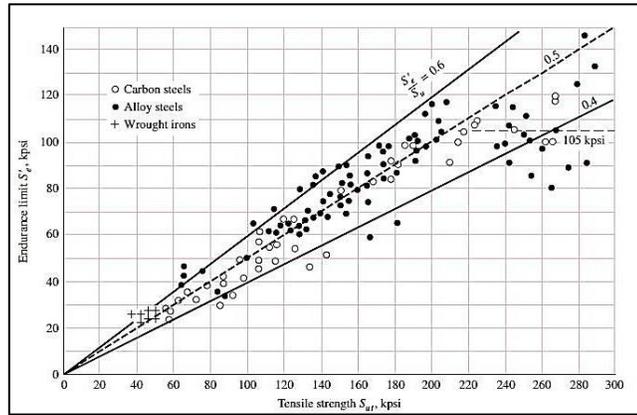


Figura 2.2: Diagrama de la resistencia a la fatiga en función del límite elástico [1]

2.1.1 Factores de modificación al límite de fatiga

Aun teniendo una primera aproximación a este límite, es bien sabido que hay una serie de factores que modifican la resistencia a la fatiga nominal de un material. Estos factores cuantifican los efectos entregados por distintas condiciones presentes en todo objeto maquinado y han sido determinados con el objeto de adaptar la resistencia a la fatiga de productos en servicio. De esta forma se puede expresar el límite de resistencia a la fatiga de una pieza maquinada como:

$$S_e = k_a \cdot k_b \cdot k_c \cdot k_d \cdot k_e \cdot k_f \cdot S'_e = \prod_{i=a}^f k_i \cdot S'_e \quad (2.7)$$

Cada uno de estos factores de modificación, k_i , han sido cuantificados en diversos estudios experimentales y respaldados por métodos estadísticos. Se definen a continuación.

El primer factor de cuenta de la condición superficial del maquinado, donde se acerca a una primera percepción del objetivo del estudio. De esta forma el factor de calidad superficial k_a se expresa como:

$$k_a = a \cdot S_{ut}^b \quad (2.8)$$

donde las constantes a y b se expresan en la Tabla 2-1[1].

Tabla 2-1: Resumen del factor de modificación de calidad superficial [1]

Surface Finish	Factor a		Exponent b
	S_{ut} , kpsi	S_{ut} , MPa	
Ground	1.34	1.58	-0.085
Machined or cold-drawn	2.70	4.51	-0.265
Hot-rolled	14.4	57.7	-0.718
As-forged	39.9	272.	-0.995

From C.J. Noll and C. Lipson, "Allowable Working Stresses," *Society for Experimental Stress Analysis*, vol. 3, no. 2, 1946 p. 29. Reproduced by O.J. Horger (ed.) *Metals Engineering Design ASME Handbook*, McGraw-Hill, New York. Copyright © 1953 by The McGraw-Hill Companies, Inc. Reprinted by permission.

El siguiente factor de modificación corresponde al factor de tamaño k_b y diferencia las cargas axiales, de flexión y torsionales. De ser la carga completamente axial, el tamaño no es relevante y adopta el valor de $k_b = 1$. Para las cargas de torsión y flexión se define como sigue:

$$k_b = \begin{cases} 1.24 \cdot d^{-0.107} & 2.79 \leq d \leq 51 \text{ mm} \\ 1.51 \cdot d^{-0.157} & 51 < d \leq 254 \text{ mm} \end{cases} \quad (2.9)$$

Si se emplean probetas de sección transversal que no sean circulares, es necesario introducir la expresión para el diámetro equivalente [2].

El factor de carga k_c diferencia la forma en que se distribuyen los esfuerzos, así:

$$k_c = \begin{cases} 1 & \text{flexión} \\ 0.85 & \text{axial} \\ 0.59 & \text{torsional} \end{cases} \quad (2.10)$$

Es importante señalar que este factor solamente se puede aplicar cuando una carga se aplica de forma independiente, mientras que para casos de esfuerzos combinados se debe aplicar el esfuerzo de Von Mises.

El factor k_d relaciona la variabilidad que presentan los materiales con los cambios de temperatura dado que, por un lado, bajas temperaturas puede generar transiciones a la zona frágil y, por otro lado, altas temperaturas puede disminuir el límite de fluencia del material. De esta forma, se define el factor de temperatura en función de su límite de fluencia a temperatura ambiente S_{RT} y a la temperatura de servicio del estudio S_T . Por lo tanto, el factor queda definido como:

$$k_d = \frac{S_T}{S_{RT}} \quad (2.11)$$

Debido a que gran cantidad de propiedades mecánicas son determinadas estadísticamente a través de numerosos experimentos, la variabilidad existente en torno a los valores medios obtenidos tiene una influencia directa en la confiabilidad de estos parámetros. Es así como se introduce el factor de confiabilidad k_e con miras de garantizar ciertos intervalos de confiabilidad en la resistencia a la fatiga y se define como sigue:

$$k_e = 1 - 0.08 \cdot z_a \quad (2.12)$$

La Tabla 2-2 presenta algunos intervalos y valores adoptados por el factor de confiabilidad para cada uno de ellos.

Tabla 2-2: Factores de modificación de confiabilidad para diversos intervalos [1]

Confiabilidad, %	Variable de transformación, Z_a	Factor, K_e
50	0	1.000
90	1.288	0.897
95	1.645	0.868
99	2.326	0.814
99.9	3.091	0.753
99.99	3.719	0.702
99.999	4.265	0.659
99.9999	4.753	0.620

El último factor de modificación, k_f , relaciona distintos parámetros externos y los efectos varios que puedan alterar en el límite de resistencia a la fatiga. En este factor, el propósito principal del estudio también se aborda en cierto grado, ya que es aquí donde se cuantifican los efectos que pueden tener los esfuerzos residuales y orientación microestructural. Usualmente hay limitada información sobre este factor y es ampliamente descartado para cálculos y análisis.

2.1.2 Aproximaciones de vida a la fatiga

Habiendo definido y establecido los estados de esfuerzo y aquellos límites relevantes para la vida a la fatiga, en este apartado se presenta aquellas leyes que relacionan el número de ciclos a ser soportado para cierto estado de esfuerzos. Volviendo a la definición anterior de fatiga de bajo ciclo, limitado hasta los 10^3 ciclos, la ley que relaciona este comportamiento se denomina *Ley de Coffin-Manson* y se caracteriza por la teoría de deformación-vida [1] la cual contabiliza como variable directa la deformación plástica sufrida por la probeta. En la siguiente zona de fatiga de alto ciclo, la ley que regula el número de ciclos se llama *Ley de Basquin* y tiene como sustrato la teoría de esfuerzo-vida [1], correlacionando el nivel de esfuerzo al número de ciclos a ser resistidos. Las expresiones para ambos se presentan como las ecuaciones (2.13) y (2.14) respectivamente:

$$\Delta\epsilon_{pl} \cdot N_f^a = C_1 \quad (2.13)$$

$$\Delta\sigma_f \cdot N_f^b = C_2 \quad (2.14)$$

Las constantes a , b , C_1 y C_2 son particulares para cada material, sin embargo para la ley de Basquin es posible definir los factores de la siguiente forma:

$$C_2 = \frac{(f \cdot S_{UT})^2}{S_e} \quad (2.15)$$

$$b = \frac{1}{3} \log\left(\frac{f \cdot S_{UT}}{S_e}\right) \quad (2.16)$$

Aun utilizando esta definición, la determinación real del número de ciclos viene de la utilización de un criterio de falla la fatiga, como también de un correcto empleo de los esfuerzos alternantes y medios en la caracterización del estado interno. Los criterios más comunes que relacionan estos parámetros del estado de esfuerzo y aproximan el número de ciclos son: Sodeberg, Goodman modificado, Gerber, ASME-elíptica y Langer de fluencia estática.

En la Figura 2.3 se observa el diagrama que grafica los distintos criterios de falla, donde los ejes corresponden a los esfuerzos medios (abscisa) y esfuerzos alternantes (ordenada).

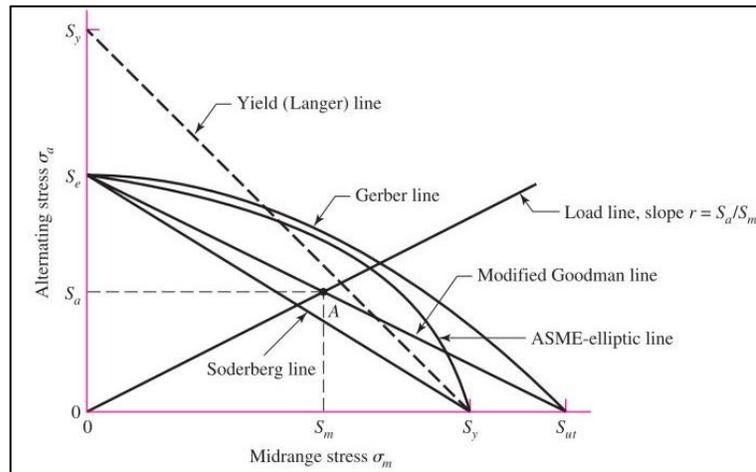


Figura 2.3: Diagrama de los criterios de fatiga [1]

Si el estado de esfuerzos cae por fuera de estas curvas, para cada criterio se dice que el sistema corre el riesgo de falla. Por ende, es directo que hay algunos criterios más conservadores que otros y que no necesariamente genera una relación lineal entre ambos parámetros del estado de esfuerzos.

En la Tabla 2-3 se enlistan las expresiones de los niveles de esfuerzo para cada criterio de falla por fatiga.

Tabla 2-3: Resumen de las expresiones para cada criterio de falla. Adaptado de [1]

Criterio de Falla	Expresión	
Sodeberg	$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_y} = \frac{1}{n}$	(2.17)
Mod-Goodman	$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}} = \frac{1}{n}$	(2.18)
Gerber	$\frac{n \cdot \sigma_a}{S_e} + \left(\frac{n \cdot \sigma_m}{S_{ut}}\right)^2 = 1$	(2.19)
ASME-Elliptic	$\left(\frac{n \cdot \sigma_a}{S_e}\right)^2 + \left(\frac{n \cdot \sigma_m}{S_y}\right)^2 = 1$	(2.20)
Langer static yield	$\sigma_a + \sigma_m = \frac{S_y}{n}$	(2.21)

Desde estas expresiones se obtiene una buena base para adoptar el criterio que corresponda y poder establecer una estimación adecuada del número de ciclos que a los que una probeta se puede someter para cierto estado de esfuerzos. Lo que sigue corresponde a un análisis amplio de los distintos métodos experimentales para los estudios de fatiga.

2.1.3 Estudios de fatiga y normas relacionadas

En este apartado se presentan los métodos más usuales para someter un material a esfuerzos cíclicos hasta a una falla por fatiga, con la correcta instrumentación para el número de ciclos y las fuerzas externas que aplican sobre ellos. Se secciona este apartado a través de las formas de aplicar las cargas: axial, a flexión y torsional.

- **Cargas axiales**

Las cargas axiales corresponden a tensiones y compresiones puras en el eje principal de la probeta a ser estudiada. En la forma estática, el límite elástico, módulo de Young y la resistencia máxima a la tracción se mide con este tipo de esfuerzo, por lo tanto, se presenta como una manera directa y simple, de medir la respuesta de un material a estados de tensión y compresión.

El primer método axial para analizar el fenómeno de fatiga corresponde a un ensayo uniaxial, el cual es abordado por la norma ASTM E606 [7], la cual especifica las geometrías a ser utilizadas y las distintas variaciones existentes al estudio, dependiendo de las aplicaciones que se quieran estudiar. Esta norma no aborda los efectos externos que puedan existir en el ambiente experimental, asumiendo una correcta documentación de las variables ambientales expuestas para asegurar la repetibilidad y evitar distorsiones geométricas en la probeta.

En la Figura 2.4 se muestran los aspectos geométricos que gobiernan la fabricación de estas probetas, dando cuenta de las dimensiones normalizadas al espesor. Existen las variaciones de área transversal para probetas circulares o cuadradas. También hay una variación en la forma de la cintura de la probeta, con unas de sección útil recta o con una forma de “reloj de arena” con un radio constante en la zona central.

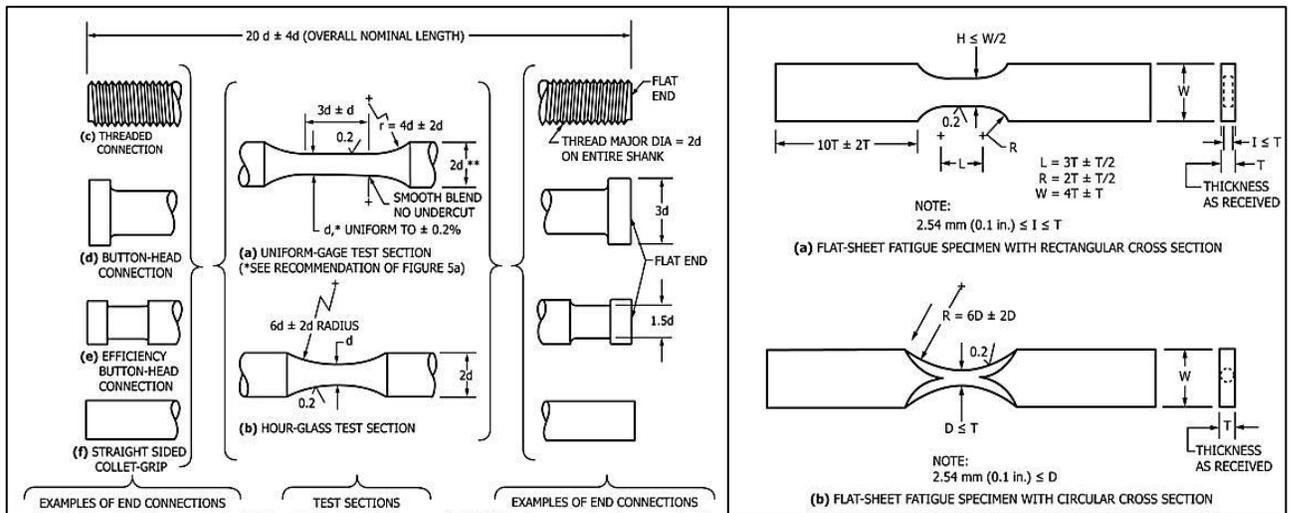


Figura 2.4: Geometrías de ASTM E606 para ensayo uniaxial [3]

Un segundo método que se puede realizar en cargas axiales corresponde a un estudio de crecimiento de grieta, el cual se aborda por la norma ASTM E647 [8]. Esta norma tiene por finalidad estudiar los efectos de concentración de esfuerzos en una entalla prefabricada y en consecuencia determinar el crecimiento de la grieta a través de cada ciclo. Este estudio permite caracterizar la resistencia del

material a una extensión de grieta estable, finalmente arrojando resultados para la tasa de crecimiento de grietas en función del concentrador de esfuerzo en la punta de la grieta.

- **Cargas de flexión**

Este tipo de carga imparte en el material un momento interno cíclico que distribuye la carga centrado en el eje neutro de la probeta. Los valores y magnitudes de este momento de flexión dependen de las condiciones de empotramiento de los extremos libre, como también del área transversal. Este tipo de carga es común en elementos estructurales y presenta una serie de alternativas para los métodos experimentales. Históricamente este tipo de cargas ha sido empleado en la determinación del límite de resistencia a la fatiga, mediante un ensayo de viga rotativa de Moore. Aun así, se emplean comúnmente dos métodos: viga rotativa y flexión de cuatro o tres puntos.

El primer método de viga rotativa o ensayo de Moore, consiste en una probeta cilíndrica la cual se somete a un momento flexor y a la vez a una rotación completa y cíclica sobre el eje mayor, ver Figura 2.5. El método implica que la probeta se someta a un momento flexor constante en el centro, distribuyendo los esfuerzos máximos en la superficie de la probeta, los cuales se amplifican en función del menor diámetro existente. La rotación constante de la viga genera que los esfuerzos máximos ocurran a través de toda la superficie externa resultando en un perfil sinusoidal. Al transmitirse por toda la superficie, se asegura que la zona más débil sea la precursora de la falla y arroja usualmente menores números de ciclos que otros métodos [9].

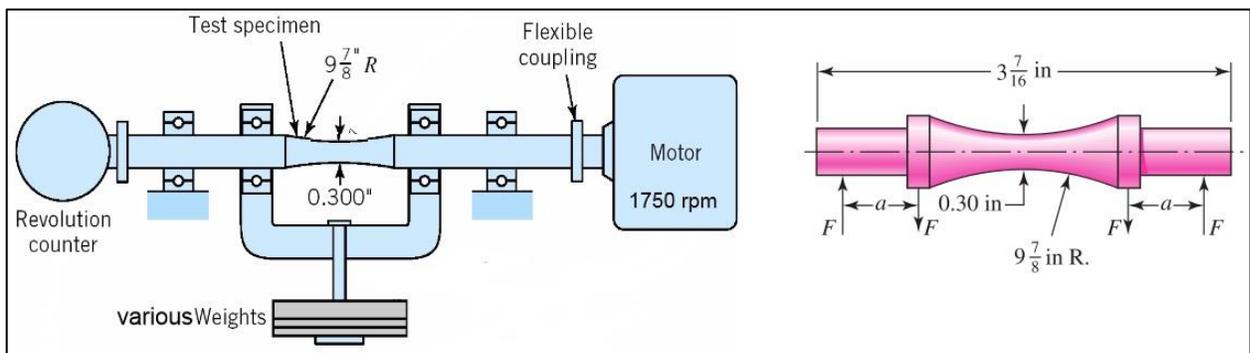


Figura 2.5: Viga rotativa de Moore y las especificaciones para la geometría. [1]

El método de flexión en cuatro puntos y se caracteriza por contar con una probeta de base plana, la cual se carga con un momento interno alternante. En este caso no existe la condición de rotación y las fuerzas se transmiten directamente por el sistema de fijación de la probeta. La probeta debe ser plan en dos de sus caras para permitir una carga adecuada, pero permite variabilidad en las dimensiones generales, ver Figura 2.6.

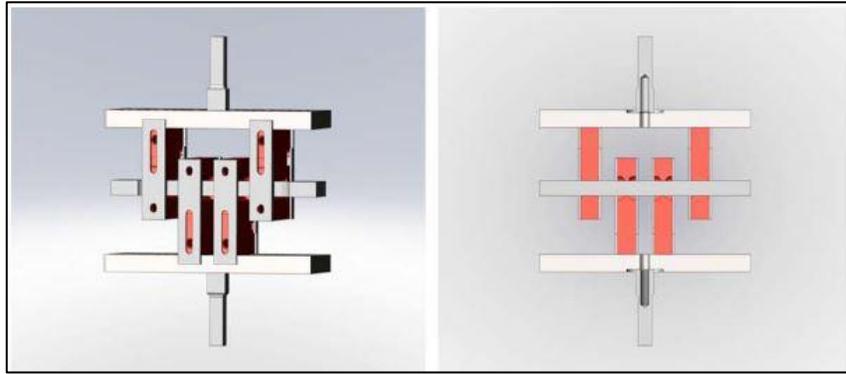


Figura 2.6: Flexión a cuatro puntos genérica.

La fijación en este tipo de prueba induce un momento de flexión en un puro eje, lo cual puede ser útil ya que probetas con área transversal variable puede ser empleada, como los son muchas veces elementos estructurales. Los esfuerzos máximos y mínimos impartidos no necesariamente corresponden a las zonas más débiles del material y por ende puede arrojar valores superiores de vida a la fatiga que en otro tipo de prueba. Existe una variante a este método, el cual contempla la utilización de solo tres puntos, lo cual genera un momento flexor triangular simétrico con valor máximo en el centro.

El último método de carga en flexión corresponde a una viga rotativa en voladizo, dando como resultado un momento lineal decreciente desde la zona de empotramiento hasta el extremo libre, donde se aplica la carga. Existe una serie de adaptaciones a este método para combinar las ventajas del método de Moore y el de flexión a cuatro puntos. Como se observa en la Figura 2.7, se presentan distintas opciones de montaje para este tipo de prueba.

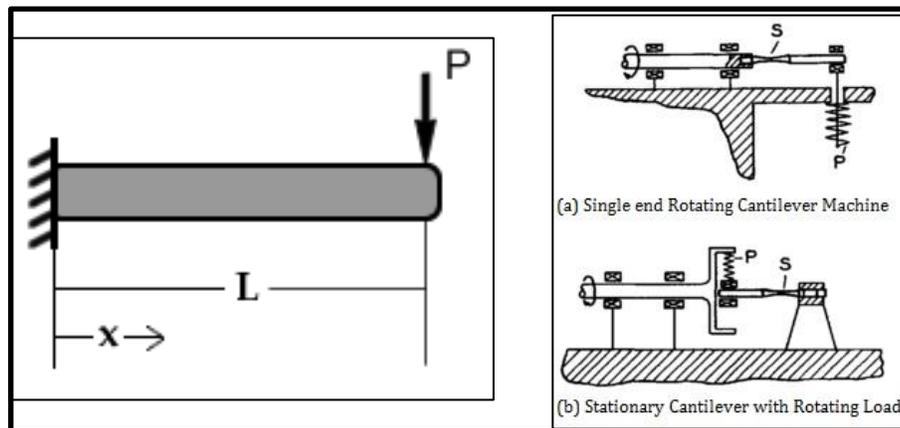


Figura 2.7: Esquemas de montaje para el estudio de fatiga en una viga en voladizo [10]

- **Cargas torsionales y otras alternativas**

Las pruebas de fatiga en torsión pura no son frecuentemente empleadas dado que aislar este tipo de carga no es sencillo y comúnmente se acompaña de otro tipo de cargas combinadas. Aun así, estas pruebas se han implementado aplicando un torque alternante en un extremo libre mientras se mantiene el otro extremo empotrado. Revisión de documentos y publicaciones que han implementado este método con vigas cilíndricas como los de viga rotativa han logrado generar un ensayo satisfactorio, el cual aparece como una alternativa efectiva para estudiar fatiga torsional [10].

Existe también la posibilidad de efectuar estudios de fatiga para cargas más complejas y de esfuerzos combinados que representan situaciones más representativas de realidades específicas que las cargas puras presentadas anteriormente. En esta línea se destacan dos tipos de combinación: tensión-torsión y flexión-torsión. En ambos casos, las fases de carga de cada uno determinan los máximos establecidos y definen los estados esfuerzos, lo cual permite estudios en variabilidad.

Finalmente, existen los métodos de estudio de fatiga influenciados por efectos externos, como son el creep (estudiando los efectos de la temperatura en la termofluencia), o también estudios de fretting (donde dos superficies en contacto se deslizan relativamente una de la otra, siendo precursores de nucleación de grietas y otros efectos). Estos estudios han sido de gran utilidad para entender cómo distintos métodos de activación de fatiga influyen en las aplicaciones ingenieriles para los que se pretenden los diversos materiales. El estudio de impacto repetido también se constituye como un estudio de fatiga de influencia externa, pero ha perdido aceptación por la variabilidad de resultados obtenidos, la falta de normas al respecto y los largos tiempos de prueba necesarios para realizarlos.

2.2 Rugosidad superficial

En esta sección se presenta la aproximación teórica y la serie de definiciones bajo los cuales se definen los tipos de rugosidad superficial y sus expresiones. También se presenta los criterios de la norma ISO para la realización de mediciones de rugosidad.

2.2.1 Aproximación teórica a la rugosidad superficial

Para estimar la morfología resultante de una operación de torno ideal, se adopta una aproximación de arco elíptico, ver Figura 2.8. La elipse punteada corresponde a la punta de la herramienta y f es el avance por revolución. El análisis siguiente se adopta de [3].

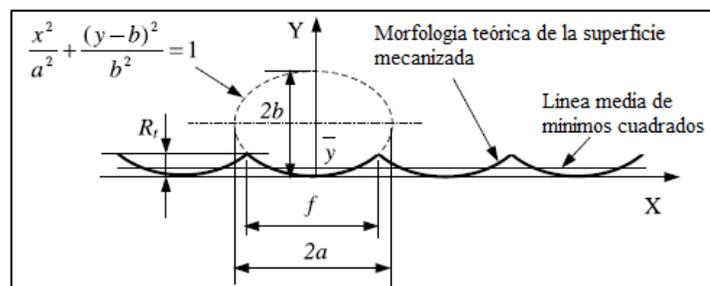


Figura 2.8: Esquema de superficie mecanizada con herramienta elíptica. Adaptado de [3]

Las expresiones generales se desarrollan a partir de una herramienta genérica de arco elíptico. Los parámetros de corte que moldean la morfología teórica de la superficie son el avance por revolución f y la geometría de la herramienta.

Utilizando el sistema de coordenadas señalado en la figura anterior, la superficie elíptica puede ser definida como:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{(y-b)^2}{b^2} = 1, \quad x \in \left[-\frac{f}{2}, \frac{f}{2}\right] \quad (2.22)$$

Es directo que una herramienta de arco circular constante corresponde a una elipse con los semiejes correspondientes al radio de la circunferencia correspondiente.

La primera caracterización de rugosidad se designa como profundidad total y se designa como R_t . En este caso, la expresión analítica es simple de calcular y se obtiene la siguiente expresión:

$$R_t = b - \frac{b}{a} \sqrt{a^2 - \frac{f^2}{4}} \quad (2.23)$$

En cuanto a la rugosidad media aritmética, R_a , la teoría exige que la línea media sea escogida mediante la línea de mínimos cuadrados o la línea media filtrada. En este caso se utiliza la línea de mínimos cuadrados, designada en la figura como \bar{y} . De esta forma, basado en la definición de una línea de mínimos cuadrados, se tiene:

$$\frac{\partial \int_{-f/2}^{f/2} (y - \bar{y})^2 dx}{\partial \bar{y}} = 0 \quad (2.24)$$

$$\Rightarrow \bar{y} = \frac{1}{f} \int_{-f/2}^{f/2} y dx \quad (2.25)$$

Para facilitar las expresiones de \bar{y} y de R_a , se define la siguiente expresión $S(x)$:

$$S(x) = \int y dx = \int \left(b - \frac{b}{a} \sqrt{a^2 - x^2} \right) dx \quad (2.26)$$

$$= bx - \frac{b}{a} x \sqrt{a^2 - x^2} - \frac{ab}{2} \arcsin \left(\frac{x}{a} \right) \quad (2.27)$$

Con esta expresión para $S(x)$, la expresión para \bar{y} queda:

$$\bar{y} = \frac{2}{f} \int_0^{f/2} y dx = \frac{2}{f} \left[S \left(\frac{f}{2} \right) - S(0) \right] = \frac{2}{f} S \left(\frac{f}{2} \right) \quad (2.28)$$

La siguiente variable auxiliar que se emplea corresponde a x_c , la cual corresponde al punto donde $y(x_c) = \bar{y}$ en el perfil teórico de la superficie. Así,

$$x_c = \frac{a}{b} \sqrt{2b\bar{y} - \bar{y}^2} \quad (2.29)$$

Por otro lado, la rugosidad aritmética media se define como

$$R_a = \frac{1}{f} \int_{-f/2}^{f/2} |y - \bar{y}| dx \quad (2.30)$$

Finalmente, se tiene que para una herramienta con arco elíptico la expresión de la rugosidad media aritmética queda como:

$$R_a = \frac{2}{f} \left[\int_0^{x_c} (\bar{y} - y) dx + \int_{x_c}^{f/2} (y - \bar{y}) dx \right] = \frac{2}{f} [x_c \cdot \bar{y} - S(x_c)] \quad (2.31)$$

Donde x_c , \bar{y} y $S(x_c)$, son funciones del avance f y los semiejes a y b .

Antes de estas aproximaciones, se utilizaban modelos parabólicos para aproximar los resultados de arcos circulares, de esta forma se utiliza la siguiente aproximación para la rugosidad aritmética media:

$$R_a \cong \frac{4}{9\sqrt{3}} \left(b - \frac{b}{a} \sqrt{a^2 - \frac{f^2}{4}} \right) \quad (2.32)$$

De aquí se obtiene la expresión común de la rugosidad media teórica, correspondiente al caso donde $f^2 \ll ab$, obteniéndose la habitual expresión:

$$R_a \cong 0.0321 \frac{f^2 b}{a^2} \quad (2.33)$$

2.2.2 Irregularidades superficiales

Es de suma importancia en la terminación superficial de una pieza, la identificación de los distintos tipos de irregularidad superficial. Anteriormente, se presentó una definición de la rugosidad superficial, pero dejó de lado otros tipos de irregularidad que influyen la caracterización general de integridad de la superficie. Estas irregularidades corresponden a defectos puntuales en la superficie, ondulación y errores de forma.

Como se puede observar en la Figura 2.9, una superficie mecanizada tiene un plano nominal de trabajo que contiene la dimensión teórica del corte realizado, dentro de este plano se encuentra el perfil total de la topografía de la superficie que corresponde a la morfología bruta de la superficie trabajada.

En este perfil se distingue el perfil de ondulación del perfil de rugosidad. El perfil de ondulación corresponde al conjunto de ondas de mayor longitud, lo cual no necesariamente inciden en los efectos de la rugosidad superficial, pero que si afecta los cálculos de rugosidad media aritmética. Del mismo modo, el perfil total filtrado en ondulación, genera el perfil de rugosidad y remueve el efecto de la ondulación sobre la rugosidad media de la superficie.

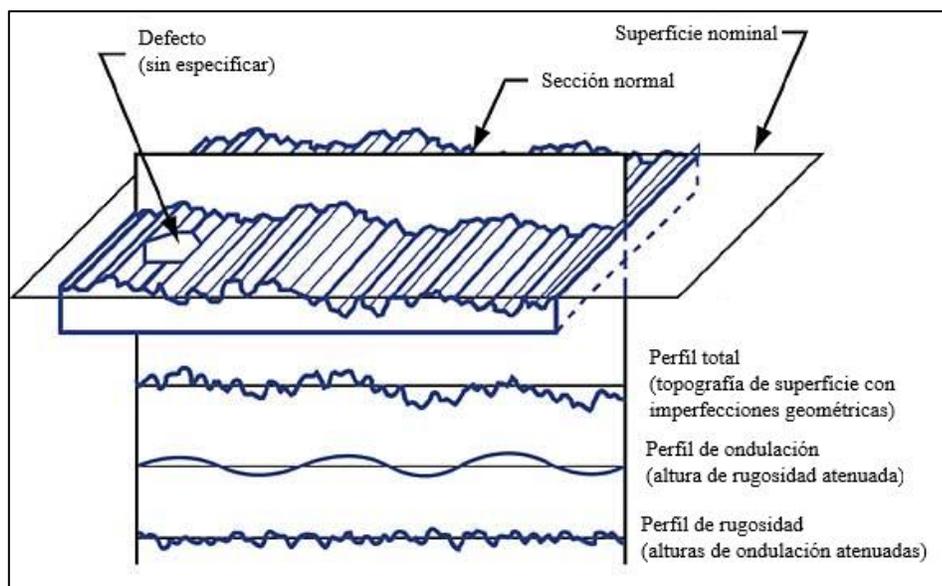


Figura 2.9: Representación gráfica de diferenciación entre ondulación y rugosidad en una superficie. Adaptado de [4]

A grandes rasgos, la rugosidad de una superficie se analiza como una señal de onda, a la cual se le aplican filtros de pasa alta (perfil de rugosidad) y de pasa baja (perfil de ondulación), para filtrar del perfil topográfico las desviaciones de la rugosidad media aritmética. Ya que la ondulación y las longitudes de onda que la incluyen son propios a cada superficie y/o método de medición y de su resolución, se ha establecido una norma que regula las longitudes de onda de corte para cierto rango de rugosidad estimada (ISO 4288). Es así como se presenta la Tabla 2-4, la cual muestra las longitudes de onda de corte para ciertos intervalos de rugosidad superficial estimada. Si bien los cálculos para las longitudes de onda de corte se pueden realizar para cada caso, es práctica común remitirse a estos valores de ondas de corte, para estandarizar y equiparar las mediciones ampliamente.

Tabla 2-4: Longitudes de onda de corte para rangos de rugosidad. Adaptado de ISO 4288-1996

Rango de rugosidad [μm]	Longitud de onda de corte L_c [μm]	Largo de evaluación [mm]
Hasta 0.02	80	0.4
0.02 – 0.1	250	1.25
0.1 – 2	800	4
2 – 10	2500	12.5
>10	8000	40

2.3 Operaciones de torno y desgaste de herramienta

Esta sección presenta la base teórica a través de la cual se estudian las variables de corte en la operación de torno y el comportamiento del desgaste de la herramienta.

2.3.1 Parámetros de corte en torno

Los principales parámetros de corte en torno que definen la interacción entre el material y la herramienta se presentan en la Figura 2.10 y corresponden a:

- Velocidad de corte v_c : Velocidad relativa entre la punta de la herramienta y la superficie del material trabajado.
- Tasa de avance por revolución, f_n : Distancia que recorre la herramienta, linealmente en dirección de la línea de centro de la pieza, por cada revolución del husillo.
- Profundidad de corte, a_p : Distancia entre la superficie externa no cortada y la que ya ha sido mecanizada. Se mide perpendicular a la dirección de la tasa de avance.
- Radio de punta de la herramienta, r_ϵ : Radio en contacto con el material del inserto de corte.
- Radio de corte: Distancia entre el centro de rotación de la pieza y la posición de la herramienta.

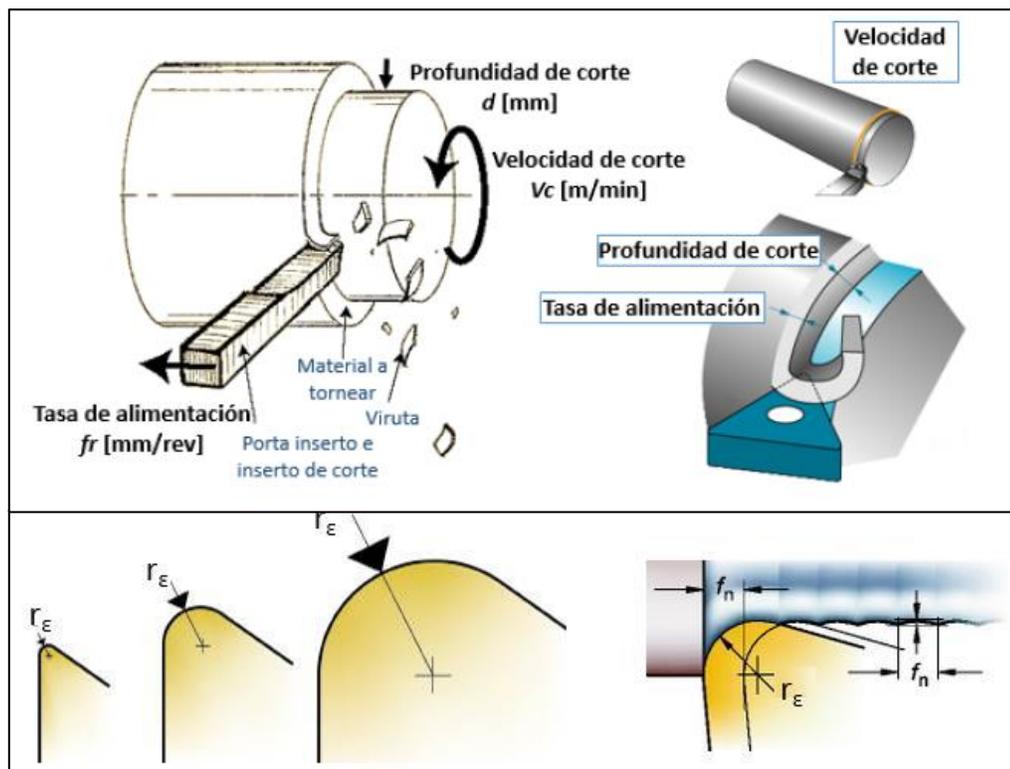


Figura 2.10: Esquema de los parámetros de corte en torno. [5]

2.3.2 Desgaste de herramienta

Si bien la herramienta es de mayor dureza que el material a ser mecanizado, la herramienta también presenta un desgaste cuya caracterización se hace en función de los parámetros de corte. Aun así, el comportamiento genérico de una herramienta se puede describir mediante la proyección gráfica de una curva de desgaste, la cual se ve representada de forma genérica en la Figura 2.11, donde se distinguen tres zonas principales. La zona I, denominada periodo de entrada, corresponde al desgaste de alta tasa inicial de una herramienta nueva. La zona II corresponde a una región de desgaste estable caracterizada por contar con una tasa de desgaste creciente y constante. Finalmente, la zona III corresponde a la región de falla de la herramienta y se caracteriza por contar con un aumento en la tasa de desgaste e incurrir en la falla de la herramienta, sea por fractura, o bien, por sobrepasar un nivel de desgaste máximo aceptado.

Los parámetros de corte empleados definen la forma y el comportamiento del desgaste de la herramienta. Sin embargo, se conoce a grandes rasgos los efectos generales de trabajar con los parámetros fuera de los rangos normales, ver sección 2.4.

El estudio de los efectos de las variables de corte sobre la curva de desgaste no es parte de este proyecto, como tampoco lo es la determinación de las curvas de desgaste. Sin embargo, conocer el comportamiento general del inserto y su desgaste, complementa el parámetro de corte asociado al estado de la herramienta.

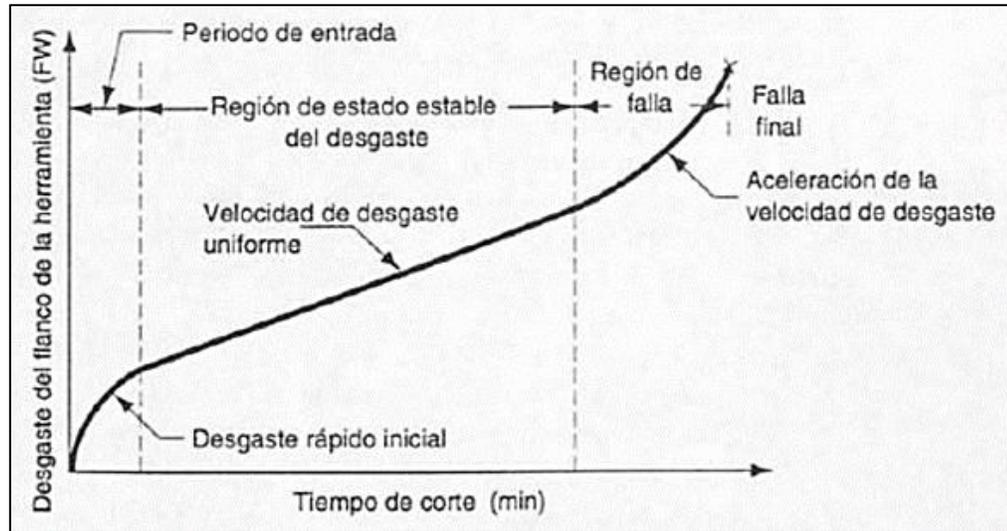


Figura 2.11: Representación genérica de curva de desgaste de herramienta. [6]

2.4 Estado del arte y estudios previos

Gran número de publicaciones abordan problemáticas similares a las que se pretende estudiar en este proyecto, las cuales provienen de dos áreas distintas. Por un lado, están aquellas publicaciones relacionadas con las influencias de los parámetros de corte sobre el acabado superficial para el titanio, mientras que, por otro, están las publicaciones que estudian los efectos de la calidad superficial sobre la vida a la fatiga.

2.4.1 Efectos de manufactura en titanio

Lo primero para establecer la base desde la cual se caracteriza el material corresponde a la norma ASTM B265 [11], la cual especifica niveles de composición química y propiedades mecánicas requeridas. Con respecto a las influencias del corte en la integridad superficial, destaca el estudio de A. Javidi [12] que entrega una base para aislar los parámetros de corte más relevantes; velocidad de corte v_c , tasa de avance f_n , profundidad de corte a_p y el radio de punta del inserto. Estos cuatro parámetros determinan los niveles de esfuerzo residual y de rugosidad superficial. Se han analizado los efectos de ambos niveles [13], [14] indicando que para el rango de rugosidad entre 2,5 a 5 [μm] el esfuerzo residual es el que controla el mecanismo relevante de fatiga, mientras que en ausencia de esfuerzo residual, la rugosidad sobre 0,1 [μm] presentan las mayores influencias. En la Tabla 2-5 se enlistan a grandes rasgos los efectos de las variaciones de los parámetros de corte fuera de los rangos normales de operación.

Tabla 2-5: Efectos de los parámetros de torno sobre el material y herramienta. Adaptado de [15]

Parámetro	Demasiado Baja	Demasiado Alta
Velocidad de Corte	<ul style="list-style-type: none"> ● Filo recrecido ● Baja eficiencia económica ● Superficie mal acabada 	<ul style="list-style-type: none"> ● Rápido desgaste ● Deformación plástica
Avance	<ul style="list-style-type: none"> ● Baja rentabilidad ● Relación desgaste/material eliminado alta 	<ul style="list-style-type: none"> ● Acabado superficial deficiente ● Elevado consumo energético ● Desgaste de cráter ● Soldadura de la viruta
Profundidad de Corte	<ul style="list-style-type: none"> ● Genera vibraciones ● Calor excesivo ● Baja eficiencia económica 	<ul style="list-style-type: none"> ● Consumo energético elevado ● Fuerzas de corte elevadas ● Rotura de herramienta

2.4.2 Ensayos de fatiga en función de integridad superficial

Respecto a las publicaciones que abordan la problemática de la influencia de los parámetros de manufactura sobre la vida a la fatiga de distintos materiales, se observa que el método más usual empleado es el de flexión en cuatro puntos [11,12]. Los métodos de viga rotativa y tensión uniaxial también son métodos empleados para estudiar las influencias de la manufactura [13,14], pero no ampliamente, ello debido a que es la flexión en cuatro puntos el ensayo que permite mayores áreas de maquinado respecto a probetas torneadas.

Como otro punto, se destaca que gran número de experiencias han sido capaces de reducir a cuatro el número de factores de manufactura que modifican la respuesta de fatiga de un material. Estos factores son el avance, la profundidad del corte, la velocidad superficial y el radio de punta del inserto [13,15,16]. Mientras que otros investigadores han comparado la diferencia entre operaciones de rectificado y fresado de alta velocidad [16].

Finalmente, las principales conclusiones respecto a las influencias sobre aleaciones de titanio expresan que los niveles de esfuerzos residuales e integridad superficial (el conjunto de parámetros de rugosidad) afectan la vida a la fatiga [14], complementando la idea que el radio de la punta del inserto tiene influencia directa sobre la rugosidad superficial [18], mientras que el avance influye sobre los niveles de esfuerzo residual de la superficie maquinada [14].

3 Metodología

En esta sección se presenta la estrategia aplicada en el estudio de fatiga desarrollado. Se compone de una secuencia metodológica, la determinación de los recursos y las etapas del proyecto.

3.1 Secuencia metodológica

La base metodológica desde la cual se abordó el proyecto se estructura en una secuencia de cuatro etapas, donde la Figura 3.1, muestra un sencillo diagrama del flujo sucesivo de actividades que permiten cumplir los objetivos propuesto.

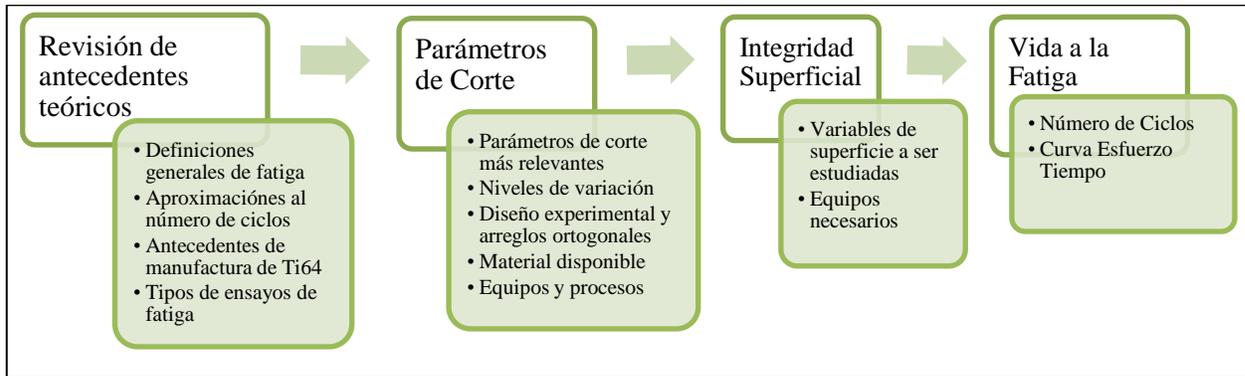


Figura 3.1: Diagrama de flujo metodológico involucrado. Elaboración propia.

En la primera etapa se realiza una revisión teórica y bibliográfica de las áreas de la ingeniería que confluyen en el estudio del fenómeno propuesto (Sección 2). Esto implicó revisar primeramente la base física que describe el fenómeno de fatiga y las definiciones empleadas en la determinación de las curvas de carga y los ciclos de esfuerzo alternante. Se describieron los criterios que permiten realizar las aproximaciones al número de ciclos esperados para las cargas alternantes. Luego se observó los antecedentes sobre la manufactura del Ti-6Al-4V que se utilizan actualmente en operaciones de torno. Finalmente, tras analizar los distintos tipos de ensayos de fatiga disponibles y que han sido utilizados en estudios similares se opta por emplear un ensayo axial, con operación característica realizada en torno y carga alternante con $R=0,1$ a 10 Hz.

El estudio se basa en la idea que la vida a la fatiga se ve fuertemente influenciada por la condición superficial del material. Precursores o inhibidores de falla pueden variar dependiendo de la morfología resultante del proceso de manufactura. De esta forma, la segunda etapa de metodología determinó los parámetros más relevantes sobre el fenómeno de fatiga: la velocidad de corte, el avance, la profundidad y el estado de la herramienta. Los niveles de variación se adoptan a partir de recomendaciones directa de los usuarios de esta aleación (Rolls-Royce). Ellos proponen centrar en: 60 [m/s] para la velocidad, 0.2 [mm/rev] para el avance, 0.3 [mm/rev] para la profundidad. Para estudiar el efecto de la punta de la herramienta, se decidió cuantificar el desgaste previo al corte como variable. Para ello se acondiciona un grupo de herramientas con un desgaste previo (ver Sección 4.1 y 4.2). Ya que la caracterización real del material (ensayo de tracción) y el acondicionamiento previo de las herramientas desgastadas requiere de un proceso experimental, los resultados obtenidos son expresados en la sección 4.

Una vez conformadas las probetas se analizó el resultado sobre la condición superficial obtenida. Se cuantifica la rugosidad superficial mediante dos métodos y, también, el desgaste de la herramienta posterior al corte. La posibilidad de realizar estudios de esfuerzos residuales cae fuera del marco de este proyecto debido principalmente a la falta de presupuesto para realizar ese tipo de prueba y porque el tiempo disponible no permitió incluirlos.

El cuarto y último punto fue el grupo de actividades relacionadas con el ensayo de fatiga. Esto implicó definir las curvas de carga a ser utilizadas utilizando los criterios de la base teórica, además se obtuvieron las curvas de desplazamiento para detectar un posible endurecimiento o ablandamiento cíclico. Finalmente el contraste del número de ciclos en función de los parámetros de corte con los softwares adecuados aisló los efectos más relevantes en la influencia para la vida a la fatiga.

3.2 Recursos

Con la secuencia metodológica establecida se deben esclarecer todos los recursos que se emplearon para desarrollar el trabajo.

3.2.1 Recursos no financieros

El centro de investigación donde se realizó el estudio cuenta con gran número de centros de mecanizado capaces de generar las operaciones necesarias para fabricar las probetas. El centro de estudios estructurales cuenta con sistemas de montaje para pruebas de tracción axial hasta los 100 kN. No obstante, estos centros de mecanizado requieren el tiempo de un operario especializado que realiza las operaciones de corte, los cuales deben ser cubiertos por el presupuesto global del proyecto.

- **Recursos Computacionales**

Se cuenta con los siguientes recursos computacionales, tanto para cálculos, desarrollo de modelos y confección de informe, todos con las licencias correspondientes para el correcto uso de ellos:

- Siemens NX 9.0 – Plataforma para diseños CAD y desarrollo de planos
- Matlab – Programa de computación numérica
- ANSYS – Programa de mallado y simulación mecánica estructural a elementos finitos
- MODDE – Software de diseño de experimentos
- Microsoft Word, Excel y PowerPoint – Conjunto de programas de Office que facilitan la ejecución de documentos.

- **Centros de mecanizado y equipos de análisis**

Los centros de mecanizado, bancos de prueba y equipos accesorios que se utilizan son:

- Centro de fresado y torneado MoriSeiki NT 6600 DCG
- Centro de fresado y torneado MoriSeiki NT 5400 DCG

- Rectificadora plana
- Sierra de banda
- Microscópico óptico digital de alta resolución Alicona Infinite Focus G5
- Microscopio óptico digital con salida USB
- Perfilómetro de contacto Mitutoyo SJ-210
- Equipo de ensayos de tracción axial servo hidráulico Instron 8801

3.2.2 Recursos financieros

Los recursos financieros que permiten la realización de este proyecto se basan en dos grupos. Por un lado está el recurso generado para permitir la estadía del alumno durante seis meses en Sheffield, UK, lo cual se establece en el memorando de entendimiento firmado entre ambas instituciones involucradas, estableciendo como monto la cantidad de £8.293,57, para cubrir los costos de traslado y de estadía.

Por otro lado, el proyecto interno del AMRC que financia este estudio es el ABG110 – “Machining and Fatigue” al cual se le adjudican £22.000 que deben ser capaz de cubrir todos los gastos de compra de materiales, herramientas y tiempo en los centros de mecanizado y montajes de prueba.

4 Resultados y análisis

En esta sección se presenta la serie de resultados y decisiones técnicas que se adoptan para abordar el problema propuesto. En primera instancia, se presentan las formalidades técnicas del diseño experimental, como son los arreglos ortogonales de las variables manipuladas, el tipo de ensayo escogido y los procesos de manufactura involucrados. Seguidamente, se presentan los resultados que preceden al ensayo de fatiga, como son un ensayo de tracción para caracterizar el material, los resultados de rugosidad superficial, para dar paso al último grupo de resultados, correspondientes al ensayo de fatiga. En cada uno de los apartados que sigue se genera una tanto una presentación, como también una interpretación de los resultados obtenidos.

4.1 Selección del tipo de ensayo

La primera decisión que define el proyecto por uno u otro método, corresponde al tipo de ensayo escogido para ser implementado y de manera similar, la geometría de la probeta. Esta decisión se determina por dos factores clave; el primero correspondiente a la materia prima disponible, mientras que el segundo se basa en los equipos de prueba disponibles al interior del AMRC. El segundo punto cobra una mayor importancia ya que debido a la delicadeza del tratamiento superficial del fenómeno a ser estudiado, la posibilidad de subcontratar el ensayo de fatiga a una empresa externa no convence por desconocer los métodos y manipulaciones que pueden tener las probetas, además que este tipo de pruebas tienen una considerable extensión en el tiempo como para que los costos asociados sean tales que escapen del presupuesto. De esta forma, en el centro donde se realizan las pruebas (Advanced Structures and Testing Centre – ASTC) cuenta con una serie de equipos para ensayos de tracción, mientras que no existen equipos para el estudio de flexión a cuatro puntos o de viga rotativa. Finalmente, el tipo de ensayo que se implementa corresponde a un ensayo de fatiga en tracción axial.

4.1.1 Materia prima

Con el tipo de ensayo en consideración lo que sigue es definir el material inicial del cual salen las probetas a ser estudiadas. Así, buscando en los centros de almacenamientos de material del AMRC se da con una barra de Ti-6Al-4V la cual tiene dimensiones aproximadas de $\text{Ø}254$ [mm] x L 430 [mm], mostrado en la Figura 4.1.

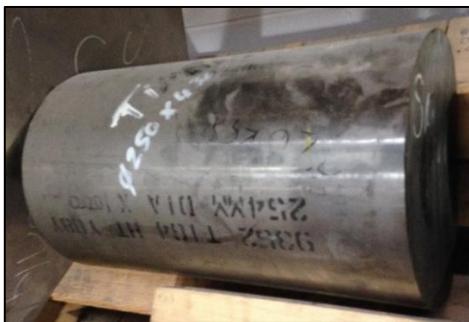


Figura 4.1: Barra inicial de Ti-6Al-4V para la fabricación de probetas de fatiga

El material de esta barra se designa como una aleación de Ti-6Al-4V (comúnmente designada como Ti64), pero lo que nos entrega esta nomenclatura no expresa mucho sobre la composición general, ni las características mecánicas esperadas. De esta forma, se puede construir la siguiente tabla para

caracterizar el material, a partir de la norma ASTM B265 [11], considerando tanto composiciones y requerimientos en tensión:

Tabla 4-1: Requerimientos químicos para Ti-6Al-4V. Adaptado de ASTM B265 [11]

Requerimientos Químicos para Aleación de Ti-6Al-4V Grado 5 Composición, Porcentaje en Peso							
Carbón, máx.	Oxígeno, máx.	Nitrógeno, máx.	Hidrógeno, máx.	Hierro, máx.	Aluminio, rango	Vanadio, rango	Otros, total máx.
0.08	0.20	0.05	0.015	0.4	5.5 – 6.75	3.5 – 4.5	0.5

Tabla 4-2: Requerimientos Mecánicos para Ti-6Al-4V. Adaptado de ASTM B265 [11]

Requerimientos en Tracción para Aleación Ti Grado 5		
Resistencia a la Tracción, mín. [MPa]	Límite de Fluencia, 0,2 % Offset [MPa]	Elongación en 50 [mm], mín., %
895	828	10

Estos rangos de caracterización son nominales a la aleación genérica de Ti-6Al-4V grado 5. Cabe mencionar que grados de composición similares, como los grados 23, 24, 25 y 29, tienen valores nominales de comportamiento mecánico dentro del rango señalado anteriormente, mientras que la composición química agrega los elementos de aleación adicionales a cada grado [11], por lo que las tablas son representativas de la material inicial empleado.

4.1.2 Geometría de la Probeta

El ensayo de fatiga en tracción tiene la versatilidad de contar con distintas alternativas para la geometría de la probeta a ser utilizada. Por un lado, se permite la utilización de una probeta de sección transversal circular, mientras que por otro lado también permite la implementación de una probeta de sección cuadrada, como se muestra en la Figura 2.4.

La primera dirección que surge de estas posibilidades corresponde a considerar una probeta de sección circular, ya que la operación de torno es directa sobre toda la superficie de la probeta y presenta una manufactura directa para cada una. Sin embargo, por observación de las compañías afiliadas e ingenieros internos del AMRC se genera la discusión sobre la transferencia y representatividad de una operación de torno de baja escala ($\sim \varnothing 20$ [mm]) con las utilizadas en la industria aeroespacial, donde los radios de torneado son superiores a los $\varnothing 100$ [mm] y principalmente empleados en la conformación de discos de turbina. El principal argumento utilizado en esta objeción tiene que ver con la mecánica del corte, donde la interacción entre la herramienta, el material y la viruta generada es dependiente del radio de torneado y por ello, bajos radios no representan necesariamente los radios de torneado. Surge entonces la necesidad de generar probetas de sección cuadrada que integren una operación de torno característica y distinta para cada una de ellas, además de buscar maximizar el radio de torneado para evitar el inconveniente de representatividad señalado anteriormente.

Con la materia prima definida y el tipo de probeta a ser conformada, con las condiciones que esta requiere, se define la geometría nominal de las probetas, a partir de la norma ASTM 606 y las dimensiones del material inicial. Las dimensiones más relevantes se presentan la Figura 4.2, donde el espesor corresponde a 5 [mm]. El largo de carga corresponde a 40[mm], el largo útil de tracción son 15[mm] y los radios de hombro son 10[mm]. El ancho al centro de la probeta es de 10[mm], entregando un área transversal nominal de 50 [mm²]. Estas dimensiones deben ser reevaluadas una vez conformadas las probetas para efectivamente calcular las áreas transversales y las magnitudes que se desprenden de ella.

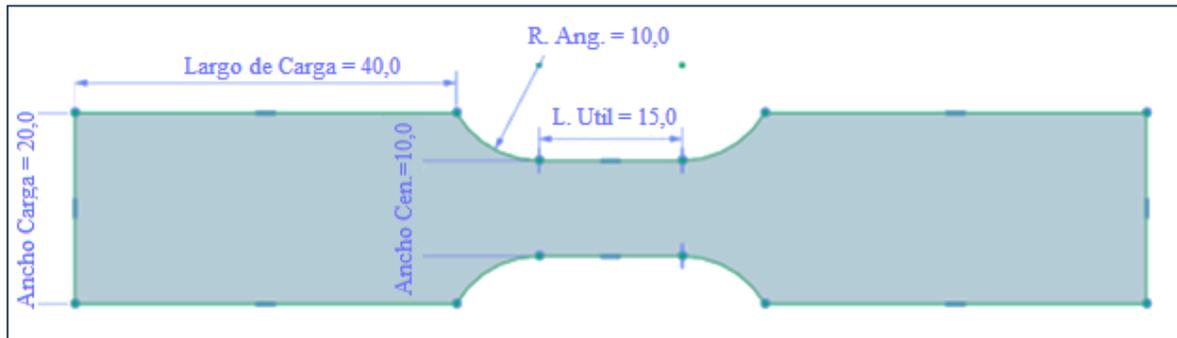


Figura 4.2: Dimensiones nominales de las probetas de fatiga. Elaboración propia

Es necesario aclarar en esta sección, que la zona a ser torneada corresponde al espesor completo de la probeta, lo cual se especifica en el siguiente apartado.

4.1.3 Proceso de manufactura para conformación de probetas

Con la definición de las dimensiones generales que determinan las probetas, se debe establecer los procesos de manufactura necesarios, como también los centros de mecanizado empleados, para pasar desde la materia prima hasta cada probeta individual. De esta forma, se construye un flujo de operaciones sucesivas que se describen a continuación:

A. Cilindrado de la barra inicial a $\varnothing 250$ [mm] y ranurado de muescas:

Esta operación se realiza en el centro de mecanizado MoriSeiki NT6600 DCG y corresponde a una operación de limpieza de la superficie exterior de la barra y reducción leve del diámetro hasta los 250[mm], para asegurar una geometría completamente cilíndrica se tornea el frente también. Seguidamente, se generan muescas de 20 [mm] de profundidad y 5 [mm] de ancho, separadas 30 [mm] entre sí, lo cual delimita 12 discos distintos inicialmente. La última operación en este centro de mecanizado es realizar una pequeña marca longitudinal en el semi eje mayor que sirve de guía para orientar la posición inicial de cada disco en la barra original y además sirve para acuñar un pequeño identificativo del número del disco. La Figura 4.3 muestra una representación del resultado final de la operación.

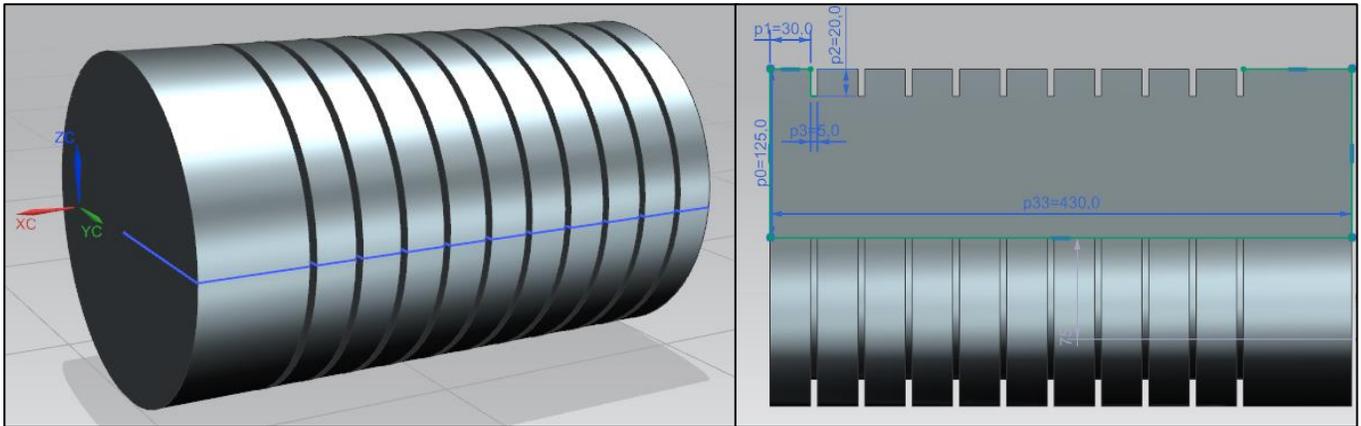


Figura 4.3: Diagrama CAD del cilindrado y ranurado de la materia prima. Elaboración propia

B. Corte en sierra de banda:

Este proceso permite seccionar cada disco de la barra inicial a un menor costo que mediante un centro de mecanizado de alta precisión. Las muescas realizadas anteriormente permiten guiar la sierra de corte dentro de un rango de 5 [mm] lo cual deja material suficiente para hacer las siguientes operaciones de desbaste y torneado de caras.

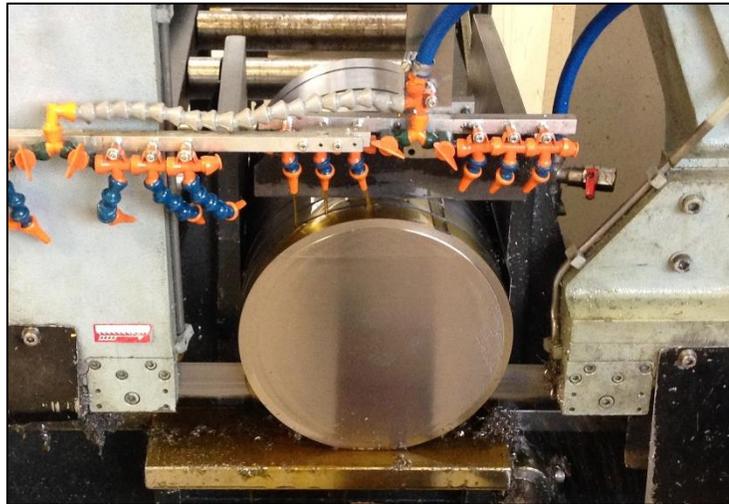


Figura 4.4: Imagen del proceso de corte en sierra de banda. Elaboración propia.

C. Refrentado y generación de cuello con distintos parámetros de corte para cada disco:

Esta operación es la actividad central del mecanizado de las probetas ya que aquí corresponde variar los parámetros de corte de torno que se analizan para el ensayo de fatiga. Aun así, el proceso de manufactura es el mismo para todos, existiendo el cambio solo en las pasadas de terminación. Estas operaciones se realizan en el centro CNC de torno y fresado MoriSeiki NT5400 DCG, la cual cuenta con un husillo secundario alineado que permite hacer traspasos de frente sin necesidad de desmontar el disco y arriesgar una pérdida en alineación. Se utilizan mandíbulas blandas de sujeción que se fabrican exclusivamente para los usos de este proyecto y así minimizar desalineaciones y deformaciones en los discos. El corte se realiza con un refrigerante Hocut795-B a alta presión.

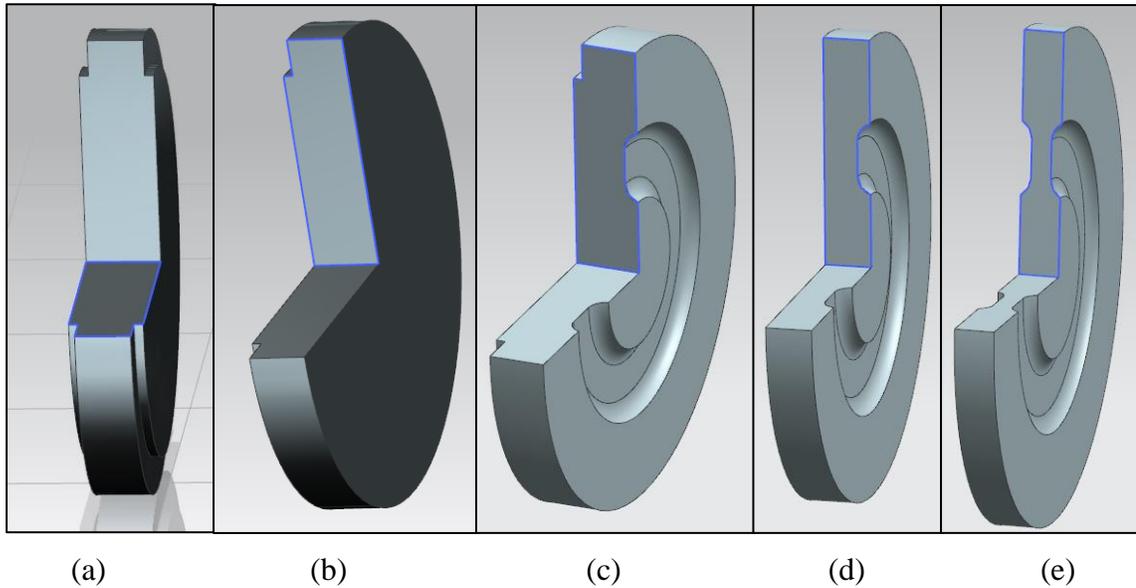


Figura 4.5: Secuencia de refrentado y generación de cuello en cada disco. Elaboración propia.

La secuencia utilizada para refrentar los discos de acuerdo a cada nivel del diseño experimental se observa en la Figura 4.5. Inicialmente se monta el disco proveniente del corte en sierra en el husillo izquierdo del centro de mecanizado. Este disco proviene con un excedente de material el cual hay que desbastar para dar con las medidas del disco final. Para ello se realizan las primeras pasadas de refrentado hasta la medida correspondiente. A continuación, mostrado en (b), se generan las pasadas de refrentado con el precursor del cuello. Tras un cambio de herramienta, la cual ha sido identificada y fotografiada para su análisis de desgaste, se genera el corte de terminación de acuerdo a las especificaciones del diseño experimental, como se observa en (c). Con la primera cara terminada, se realiza el traspaso de husillo, garantizando una alineación de la muestra bajo el 0.02%¹. Se genera nuevamente el refrentado de desbaste, pero esta vez en la cara posterior, ver cuadro (d). Finalmente, se vuelve a cambiar la herramienta y se realiza el refrentado de terminación en la cara posterior de acuerdo a la especificación experimental. Esto finaliza la operación de torno, y como muestra la Figura 4-5 (e), se obtiene un disco con el perímetro exterior de la probeta en su dirección radial, dando paso para la siguiente operación de manufactura.

Las especificaciones de las herramientas utilizadas tanto en los desbastes como en las terminaciones se realizan en la sección 4.2 donde se establecen las condiciones de corte y el diseño experimental empleado.

D. Electroerosión con hilo, retirado de probetas individuales y rectificado final:

El último grupo de actividades corresponde a obtener las probetas individuales desde cada disco. Debido a su ubicación radial al interior de cada disco, la forma más rápida y directa corresponde a utilizar el centro de electroerosión con hilo Mitsubishi MP1200. Ya que el disco debe orientarse respecto a la marca generada en el primer grupo de operaciones, y teniendo en cuenta el montaje del disco al interior del centro de electroerosión, se permite la extracción de seis probetas a partir

¹ Medido como la desalineación vertical angular en un traspaso de prueba que arroja un desplazamiento máximo de 40 [μm] en el borde exterior del disco, entregando un ángulo de variación de 0.00032 [rad].

de cada disco. Estas se asignan con letras desde A hasta F para tener una referencia y orientación interna de cada una.

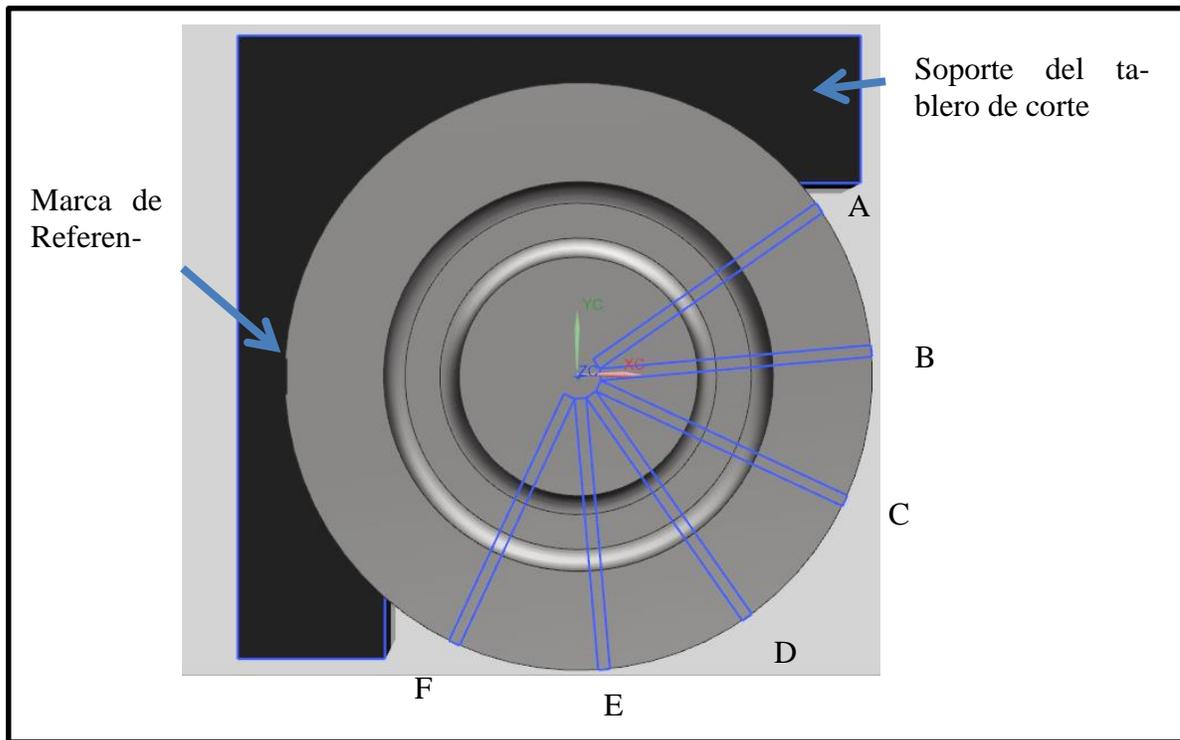


Figura 4.6: Esquema de corte con electroerosión para la obtención de seis probetas en cada disco. Elaboración propia.

Un factor relevante del proceso de electroerosión es la capa refundida en la superficie del corte debido a la presencia del campo eléctrico del hilo y las elevadas temperaturas asociadas. En materiales como el Ti-6Al-4V, esta capa redepositada es dañina para las características mecánicas del material ya que crece el número de precursores de falla, como un aumento en la dureza y mayor presencia de grietas. Además se presentan esfuerzos residuales de tracción por contracción térmica, particularmente cuando se utiliza agua destilada como medio dieléctrico, como es en este caso [10,17]. Los espesores de esta capa redepositadas en aleaciones de Ti, se estiman en rangos menores a $2[\mu\text{m}]$ [18,19]. En cuanto a los efectos sobre la vida a la fatiga, también se traducen disminuciones en el comportamiento, reportados por Mower, 2014 [23] en disminuciones entre 15% - 30%. Queda claro que la presencia de una capa refundida afecta directamente el fenómeno a ser estudiado, por lo que la necesidad de removerla es imperativo. De esta forma, el último proceso de manufactura que se realiza sobre las probetas corresponde a un rectificado plano con refrigeración por inundación y con profundidad de pasada mínima para evitar elevar excesivamente la temperatura de la superficie. Lo que busca esta etapa, además de remover la capa recristalizada, es asegurar frentes paralelos y permitir una correcta medición del área de la sección transversal.

4.2 Diseño experimental

Tomando en consideración la cantidad de materia prima que se dispone junto con las dimensiones establecidas para las probetas, se debe determinar, en primera instancia cuáles son los parámetros

de corte a ser variados y, en seguida, en cuántos niveles se variarán y centrados en qué valores. Por último se analiza el arreglo ortogonal que mejor engloba las variables a ser utilizadas.

4.2.1 Parámetros de corte y valores medios

En base a la recopilación de antecedentes teóricos, se destacan cuatro factores de mayor relevancia en el fenómeno de fatiga en operaciones de torno: velocidad de corte (v_c), profundidad de corte (a_p), tasa de avance (f_n) y el estado de punta de la herramienta. Estos cuatro factores se conjugan en el proceso de corte para definir el estado de esfuerzos residuales en la superficie y las características morfológicas de rugosidad superficial. Para definir los niveles que se establecen para cada probeta, se recurre a los socios internos del AMRC, en particular a los ingenieros de Rolls Royce y al representante de SECO Tools. De esta forma se deciden los siguientes parámetros centrales y rangos de variación:

- Velocidad de corte, v_c : En una operación de terminación este valor para la operación generada en los discos se centra en 100 [m/s]. Esta decisión se determina por recomendación directa de los ingenieros de Rolls Royce, como velocidad que ellos emplean en sus operaciones de terminación. También se verifica esta velocidad con manuales de manufactura en titanio como catálogos de Sandvik, Kennametal y Libros de Mecanizado en Titanio (Donachie, M.J. (2000). Titanium: A Technical Guide. Materials Park, OH: ASM International.). Este parámetro se varia en un rango de 40% en ambos sentidos, por lo que se tienen niveles de 60, 100 y 140 [m/s].
- Profundidad de corte, a_p : Nuevamente por recomendación de Rolls Royce y respaldado por catálogos y manuales de manufactura para Ti-6Al-4V, el valor central para la profundidad de corte se fija en 0.3 [mm]. Ahora bien el rango de variación es mayor al de velocidad de corte, establecido en 50%. Esto genera tres niveles de profundidad; 0.15, 0.3 y 0.45 [mm].
- Tasa de avance, f_n : La tasa de avance es el último parámetro que provee Rolls Royce respecto a sus operaciones de terminación en torno. Se fija el valor central en 0.2 [mm/rev] lo cual cae dentro de los rangos normales. Se varia el parámetro en 50% obteniendo tres niveles de 0.1, 0.2 y 0.3 [mm/rev].
- Estado de herramienta de Corte: Este factor se discute con ingenieros de Seco Tools quienes proveen los insertos para trabajar los discos. Recordando que el centro de mecanizado utilizado es un MoriSeiki NT 5400 DCG, y por las geometrías del disco, se propone el inserto LCMF-1606MO-0600-MP-NCP (Figura 4.7), el cual es un inserto de carburo multidireccional de punta circular con radio 3.0 [mm] y con un recubrimiento PVD grado NCP.

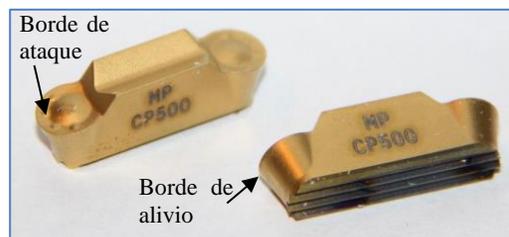


Figura 4.7: Insertos utilizados identificando los bordes de ataque y de alivio. Fuente catálogo SECO Tools.

Respecto a la variación del radio de punta en la herramienta, se considera que hacer pedidos para distintos tipos de inserto es poco productivo (aumentando tiempos de preparación para corte y aumentando los costos del proyecto), por lo que se decide variar este parámetro en dos niveles respecto al desgaste inicial del inserto. Por un lado, se mecanizan algunos discos con insertos completamente nuevos para la pasada de terminación, mientras que por otro lado hay discos que son maquinados con insertos previamente desgastados. Para ello se investiga parámetros de corte de acondicionamiento del inserto. Así se prueban distintas combinaciones de velocidad, profundidad, avance, presencia de refrigerante de alta presión o por inundación. Se busca preparar los insertos con un desgaste “normal” donde los efectos de sobredimensiones en algunos de los parámetros no prime por sobre el resto. La función de este acondicionamiento busca ubicar herramientas en la zona I de la curva de desgaste y herramientas en la zona II de la curva.

Así, se logra que el preparativo para los insertos con desgaste previo se define con los siguientes parámetros de corte: refrigeración por inundación, con velocidad de corte de 60 [m/s], profundidad de corte de 0.6 [mm], avance de 0.25 [mm/rev], tiempo en corte de 17.5 [min].

Los insertos que son acondicionados para el desgaste se designan como WCP X – LADO, con X siendo el número identificador del inserto y LADO distinguiendo cada uno de los extremos del inserto. Se mide el nivel de desgaste en el borde de alivio y en el borde de ataque, mostrado en la Figura 4.8, donde se observa un desgaste bastante uniforme en ambos bordes. Con las condiciones de corte expuestas anteriormente se obtiene un desgaste promedio de 0.214 [mm] para el borde de ataque con una desviación estándar de 0.013 [mm], mientras que para el borde de alivio se obtiene un promedio de 0.137 [mm] con 0.005 [mm] de desviación estándar. La forma en la que se mide este desgaste es mediante un microscopio óptico digital, donde en la Figura 4.9 muestra un ejemplo del proceso de medición de corte, presentando la imagen del borde de ataque, el borde de alivio y una vista trimétrica de la punta del inserto.

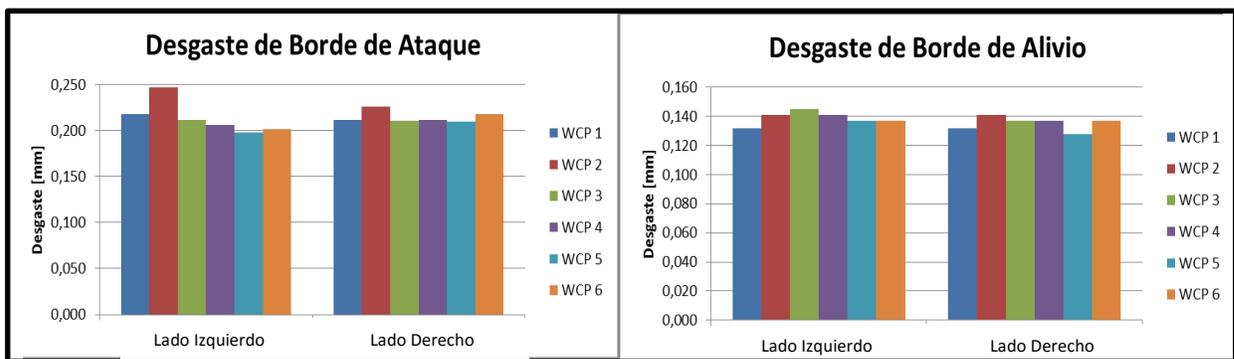


Figura 4.8: Gráficos de desgaste de acondicionamiento para insertos desgastados. Elaboración propia.

Los desgastes observados mediante el microscopio se encuentran cercanos a los niveles máximos de desgaste tolerados por Rolls-Royce, quienes descartan las herramientas con desgastes de ataque superiores a 0.25 [mm].

Finalmente, el último parámetro de corte que se considera en el diseño experimental, correspondiente al estado de la herramienta, se fija en dos niveles; nuevo y desgastado. El inserto nuevo no tiene un desgaste asociado, mientras que los acondicionados son tabulados para conocer el desgaste posterior al corte. Con esto se abre paso para analizar el tipo de diseño experimental que permite organizar las variables en distintos arreglos ortogonales.



Figura 4.9: Ejemplo de imágenes de desgaste de inserto. En este caso es el inserto WCP-3-Derecho. Elaboración propia.

4.2.2 Arreglos Ortogonales

Con la definición de los parámetros de corte evaluados, como también sus valores centrales y rangos de variación, se obtienen tres parámetros variados en tres niveles y uno variado en dos. En la disciplina del diseño de experimentos, existe una gran variedad de arreglos que permiten, con distinto nivel de precisión y cantidad de arreglos, ordenar distintas secuencias de los parámetros. Teóricamente el diseño experimental que mejor logra discernir entre los efectos de una y otras variables corresponde a un diseño factorial completo. Este tipo de diseño se funda en la idea de variar un solo parámetro mientras el resto se mantiene constante. La cantidad de ensayos necesarios para satisfacer este diseño vendrá dado por:

$$n = \prod_{i \in \mathbb{N}} i^{a_i} \quad (4.1)$$

donde n es el número de ensayos y a_i es la cantidad de parámetros a ser variados en i niveles. De este modo, para la selección propuesta, un diseño factorial completo exige $2^1 \cdot 3^3 = 54$ ensayos. Para un estudio de fatiga la posibilidad de realizar un ensayo factorial completo es poco asertiva ya que aun trabajando en el rango inferior del alto ciclo, $\sim 10^4$ ciclos, la cantidad de tiempo requerido para realizar los ensayos consume buena parte de los recursos financieros disponibles. Sin embargo, existen distintas alternativas que trabajan sobre la base de disminuir la cantidad de ensayos para las mismas cantidades de niveles y parámetros. En particular destacan dos diseños; un arreglo L9 de Taguchi y un factorial fraccionado en 12 niveles.

El diseño de arreglos ortogonales de Taguchi permite organizar en nueve ensayos los cuatro parámetros de tres niveles. Los parámetros y sus rangos se presentan su sección de la Tabla 4-4. Las principales fortalezas que presenta este tipo de diseño, recae en la robustez que permite un buen equilibrio del arreglo. Sin embargo falla en su capacidad para discernir entre las variables de control y las de ruido, especialmente aplicables a errores no controlados en la parte experimental [25].

El diseño factorial fraccionado se desprende del factorial original y emplea técnicas matemáticas para equilibrar un arreglo de las mismas variables en menor cantidad de ensayos. Para el caso de este estudio, el software MODDE propone como diseño preferente de factorial fraccionado 8B-2CP-2CP, lo cual quiere decir: un diseño factorial fraccionado base 8 con doble repetición del

punto central del arreglo para ambos casos de la cuarta variable (la cual en este caso se varía tan solo en dos niveles), lo cual arroja 12 niveles para ensayar las probetas. En consulta con expertos del AMRC, se ratifica la preferencia por este tipo de diseño debido a las facilidades existentes para el análisis posterior de datos y a la factibilidad de espacio en el material para producir doce discos con distinta manufactura, ver Tabla 4-4.

Tabla 4-3: Parámetros de corte y los niveles de variación para cada uno. Elaboración propia

	Velocidad de Corte [m/min]	Profundidad de Corte [mm]	Avance [mm/rev]	Condición de Herramienta
1	60	0,15	0,1	NUEVA
2	100	0,3	0,2	DESGASTADA
3	140	0,45	0,3	

Finalmente, se decide implementar el diseño factorial fraccionado con los parámetros señalados, lo cual está representado como la sección derecha de la Tabla 4-4 y define los arreglos empleados en la confección de los discos, y con ello, de las probetas a ser estudiadas. Además se incluye una columna que le asigna aleatoriamente cierto disco a cada especificación del diseño. De aquí en adelante se identifica cada uno de los arreglos del diseño, con el número de esa especificación.

Tabla 4-4: Arreglos ortogonales para diseños de Taguchi L9 y Factorial Fraccionado. Elaboración propia.

Taguchi L9					Factorial Fraccionado					
Esp.	v_c	a_p	f_n	Cond.	Especificación	v_c	a_p	f_n	Cond.	Disco
1	60	0,15	0,1	Nueva	1	60	0,15	0,1	Nueva	1
2	60	0,3	0,2	Nueva	2	60	0,45	0,1	Usada	6
3	60	0,45	0,3	Usada	3	140	0,15	0,1	Usada	12
4	100	0,15	0,2	Usada	4	140	0,45	0,1	Nueva	3
5	100	0,3	0,3	Usada	5	100	0,3	0,2	Nueva	11
6	100	0,45	0,1	Nueva	6	100	0,3	0,2	Nueva	9
7	140	0,15	0,3	Nueva	7	100	0,3	0,2	Usada	7
8	140	0,3	0,1	Usada	8	100	0,3	0,2	Usada	5
9	140	0,45	0,2	Nueva	9	60	0,15	0,3	Usada	4
					10	60	0,45	0,3	Nueva	8
					11	140	0,15	0,3	Nueva	10
					12	140	0,45	0,3	Usada	2

4.3 Resultados de fabricación

En esta sección presenta los resultados necesarios para referenciar y complementar al diseño experimental. El primer conjunto de resultados es obtenido del acondicionamiento de las herramientas que son desgastadas antes del corte final. También se presenta el resultado de un ensayo de tracción para encontrar los valores de resistencia máxima a la tracción.

4.3.1 Desgaste de la herramienta

El desgaste de la herramienta se mide como una variación del desgaste en los bordes de alivio y ataque entre la situación inicial y final del corte. Si bien se mide el desgaste en ambos bordes de la herramienta, para presentar las curvas de desgaste es conveniente solo calcular el desgaste máximo concordante: esto quiere decir que se cuantifica el desgaste máximo ya sea en el del borde de ataque o en el borde de alivio. De esta manera se maximiza el efecto que las condiciones de manufactura pueden tener sobre el desgaste de la herramienta. No se busca generar curvas de desgaste, ya que por un lado, la pasada de terminación es única y, por otro, interrumpir el mecanizado para desmontar la herramienta y medir el desgaste, es altamente consumidor de tiempo y poco práctico. Además escapa a los alcances del estudio, ya que solo se cuantifica el desgaste total en el corte como indicador de la intensidad del corte en cuanto a fuerzas y energías empleadas y su efecto en la fatiga.

La Tabla 4-5 muestra los resultados para los desgastes de herramientas, donde NCP corresponde a las herramientas nuevas, mientras que las WCP son aquellas que tienen un desgaste previo. Los dos valores para cada número del arreglo corresponden a las dos secciones del disco, una superior y la otra inferior.

Tabla 4-5: Resultados para los desgastes de herramientas. Elaboración propia.

Especificación	Inserto	DESGASTE MAXIMO EN BORDES CONCORDANTES		
		Pre Corte [mm]	Post Corte [mm]	Variación de Desgaste [mm]
1	NCP.1 IZQ.	--	0,111	0,111
	NCP.1 DER.	--	0,094	0,094
5	NCP.2 IZQ.	--	0,077	0,077
	NCP.2 DER.	--	0,111	0,111
6	NCP.3 IZQ.	--	0,150	0,150
	NCP.3 DER.	--	0,124	0,124
4	NCP.4 IZQ.	--	0,179	0,179
	NCP.4 DER.	--	0,162	0,162
11	NCP.5 IZQ.	--	0,141	0,141
	NCP.5 DER.	--	0,098	0,098
10	NCP.6 IZQ.	--	0,111	0,111
	NCP.6 DER.	--	0,120	0,120
9	WCP-1 IZQ.	0,132	0,149	0,017
	WCP-1 DER.	0,132	0,162	0,030
8	WCP-2 IZQ.	0,141	0,167	0,026
	WCP-2 DER.	0,141	0,158	0,017
7	WCP-3 IZQ.	0,145	0,158	0,013
	WCP-3 DER.	0,137	0,162	0,025
2	WCP-4 IZQ.	0,137	0,154	0,017
	WCP-4 DER.	0,137	0,149	0,012
12	WCP-5 IZQ.	0,137	0,508	0,371
	WCP-5 DER.	0,128	0,265	0,137
3	WCP-6 IZQ.	0,137	0,175	0,038
	WCP-6 DER.	0,137	0,158	0,021

En la Figura 4.10 se ilustra la evolución del desgaste para las distintas probetas fabricadas, considerando la condición inicial y final de la herramienta.

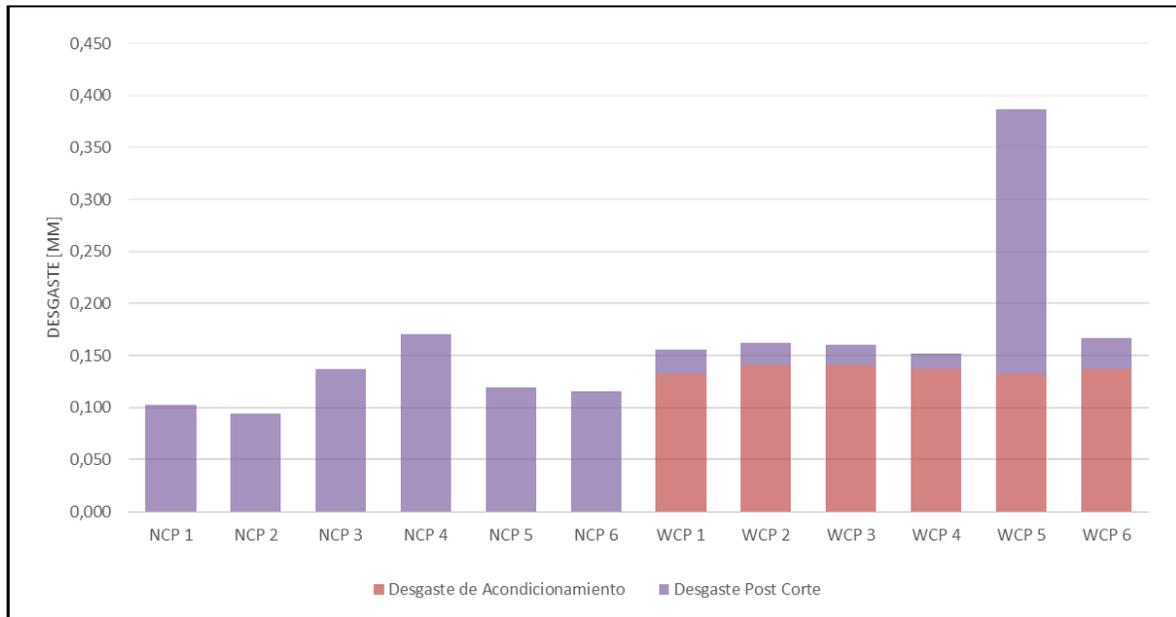


Figura 4.10: Grafico de desgaste de las herramientas. Elaboración propia.

En primer lugar, se observa una neta diferenciación entre el desgaste asociado al corte de terminación entre las herramientas nuevas y las previamente desgastadas. Las nuevas tienen un desgaste de terminación mayor que las acondicionadas. La explicación para este fenómeno tiene que ver con que las herramientas nuevas presentan una elevada tasa de desgaste inicial antes de alcanzar un nivel más estable, asociado a la zona I de la curva S de desgaste de herramientas (Figura 2.11). En segundo lugar, se observa que el desgaste de la herramienta WCP-5, la cual corresponde a la especificación 12 del diseño experimental, escapa claramente al comportamiento del resto de las muestras. Esto se debe a que el agresivo corte asociado (valores máximos de todos los parámetros), además de tener una herramienta con desgaste previo, genera un falla en la herramienta por quiebre del borde de alivio y que, por lo tanto, también escapa al criterio de desgaste al tratarse de una falla de la herramienta, ver Figura 4.12.

Otra observación relevante tiene que ver con los niveles totales de desgaste posterior al corte, ya que, como es de esperarse estos son mayores en las herramientas previamente desgastadas; sin embargo en un par de casos, NCP-4 y NCP-3, se presentan niveles similares. Aun así, esta observación deja ver que el efecto del desgaste previo está bien contemplado en la manufactura de los discos ya que el nivel impuesto fue tal que superó levemente los niveles máximos de las herramientas nuevas.

Otra forma de observar que efectivamente las herramientas están trabajando en distintas zonas de la curva de desgaste es graficando el desgaste en función del tiempo total de corte. Para generar el gráfico de la Figura 4.11 se utiliza el desgaste al comenzar el corte final de la especificación, el desgaste después del corte final y el tiempo empleado en el corte final. Se observa claramente la disminución en la tasa de desgaste para aquellas herramientas que se acondicionan previamente respecto de las nuevas. Se excluye los resultados para la herramienta WCP-5 que presenta una falla e incurre en la zona III de la curva de desgaste y no tiene sentido visualizar una tasa de desgaste en ese caso.

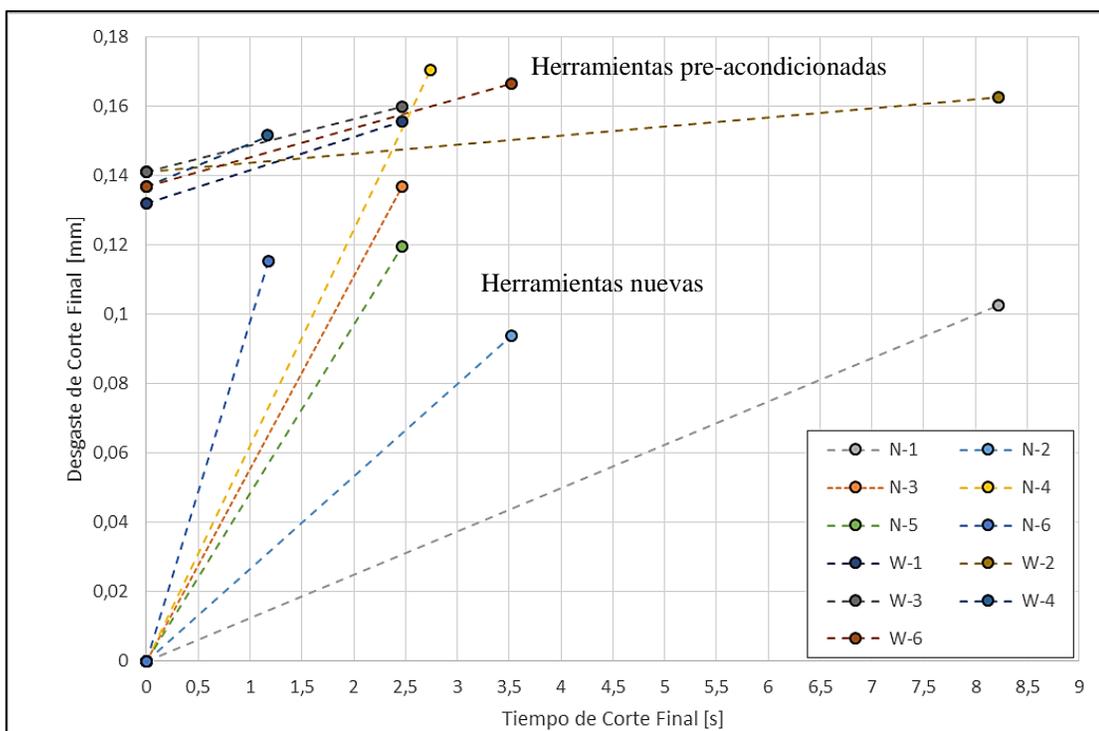


Figura 4.11: Desgaste versus tiempo de corte final de las herramientas nuevas y pre-acondicionadas. Elaboración propia

Por último, tras observar las condiciones de la herramienta NCP-2, correspondiente a la especificación 5, ver Tabla 4-4, se observa que la operación de torno en la cara superior se realizó con un “override” de avance de 100% por parte del operario del centro de mecanizado, Esto ocurrió por un error inadvertido inicialmente y que hace descartar los resultados de dicho disco para los estudios posteriores, al contar con una cara de avance normal (0,2 [mm/rev]) y la otra con el doble, es decir, 0,4 [mm/rev]. Afortunadamente, la especificación 5 corresponde a un punto central del diseño del experimento y por ello cuenta con una repetición de las condiciones en la especificación 6.



Figura 4.12: Imagen de falla de herramienta WCP-5

4.3.2 Ensayo de tracción

Ante la necesidad de referenciar las propiedades mecánicas del material para estimar la vida a la fatiga con distintos niveles de carga, se realizó un ensayo de tracción con el fin de establecer el valor de la resistencia máxima a la tracción (UTS). Si bien se disponen de los valores nominales para la aleación de Ti-6Al-4V, se debe verificar y obtener los resultados propios a la aleación trabajada. Con esto presente, de las seis probetas generadas por disco, se seleccionan cuatro para ensayos de fatiga y dos para calibrar los equipos, el ensayo de tracción y cualquier otra operación que requiera de alguna probeta extra. Para acelerar la obtención de esta medición y por asuntos presupuestarios, se deja afuera la instrumentación de un extensómetro en el largo útil de la probeta. Si bien, para la determinación física más precisa de las características mecánicas del material esto presenta un impedimento, para efectos prácticos los errores asociados a no considerar la deformación de las zonas adyacentes al cuello y al acople son poco relevantes. Esto, porque en el cálculo de la resistencia a la tracción UTS, importa la carga máxima y no así la elongación a la que ocurre.

La Figura 4.13 muestra la curva esfuerzo deformación asociado a un largo útil de 15 [mm]. La sección transversal es de 48.78 [mm²]. La resistencia máxima a la tracción corresponde a un valor de 945,7 [MPa]. Ello se encuentra por sobre las condiciones mínimas establecidas por la norma ASTM presentada anteriormente [11].

Secundariamente e independiente que si bien no se pueden adoptar los resultados obtenidos desde el gráfico de esfuerzo-deformación obtenido por no contar con el extensómetro, se proyecta el criterio para el límite de fluencia convencional del 0,2%, obteniéndose un valor de 823,5 [MPa], lo cual está claramente en el rango propuesto para la aleación.

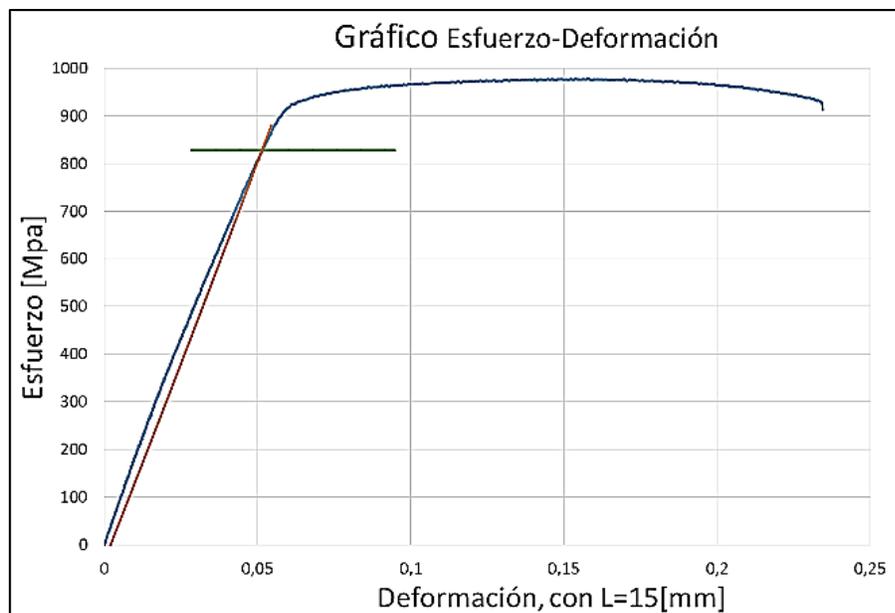


Figura 4.13: Gráficos del ensayo de tracción. Elaboración propia.

Estos resultados del ensayo de tracción arrojan que la aleación se comporta de manera adecuada y sus propiedades mecánicas se encuentran dentro del rango establecido para este tipo de aleación. Luego es posible usar estos resultados para referenciar la curva de carga para el ensayo de fatiga.

4.4 Rugosidad superficial

Las secciones anteriores presentan los resultados que acondicionan los parámetros de corte como variables manipuladas para la realización de los ensayos. Más bien la rugosidad superficial, en este caso, es una variable de respuesta al cambio de estos parámetros de corte, la cual tiene distintos métodos para su lectura e interpretación, como también aproximaciones teóricas. Así, rugosidad superficial de cada disco se mide con dos métodos; el primero corresponde a un perfilómetro de contacto, mientras que el segundo es mediante microscopía óptica digital con el Alicona Infinite Focus G5. En ambos casos se utiliza la rugosidad media aritmética (R_a) la cual se rige bajo la norma ISO 4288-1996 y fija la longitud de onda de corte dependiendo de la rugosidad objetivo. En este caso, remontando a la ecuación (2.32) de la sección 2.1.3 y reemplazando los valores de avance escogidos, se tiene que:

$$R_a \cong \begin{cases} 0,1069 \text{ } [\mu\text{m}] & f = 0,1 \text{ } [\text{mm}/\text{rev}] \\ 0,4278 \text{ } [\mu\text{m}] & f = 0,2 \text{ } [\text{mm}/\text{rev}] \\ 0,9629 \text{ } [\mu\text{m}] & f = 0,3 \text{ } [\text{mm}/\text{rev}] \end{cases}$$

Donde R es el radio de punta de la herramienta, en este caso tiene un valor constante de 3 [mm] y f es el avance por revolución. Estos son los valores nominales de una superficie ideal.

Para este rango de rugosidad esperado, la norma fija la longitud de onda de corte en 800 [μm] y se utilizará tanto en el perfilómetro de contacto como en los resultados de la microscopía óptica. Se adopta esta medida para estandarizar la medición de la rugosidad a la práctica común en la industria ya que los perfilómetros de contacto no suelen trabajar con longitudes de corte variables, y también se rigen por normas y estándares.

4.4.1 Perfilómetro de contacto

El perfilómetro empleado corresponde a un Mitutoyo SJ-210, mostrado en la Figura 4.14, el cual tiene la ventaja de efectuar mediciones de rugosidad de forma rápida y sencilla.

Debido a la geometría de la probeta ensayada, no es posible efectuar una medición de rugosidad en la zona central de la probeta por lo que se realizan mediciones de rugosidad tanto en las zonas radialmente exterior e interior de cada disco. Por cada zona se realizan seis mediciones de rugosidad y por ende cada especificación cuenta con 24 mediciones. Los resultados individuales de todas las mediciones se encuentran en la sección B del anexo, mientras que en la Figura 4.15 se presenta el gráfico que resume estos resultados, presentando los promedios para cada especificación de las zonas medidas. Se grafica también el promedio global de la especificación, para observar las diferencias en cada una de las caras del disco y su distribución, para cada especificación del diseño experimental. La primera observación que se desprende es que los valores de rugosidad es que aquellas especificaciones de menor avance presentan menores niveles de rugosidad que las de mayor avance. Las especificaciones 1-2-9-10 (correspondientes a un avance de 0.1 [mm/rev]) presentan una rugosidad en torno a los 0.35 [μm], mientras que las de un avance 0.2 [mm/rev] (especificaciones 5 a la 8) se sitúan en torno a una rugosidad de 0.58 [μm]. Finalmente, aquellas probetas fabricadas con el mayor avance de 0.3 [mm/rev] (3-4-11-12), centran su rugosidad cerca de los 0.97 [μm].

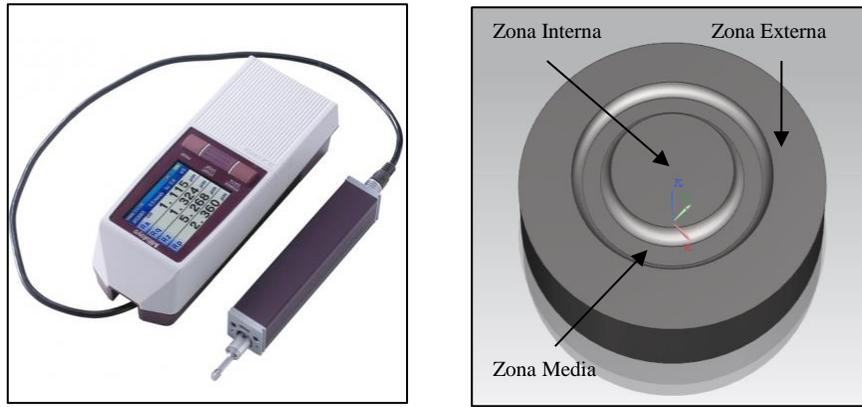


Figura 4.14: Perfilómetro de contacto Mitutoyo SJ-210 y zonas de medición. Catálogo Mitutoyo y elaboración propia

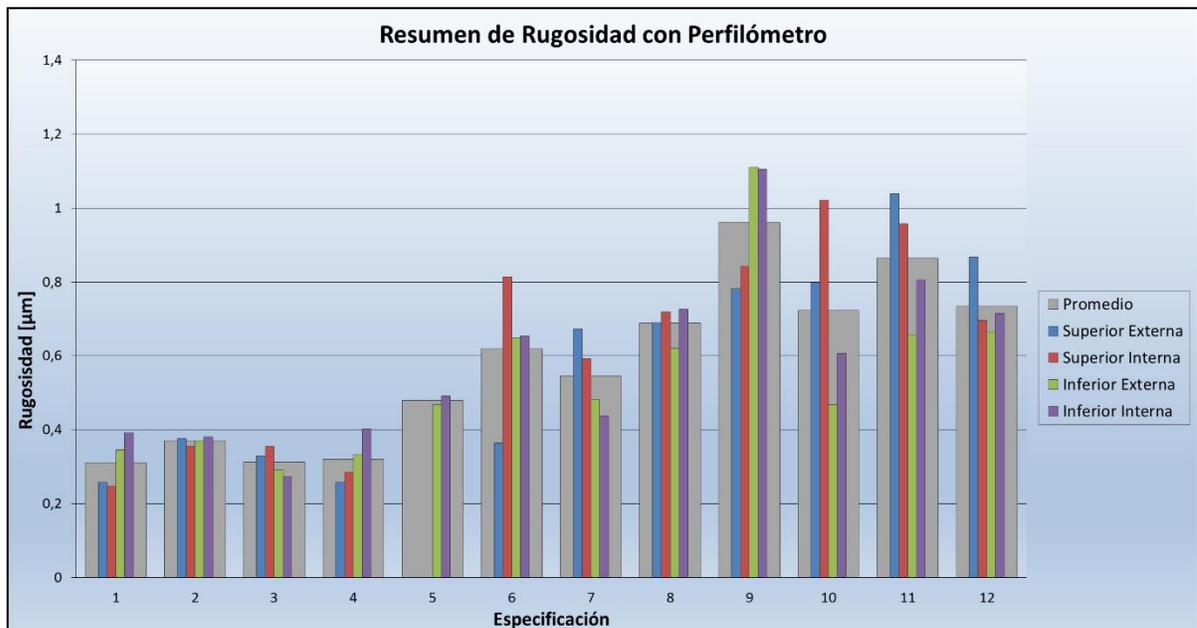


Figura 4.15: Grafico de las rugosidades con perfilómetro para cada especificación del diseño experimental. Elaboración propia.

4.4.2 Microscopía óptica digital

Para complementar y comparar los resultados del método de contacto, se utiliza el microscopio digital Alicona Infinite Focus G5, el cual permite generar un barrido sobre la superficie y almacenar los perfiles topográficos y efectuar técnicas de refinación. Se realiza una medición en cada lado del disco y se almacenan los datos del perfil topográfico y la rugosidad a $800[\mu\text{m}]$. Tras aplicar los métodos de corrección de forma y filtros, se recopilan los datos y se presenta un gráfico que compara los datos con los del rugosímetro y se marca también la aproximación teórica.

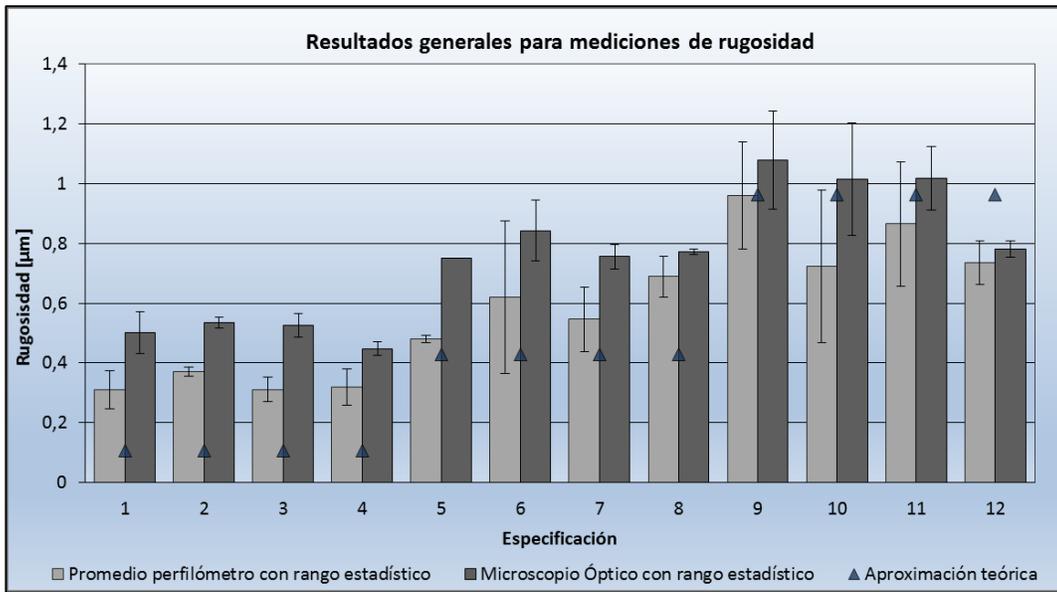


Figura 4.16: Comparación de los datos de rugosidad con ámbos métodos y la aproximación teórica. Elaboración propia.

En la Figura 4.16 se presentan los resultados por especificación del diseño experimental. Las barras corresponden al valor medio de cada método junto al rango estadístico de las muestras y la viñeta triangular es la aproximación teórica de arco elíptico empleada. Los datos agrupados hasta el momento se resumen en la Tabla 4-6 y muestra, junto a los parámetros de corte de cada especificación del diseño, los resultados parciales de rugosidad y desgaste de la herramienta.

Tabla 4-6: Resumen de resultados de rugosidad para cada especificación. Elaboración propia.

Esp.	Diseño experimental				Desgaste [mm]		Corte	Rugosidad media [μm]		
	f_n [mm/rev]	a_p [mm]	v_c [m/min]	C.H.	Desgaste de corte	Desgaste Total	Tiempo de corte [min]	Contacto	Óptico	Teórico
1	0,1	0,15	60	N	0,1025	0,1025	8,224	0,3105	0,5007	0,1069
2	0,1	0,45	60	U	0,0145	0,1515	8,224	0,3700	0,5352	0,1069
3	0,1	0,15	140	U	0,0295	0,1665	3,524	0,3118	0,5262	0,1069
4	0,1	0,45	140	N	0,1705	0,1705	3,524	0,3194	0,4480	0,1069
5	0,2	0,3	100	N	0,094	0,094	2,467	0,4795	0,7515	0,4278
6	0,2	0,3	100	N	0,137	0,137	2,467	0,6199	0,8422	0,4278
7	0,2	0,3	100	U	0,019	0,16	2,467	0,5459	0,7551	0,4278
8	0,2	0,3	100	U	0,0215	0,1625	2,467	0,6885	0,7709	0,4278
9	0,3	0,15	60	U	0,0235	0,1555	2,741	0,9601	1,0781	0,9629
10	0,3	0,45	60	N	0,1155	0,1155	2,741	0,7233	1,0139	0,9629
11	0,3	0,15	140	N	0,1195	0,1195	1,175	0,8645	1,0182	0,9629
12	0,3	0,45	140	U	0,254	0,3865	1,175	0,7350	0,7800	0,9629

4.4.3 Relación con las variables

En esta sección se presentan los gráficos y resultados de la influencia de cada variable sobre la rugosidad superficial. En la Figura 4.17 se muestran los gráficos que se generan a partir de una proyección de los resultados de rugosidad sobre cada una de las variables de corte del diseño experimental y se grafica también la respuesta de la rugosidad con respecto del desgaste total de la herramienta en el corte.

Se desprende directamente, que la variable que presenta la relación más evidente con la rugosidad corresponde al avance. Debido a que se genera un escalonamiento en tres niveles de cada parámetro de corte, no es posible entregar una expresión certera sobre la respuesta y la ecuación que gobierna la rugosidad, ya que si bien por un lado, la aproximación teórica asocia la rugosidad a una expresión cuadrática del avance, la relación graficada puede ser interpretada con una relación lineal.

Esta última observación se vuelve a comprobar utilizando el software de análisis de experimentos Modde, el cual también sugiere una respuesta de rugosidad altamente influida por la relación lineal del avance, más que por el cuadrado del mismo.

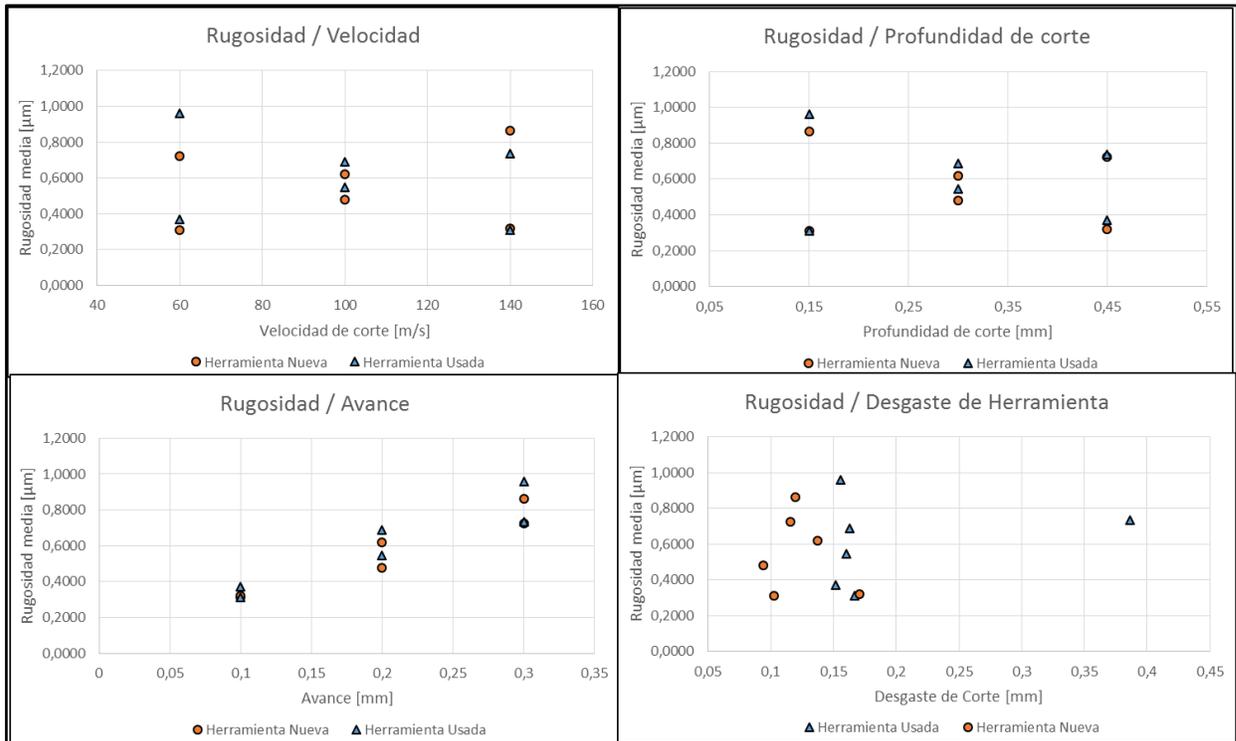


Figura 4.17: Gráficos para la respuesta de la rugosidad sobre cada una de las variables de corte. Elaboración propia.

Debido a que son solo tres los puntos por cada parámetro de corte, el ajuste de una función que relacione las variables con la rugosidad no es científicamente riguroso ya que un gran número de modelos son capaces de ser ajustado con alta fidelidad. Por ejemplo, una relación lineal y una cuadrática van a desprender grandes niveles de ajuste a los datos y por ello no se presenta como una actividad relevante.

4.5 Ensayos de fatiga

El equipo donde se realizan los ensayos corresponde a un banco de pruebas de fatiga axial Instron 8801, el cual es un equipo especializado para rangos hasta los 100 [kN]. La frecuencia de ensayo se fija en 10 [Hz] con un control en fuerza. Debido a que las secciones transversales de las probetas son variables, calibrar el sistema de ensayo a cada una requiere de un tiempo adicional al ensayo, se prefiere fijar inicialmente la carga máxima en un valor tal que entregue una vida a la fatiga cercana a los 10^4 ciclos.

En las subsecciones que siguen, se presentan los resultados para la determinación de cargas, los resultados del número de ciclos y los resultados de deformación y endurecimiento.

4.5.1 Determinación de cargas

Al contar con cuatro probetas por especificación del diseño experimental se establece que para los grupos A y B la carga impuesta debe acercarse al rango de los 10^4 . Utilizando las ecuaciones de la ley de alto ciclo (2.14), las constantes dadas por (2.15) (2.16), se obtiene que para 10^4 ciclos, el esfuerzo completamente reversible alternante se encuentra entre 822,4 [MPa] y 710.7 [MPa], utilizando el criterio de Sodeberg (2.17) o Goodman-modificado (2.18) respectivamente. Se estima entonces que una carga máxima de 40 [kN], a través de una sección transversal de 50 [mm²] (~800 [MPa]), entrega resultados nominales de fatiga en este rango.

La Figura 4.18 muestra la ubicación del diseño experimental en relación a los criterios escogidos y un límite de resistencia a la fatiga nominal descrito por la ecuación (2.7). Se observa que se ubica levemente sobre el criterio de Gerber (menos conservador) implicando que la situación descrita por el diseño experimental tiene riesgo de falla por fatiga, lo cual es precisamente lo que se busca en esta experiencia.

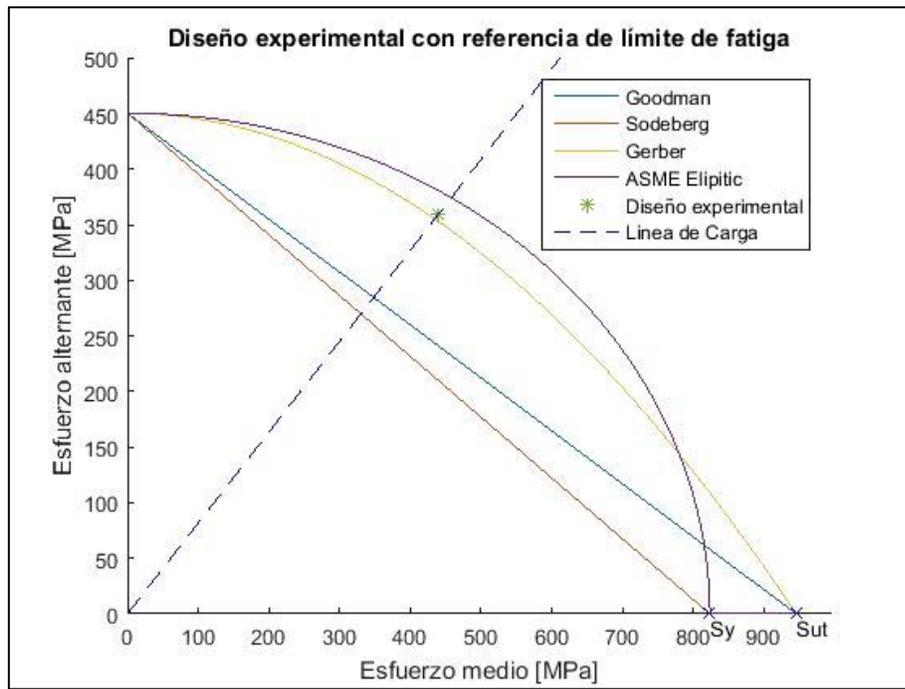


Figura 4.18: Referencia del diseño experimental con criterios de fatiga y proyecciones del esfuerzo alternante equivalente. Elaboración propia.

Para observar una diferenciación entre cada especificación en un comportamiento más global del espectro de comportamiento de cargas y ciclos, se decide por aumentar levemente la carga del grupo C y disminuir la del grupo D. Los valores propuestos se presentan en la Tabla 4-7, la cual muestra también los valores máximos y mínimos medio de cada grupo.

Tabla 4-7: Cargas propuestas para cada grupo nominales y las cargas medias obtenidas. Elaboración propia.

Grupo	Cargas Nominales, R=0.1		Cargas Medias Obtenidas		
	Carga máxima [kN]	Carga mínima [kN]	Carga máxima [kN]	Carga mínima [kN]	R
A	40	4	40.02	3.97	0.099
B	40	4	40.02	3.96	0.099
C	43	4.3	42.95	4.28	0.100
D	38	3.8	39.03	3.97	0.102

4.5.2 Numero de ciclos de falla

La recopilación de datos para los ensayos de fatiga corresponde a la obtención dos archivos CSV desde el banco de pruebas. El primero corresponde a los últimos 10 ciclos antes de la falla, mientras que el segundo corresponde a una compilación de la tendencia del ensayo, la cual registra los rangos de carga y posición en el tiempo, en 10 intervalos para cada orden de magnitud del número de ciclos.

El primer esquema gráfico que se presenta en la Figura 4.19 corresponde a una identificación por grupo de todos los ensayos realizados en un plano esfuerzo máximo y número de ciclos a la falla (presentado en escala semilogarítmica).

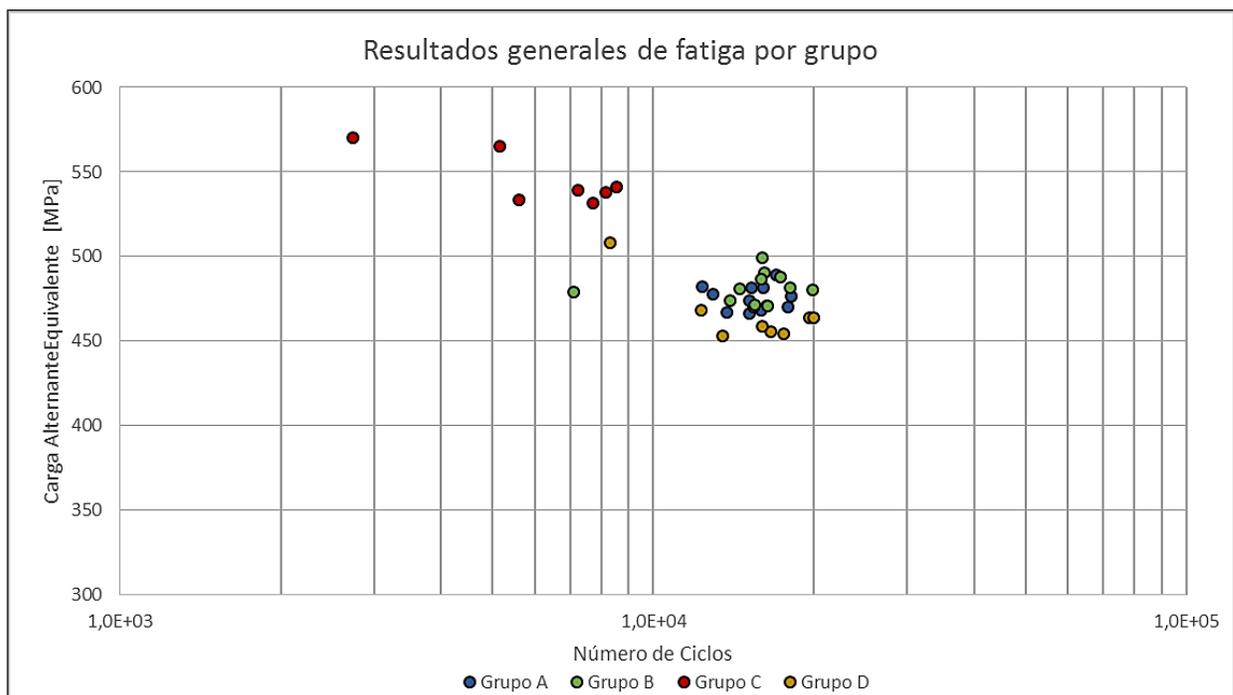


Figura 4.19: Gráfico S-N de los ensayos de fatiga, separado por grupos de prueba. Elaboración propia.

Al hacer una diferenciación por el avance de la especificación y presentando el comportamiento general de fatiga obtenido para cada una de ellas, se obtiene la Figura 4.20, el cual muestra una viñeta identificadora para cada nivel de avance en las especificaciones. Así, los triángulos corresponden a un avance de 0.1 [mm/rev], los cuadrados al avance de 0.2 [mm/rev] y los círculos para los casos con 0.3 [mm/rev] de avance.

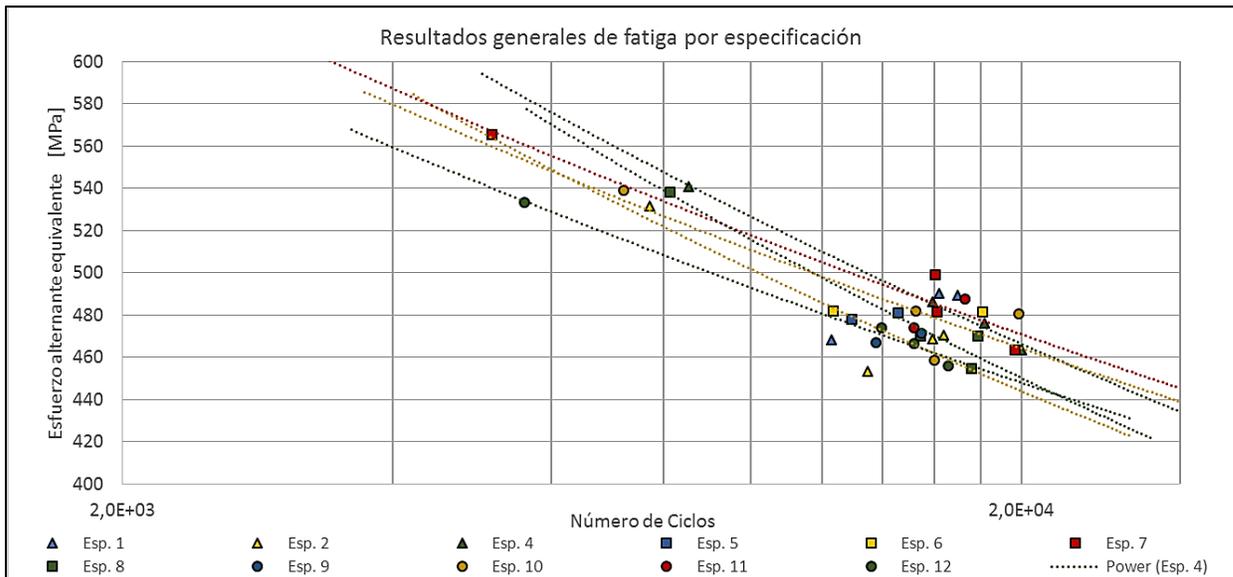


Figura 4.20: Gráfico general de los resultados de fatiga identificando la especificaciones. Elaboración propia.

Sobre la base de este gráfico, se procede a realizar una ampliación en la zona de interés identificando ahora la especificación correspondiente y su rugosidad con escala de colores, presentado en la Figura 4.21.

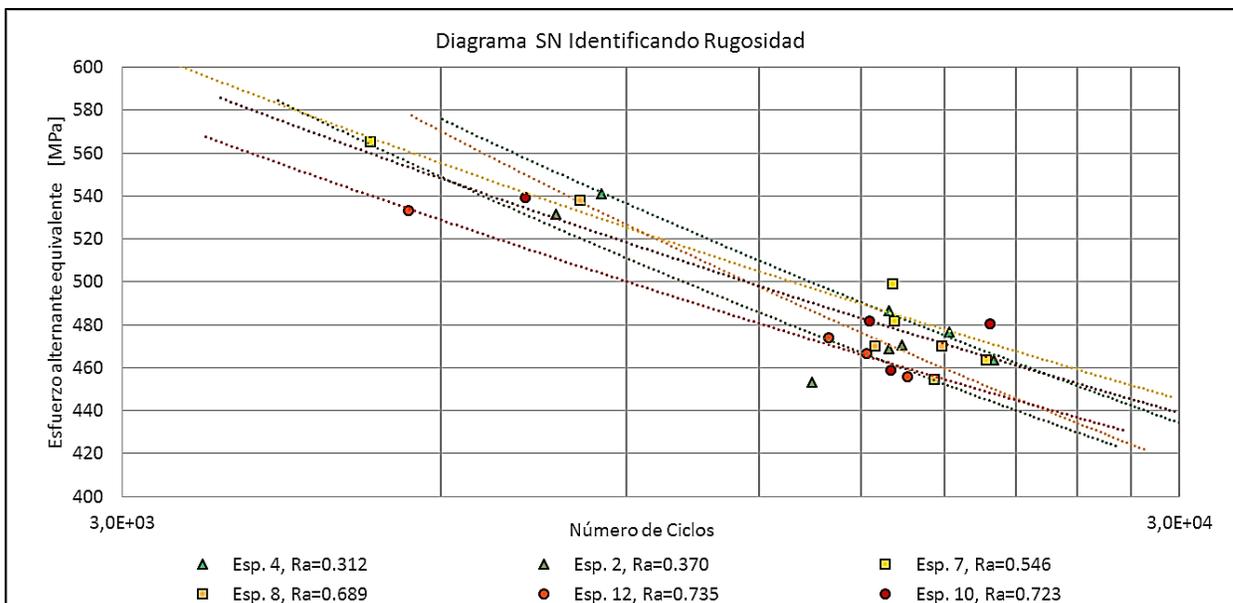


Figura 4.21: Gráfico S-N, identificando la especificación y una proyección exponencial. Elaboración propia.

Se observa directamente que el comportamiento de las probetas se establece sobre una banda de tendencia marcada, con desviaciones tanto de desplazamiento como de pendiente.

Lo primero que se observa de esta muestra es que para menor número de ciclos, las probetas de mayor rugosidad entregan menores niveles de carga. Al aumentar el número de ciclos, esta relación tiene a disminuir su influencia y hay mayor traslape entre los comportamientos de todas las probetas.

La especificación 12 corresponde a la de manufactura más agresiva y es la que presenta una falla de la herramienta. Si bien, no presenta los niveles más altos de rugosidad, si presenta el peor comportamiento a la fatiga, indicando que el desgaste excesivo de la herramienta imparte otro factor sobre la probeta (distinto a la rugosidad), que disminuye su vida a la fatiga. Esto se puede deber a los esfuerzos residuales por deformación o por alzas excesivas de temperatura. Sin embargo, definir y asociar este efecto a un fenómeno.

A modo de presentar los efectos de la rugosidad sobre el comportamiento de fatiga, se grafica el número de ciclos esperado para cada especificación en función de la rugosidad superficial para distintos niveles de esfuerzo. La Figura 4.22 muestra el cambio en el comportamiento del número de ciclos esperado como función de la rugosidad. La escala ordenada del número de ciclos es logarítmica.

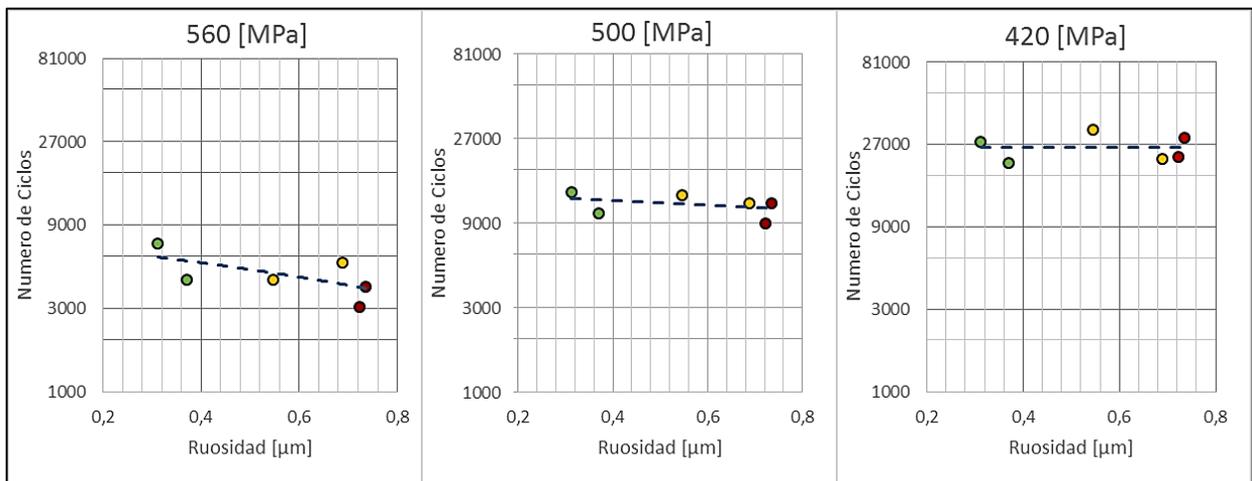


Figura 4.22: Curvas de numero de ciclos en funcion de la rugosidad para distintos niveles de esfuerzo. Elaboración propia

Se observa como para niveles inferiores de esfuerzo, la cantidad de ciclos a la falla presenta una relación levemente decreciente con la rugosidad. Para niveles mayores de esfuerzo, el número de ciclos aumenta, pero también parece ser menormente influido por la rugosidad.

4.5.3 Desplazamiento, deformación y endurecimiento

Un resultado importante que se obtiene desde el banco de pruebas, corresponde a los valores de desplazamientos máximos y mínimos para los diez intervalos en cada orden de magnitud. A modo de ejemplo, se presenta en la Figura 4.23 los gráficos de desplazamiento y deformación en el tiempo para la probeta 6B.

El comportamiento representado por esta probeta es bastante característica del resto (ver Anexo C) y muestra por un lado, el desplazamiento neto máximo y mínimo y, por otro, la deformación máxima y mínima respecto al largo útil de la probeta (15 [mm]). El comportamiento ascendente de estos parámetros se debe a un endurecimiento por deformación plástica del material ya que el régimen de fatiga es controlado en carga.

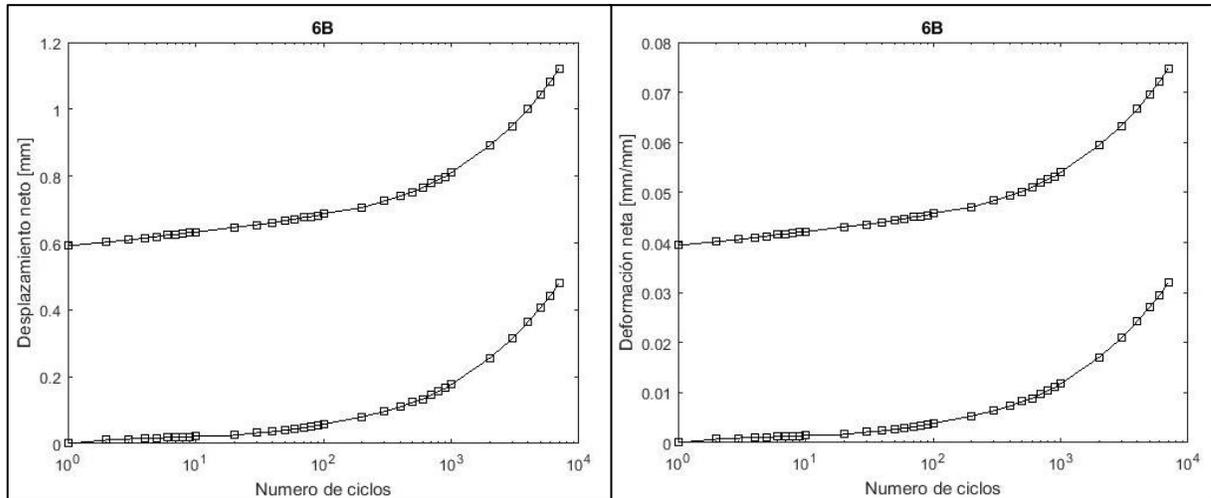


Figura 4.23: Gráficos de endurecimiento. Elaboración propia.

5 Discusiones

Esta sección complementa y profundiza las interpretaciones obtenidas de la presentación de resultados, exponiendo un análisis crítico sobre la profundidad e impacto de lo observado dentro de las limitaciones del proyecto respecto al rango de las condiciones de trabajo e incertidumbre de las mediciones. De esta forma, se segmentan las principales discusiones de acuerdo a los objetivos para concluir de manera ordenada sobre el cumplimiento de lo esperado.

5.1 Variables de corte e integridad superficial

A partir de la recopilación de antecedentes teóricos se desprende que las variables de corte que más influyen en la integridad superficial son la velocidad de corte, el avance, la profundidad de corte y el radio de punta de la herramienta. Estas cuatro variables inciden directamente sobre la rugosidad superficial y en el estado de esfuerzos residuales. Más aún, se presentan expresiones teóricas que integran estas variables para el cálculo nominal de rugosidad superficial. Sin embargo, pasando al plano experimental, y ya que los alcances del proyecto limitan el estudio de la integridad superficial netamente a la rugosidad por asuntos de recursos temporales y monetarios, se observa una marcada predominancia del avance por revolución como principal parámetro de corte que determina la rugosidad superficial.

El radio de punta de la herramienta no se presenta como una de las variables del diseño experimental, sino que se adopta el desgaste de la herramienta como variable, y en este caso, el desgaste no se diferencia como una variable de elevada influencia en la rugosidad. Como se puede observar en la Figura 4.17, donde los valores de rugosidad para distintos niveles de desgaste indica que no domina en la respuesta de la rugosidad superficial. Es más, la herramienta de las condiciones más severas de mecanizado, que de hecho presenta niveles de falla en la herramienta, no necesariamente incide en niveles mayores de rugosidad. Una posible explicación a este fenómeno puede ser el efecto “wiper” del desgaste de la herramienta, representado en la Figura 5.1. Si el desgaste de la herramienta altera el radio de punta del inserto asemejándolo a la geometría wiper y generando una sección más plana en las superficies de contacto del inserto tanto del borde de ataque como de alivio, se puede disminuir la rugosidad superficial resultante.

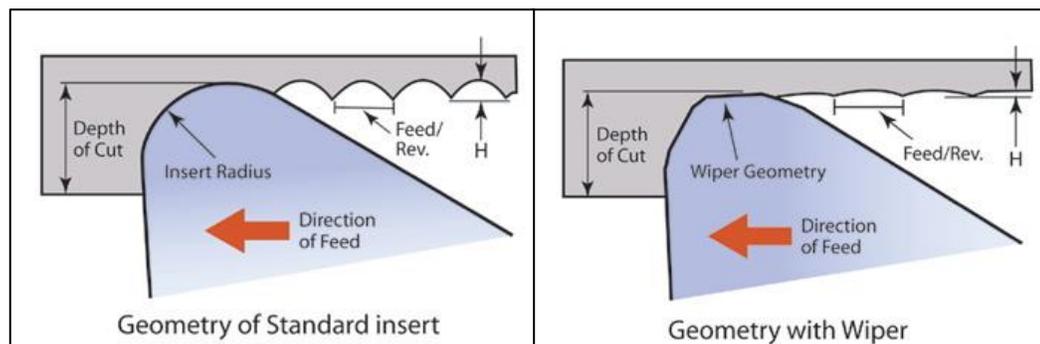


Figura 5.1: Esquema del efecto “wiper”. [26]

En conjunto con los resultados de la sección 4.2.1 y 4.4.3, sumados a los antecedentes presentados en 2.3.1, se concluye que el primer objetivo específico, relacionado con la identificación de las variables de corte que presentan mayor influencia sobre la integridad superficial, se logra satisfactoriamente.

Ahondando con los resultados analizados en la sección 4.4.2, se logra cumplir con el tercer objetivo específico permite generar una discusión sobre la variabilidad del resultado de rugosidad en cada uno de los métodos utilizado. Por un lado, el canal que utiliza el rugosímetro para realizar las mediciones es del tipo mecánico de contacto, en donde una punta que se pone sobre la superficie, se traslada para así poder captar la variación de altura a medida que sigue los picos y valles de la topología. La punta es usualmente de un material de alta dureza y cada medición deja sobre la superficie una traza por donde se deslizó la punta. Esto evidencia que la el rugosímetro altera, en cierta medida, la superficie estudiada al impartir pequeñas deformaciones que en conjunto generan esta traza.

De forma contraria, el método óptico permite realizar mediciones topográficas sobre la superficie sin existir un contacto con ella. Mediante la técnica confocal del microscopio, se puede definir con alta precisión el relieve estudiado. La principal desventaja de este método es que aceites y/o impurezas en la superficie alteran este valor, al igual que la reflectividad del material. Pese a realizar una suave limpieza de la superficie a ser estudiada, elementos traza aún puede estar presentes en la zona de medición.

En la comparación entre ambos métodos, se observa que pese a existir una clara tendencia del rugosímetro a entregar valores menores a los obtenidos por el sistema óptico, dentro de los rangos estadísticos obtenidos, existe una banda de resultados compartidos entre ambos métodos. La variabilidad estadística de este resultado es de suma relevancia ya que efectivamente los fenómenos metrológicos no son exactos para todas las zonas de la superficie de interés, sea por variabilidades en el material de base, como también por variaciones en el corte y herramienta.

5.2 Diseño experimental y fabricación

El diseño experimental del proyecto se conforma como la columna central del proyecto ya que en él recaen todas las decisiones sobre la conformación de las probetas y sus características de manufactura. En base a los objetivos del proyecto, con sus respectivas limitantes y condiciones, se conforma un diseño experimental robusto y bien ejecutado, el cual permite exitosamente segmentar los parámetros de corte en especificaciones fijas y definir las cargas a ser aplicadas. Se emplea un diseño factorial fraccionado de ocho niveles y doble centro, especificando doce arreglos para las variables de corte de fabricación. Su principal ventaja es el aprovechamiento de la mayor cantidad del material disponible y en la mayor cantidad de especificaciones.

Respecto a la fabricación de las probetas, se puede afirmar que se logra satisfactoriamente con el plan propuesto, el corresponde a un proceso complejo de fabricación al traspasar una operación de torno hacia una probeta de sección cuadrada y exige ahondar en la cantidad de procesos de manufactura necesarios y los recursos para acceder a ellos. Los grandes problemas presentados en el mecanizado de las probetas corresponden, por un lado, a un error de fabricación en la especificación 5, la cual fue mecanizada con el doble de avance en una de sus caras y, por ende, no permite utilizar los datos de fatiga de esas probetas. También, el otro error que se obtiene es que una de las herramientas (WCP-5/especificación 12) presenta niveles de desgaste sobre el límite de falla, incurriendo entonces, en la zona III de la curva de desgaste.

El desarrollo de actividades complementarias al ensayo de fatiga se realizan con éxito. Por un lado, la realización del ensayo de tracción se realiza de forma no convencional en la instrumentación requerida, debido a que el valor que se busca es el UTS y el cual prescinde del valor estricto de deformación. Se obtiene un valor dentro de los rangos aceptados para la aleación utilizada. En

cuanto al acondicionamiento de las herramientas, esta actividad también se realiza de manera exitosa, ubicando las herramientas acondicionadas en la zona II de la curva de desgaste, mientras que las nuevas necesariamente incurren en la zona I.

Con las condiciones previas al ensayo de fatiga definidas, se realiza un cálculo con distintos criterios para estimar la carga necesaria para inducir una vida a la fatiga cercana a los 10^4 ciclos. Se decide optar por los rangos superiores de los valores de esfuerzo alternante equivalente y se fija la carga máxima inicial en 40 [kN]. Con estos parámetros definidos se logra el segundo objetivo específico, el cual busca definir un diseño experimental que determine los procesos necesarios para realizar pruebas de fatiga en probetas con parámetros de corte específicos. Se logra dar una buena base para decidir cuáles son los parámetros, cuánto y cómo se deben variar, el número de probetas a ser estudiadas y las cargas.

5.3 Vida a la fatiga

El grupo de resultados más relevantes que se desprenden de este proyecto corresponde a los datos de vida a la fatiga, presentados en las gráficas SN de la sección 4.5. Por un lado, se observa que hay un comportamiento bastante similar a lo esperado inicialmente, con una buena aproximación al número de ciclos a la falla para la carga propuesta. Al momento de estudiar las respuestas a la fatiga de las especificaciones, teniendo en cuenta la rugosidad superficial presentada, se observa un comportamiento en banda con diferenciación entre ellas, tanto de pendiente como de localización. Las muestras de mayor rugosidad se presentan menores cargas en el rango menor del número de ciclos, lo cual induce a que mientras mayor es el nivel de esfuerzo alternante equivalente, el efecto que tiene la rugosidad se hace mayor. A menores niveles, los resultados muestran una mayor heterogeneidad en cuanto a los ciclos soportados. Este efecto se debe a que a mayores niveles de esfuerzo, la plasticidad y las irregularidades superficiales aportan a la nucleación de grietas y, por ende, a disminuir la vida a la fatiga soportado.

Un último punto de discusión de alta relevancia, tiene que ver con que los datos totales para la vida a la fatiga en función del esfuerzo máximo (a diferencia del alternante equivalente), presenta una mayor pendiente general que lo esperado mediante los criterios ASME, Goodman y Gerber. Esto se debe a que el rango donde se trabaja existe una elevada plasticidad de la probeta (representado en los gráficos de endurecimiento), y por ende asociar una ley de Basquin pura para la vida a la fatiga es poco adecuado. Las nuevas tendencias científicas del área, han permitido generar una aproximación mediante energías totales, lo cual involucra tanto las leyes de Basquin, como la de Coffin-Manson en una ley unificadora para la fatiga. En la medida que se implemente un extensómetro para correctamente medir la deformación, se puede realizar esta aproximación con mejor precisión.

De esta forma, se logra concluir con el cuarto objetivo específico propuesto y también con el objetivo general del proyecto, al contar con la serie de resultados preliminares que decantan en los resultados de fatiga. Se concluye que para bajos niveles de vida, los efectos superficiales toman una mayor influencia, y con el avance por revolución pasa a ser un parámetro de extrema importancia. La diferenciación de las otras variables no es completamente evidente, pero son menores comparadas al avance.

6 Conclusiones

El objetivo general de este trabajo busca la relación entre las variables de corte en torno y la vida a la fatiga de una muestra de Ti-6Al-4V. Esto se logró mediante la ejecución de un diseño experimental de un ensayo de fatiga axial. De forma específica, las principales conclusiones son:

- Se logra identificar que el estado de la superficie incide en la vida a la fatiga mediante dos componentes principales: la rugosidad y el estado de esfuerzo residual.
- Este trabajo se enfocó en la rugosidad superficial como respuesta a los parámetros de corte en torno, arrojando que el avance por revolución es la variable más importante. Las otras variables estudiadas, velocidad de corte, profundidad de corte y desgaste de herramienta, no presentaron una marcada diferenciación en su respuesta sobre la rugosidad.
- El método empleado en la medición de rugosidad incide en la precisión de los datos obtenidos y la variabilidad estadística es un factor importante en la medición de este parámetro. Se asocian las diferencias entre el método óptico y el de contacto a los niveles de resolución horizontal y a la interacción con el material. El método óptico entrega, en general, mayores niveles de rugosidad. El método de contacto permitió generar mayor número de mediciones y se observa una variabilidad estadística relevante en el conjunto de resultados.
- Mediante el criterio de Gerber y Sodeberg se logra aproximar adecuadamente la carga para obtener vidas de fatiga cercanas a los 10.000 ciclos. El comportamiento general de fatiga indica que las probetas se comportan de manera adecuada para el nivel de esfuerzo impuesto y no alertan sobre conductas anómalas.
- La influencia de la rugosidad superficial sobre la vida a la fatiga aumenta a medida que los esfuerzos son mayores. Se observa mayor diferenciación del efecto de la rugosidad cuando aumenta el esfuerzo equivalente y disminuye el número de ciclos. Se observa que disminuye el número de ciclos esperado a medida que aumenta la rugosidad para niveles elevados de esfuerzo del rango estudiado. Esta relación pierde notoriedad a menores niveles de esfuerzo.
- Se propone una medición de estado de esfuerzo residual superficial para complementar y aportar a la diferenciación entre las probetas.

7 Bibliografía

- [1] J. K. Budynas, Richard G.; Nisbett, “Shigley’s Mechanical Engineering Design,” *Mc Graw Hill*, vol. 8th Editio, 2008.
- [2] J. K. Budynas, Richard G.; Nisbett, *Shigley’s Mechanical Engineering Design*, 9th ed. Mc Graw Hill, 2011.
- [3] J. Qu and A. J. Shih, “Analytical Surface Roughness Parameters of a Theoretical Profile Consisting of Elliptical Arcs,” *Mach. Sci. Technol.*, vol. 7, no. 2, pp. 281–294, 2003.
- [4] E. Cooling, “Surface Flatness «Electronics Cooling Magazine – Focused on Thermal Management, TIMs, Fans, Heat Sinks, CFD Software, LEDs/Lighting.” [Online]. Available: <http://www.electronics-cooling.com/2004/05/surface-flatness/>.
- [5] F. Diaz, “TORNEADO DE ACEROS ESPECIALES CON ÉNFASIS EN EL ACABADO SUPERFICIAL,” *Mem. Título, Univ. Chile*, 2015.
- [6] V. Marinov, “Tool wear and tool life,” *Manuf. Technol.*, pp. 77–80, 2011.
- [7] ASTM, “Standard Test Method for Strain-Controlled Fatigue Testing,” *E606/E606M - 12*, vol. 92, no. 2004, pp. 1–16, 2014.
- [8] ASTM, “Standard Practice for Verification of Constant Amplitude Dynamic Forces in an Axial Fatigue Testing System 1,” *E467 - 08*, vol. i, no. Reapproved, pp. 1–11, 2011.
- [9] T. Hassan and Z. Liu, “On the difference of fatigue strengths from rotating bending, four-point bending, and cantilever bending tests,” *Int. J. Press. Vessel. Pip.*, vol. 78, no. 1, pp. 19–30, 2001.
- [10] ASTM, “Manual on Fatigue Testing,” *Special Technical Publication 91*, no. June. 1949.
- [11] ASTM, “Standard Specification for Titanium and Titanium Alloy,” *B265 - 13a*, pp. 1–9, 2013.
- [12] D. A. Javidi, “Influence of Machining on the Surface Integrity and Fatigue Strength of 34CrNiMo6 Steel,” no. July, 2008.
- [13] E. C. Reed and J. a. Viens, “The Influence of Surface Residual Stress on Fatigue Limit of Titanium,” *J. Eng. Ind.*, vol. 82, no. 1, p. 76, 1960.
- [14] D. Novovic, R. C. Dewes, D. K. Aspinwall, W. Voice, and P. Bowen, “The effect of machined topography and integrity on fatigue life,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 44, no. 2–3, pp. 125–134, 2004.
- [15] I. Asilturk and H. Akkus, “Determining the effect of cutting parameters on surface roughness in hard turning using the Taguchi method,” *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 44,

- no. 9, pp. 1697–1704, 2011.
- [16] S. . Bentley, a. . Mantle, and D. . Aspinwall, “The effect of machining on the fatigue strength of a gamma titanium aluminide intermetallic alloy,” *Intermetallics*, vol. 7, no. 8, pp. 967–969, 1999.
- [17] M. Suraratchai, J. Limido, C. Mabru, and R. Chieragatti, “Modelling the influence of machined surface roughness on the fatigue life of aluminium alloy,” *Int. J. Fatigue*, vol. 30, no. 12, pp. 2119–2126, 2008.
- [18] A. Javidi, U. Rieger, and W. Eichlseder, “The effect of machining on the surface integrity and fatigue life,” *Int. J. Fatigue*, vol. 30, no. 10–11, pp. 2050–2055, Oct. 2008.
- [19] C. F. Yao, D. X. Wu, Q. C. Jin, X. C. Huang, J. X. Ren, and D. H. Zhang, “Influence of high-speed milling parameter on 3D surface topography and fatigue behavior of TB6 titanium alloy,” *Trans. Nonferrous Met. Soc. China (English Ed.)*, vol. 23, no. 3, pp. 650–660, 2013.
- [20] H. Sasahara, “The effect on fatigue life of residual stress and surface hardness resulting from different cutting conditions of 0.45%C steel,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 45, no. 2, pp. 131–136, 2005.
- [21] K. Moussaoui, M. Mousseigne, J. Senatore, R. Chieragatti, and P. Lamesle, “Influence of Milling on the Fatigue Lifetime of a Ti6Al4V Titanium Alloy,” *Metals (Basel)*, vol. 5, no. 3, pp. 1148–1162, 2015.
- [22] M. Manjaiah, S. Narendranath, and S. Basavarajappa, “A review on machining of titanium based alloys using EDM and WEDM,” *Rev. Adv. Mater. Sci.*, vol. 36, no. 2, pp. 89–111, 2014.
- [23] T. M. Mower, “Degradation of titanium 6Al-4V fatigue strength due to electrical discharge machining,” *Int. J. Fatigue*, vol. 64, pp. 84–96, 2014.
- [24] S. L. Soo, M. T. Antar, D. K. Aspinwall, C. Sage, M. Cuttell, R. Perez, and a. J. Winn, “The effect of wire electrical discharge machining on the fatigue life of Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo aerospace alloy,” *Procedia CIRP*, vol. 6, pp. 215–219, 2013.
- [25] G. W. Oehlert, *A First Course in Design and Analysis of Experiments*, vol. 57, no. 1. 2003.
- [26] Sandvik Coromant, “Finishing with wiper inserts,” 2016. [Online]. Available: http://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge/milling/application_overview/face_milling/finishing_with_wiper_inserts.

ANEXOS

A. Desgaste de la herramienta

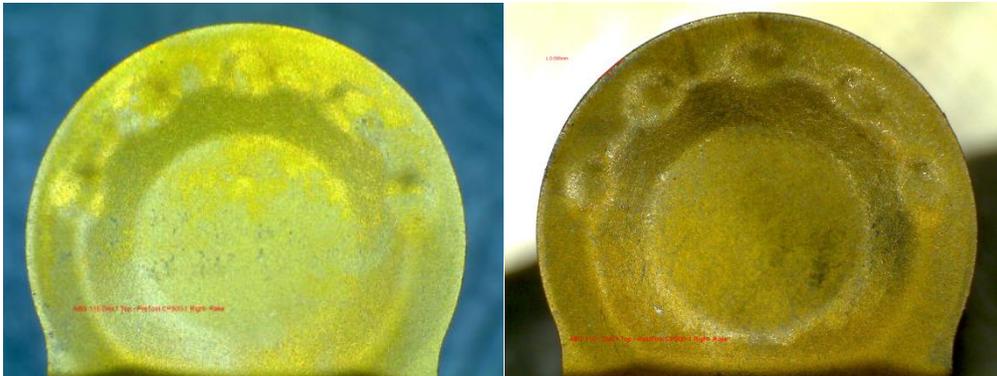
A.1. ESPECIFICACIÓN 1 \equiv DISCO 1

PARÁMETROS DE CORTE

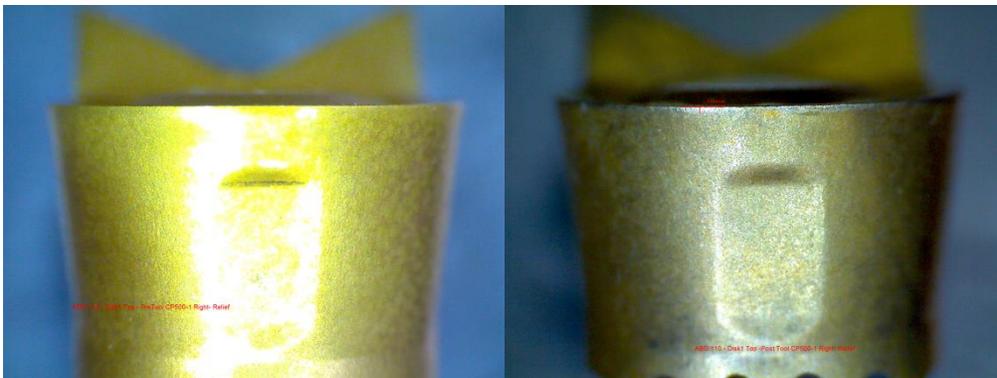
- VELOCIDAD DE CORTE: 60 m/min
- AVANCE: 0.1 mm/rev
- PROFUNDIDAD DE CORTE: 0.15 mm
- ESTADO DE LA HERRAMIENTA: NUEVA “NCP-1”

A.1.1. CARA SUPERIOR

BORDE DE ATAQUE



BORDE DE ALIVIO

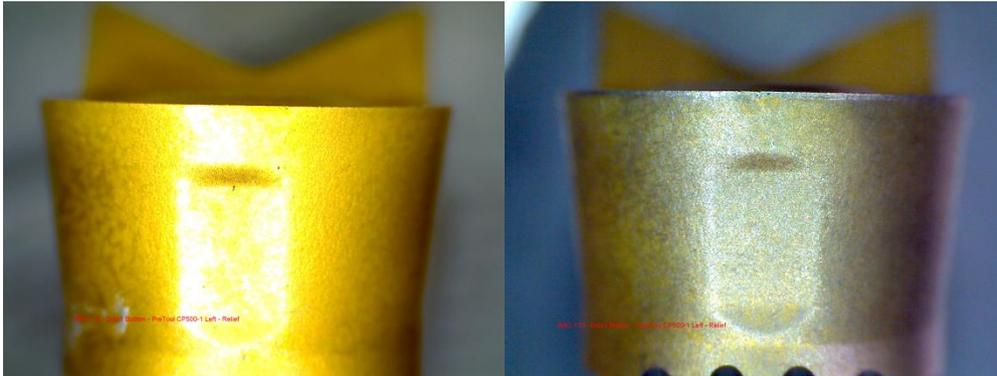


A.1.2. CARA INFERIOR

BORDE DE ATAQUE



BORDE DE ALIVIO



A.2. ESPECIFICACIÓN 2 \equiv DISCO 6

PARÁMETROS DE CORTE

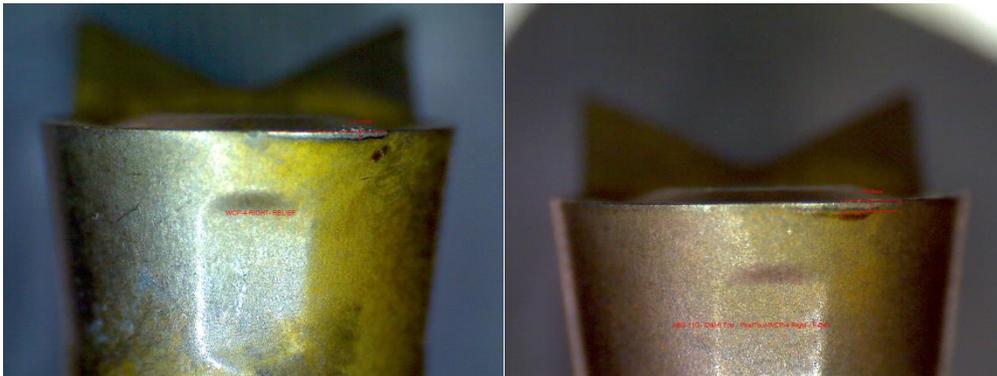
- VELOCIDAD DE CORTE: 60 m/min
- AVANCE: 0.1 mm/ rev
- PROFUNDIDAD DE CORTE: 0.45 mm
- ESTADO DE LA HERRAMIENTA: DESGASTADA “WCP-4”

A.2.1. CARA SUPERIOR

BORDE DE ATAQUE



BORDE DE ALIVIO

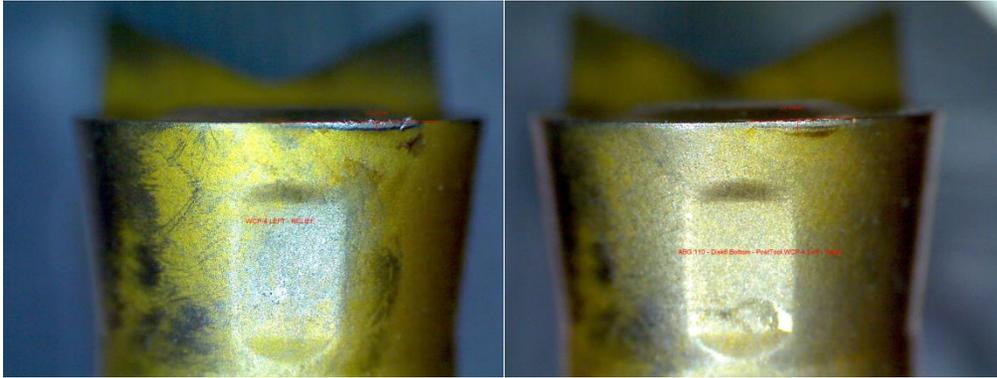


A.2.2. CARA INFERIOR

BORDE DE ATAQUE



BORDE DE ALIVIO



A.3. ESPECIFICACIÓN 3 \equiv DISCO 12

PARÁMETROS DE CORTE

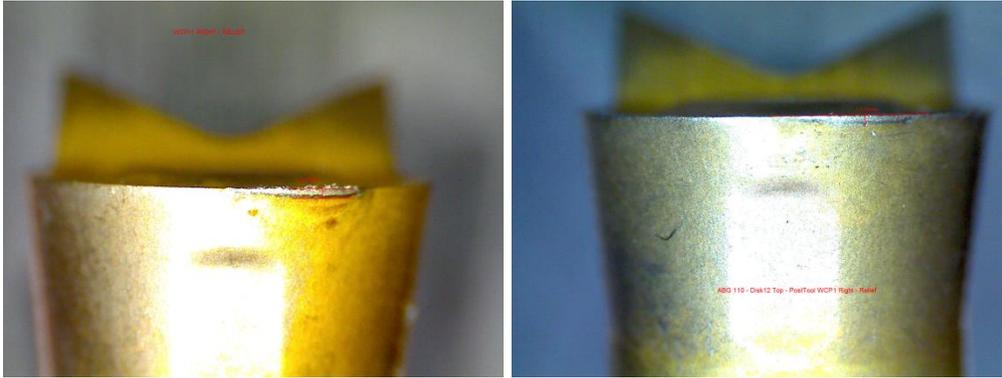
- VELOCIDAD DE CORTE: 60 m/min
- AVANCE: 0.3 mm/rev
- PROFUNDIDAD DE CORTE: 0.15 mm
- ESTADO DE LA HERRAMIENTA: DESGASTADA “WCP-1”

A.3.1. CARA SUPERIOR

BORDE DE ATAQUE



BORDE DE ALIVIO

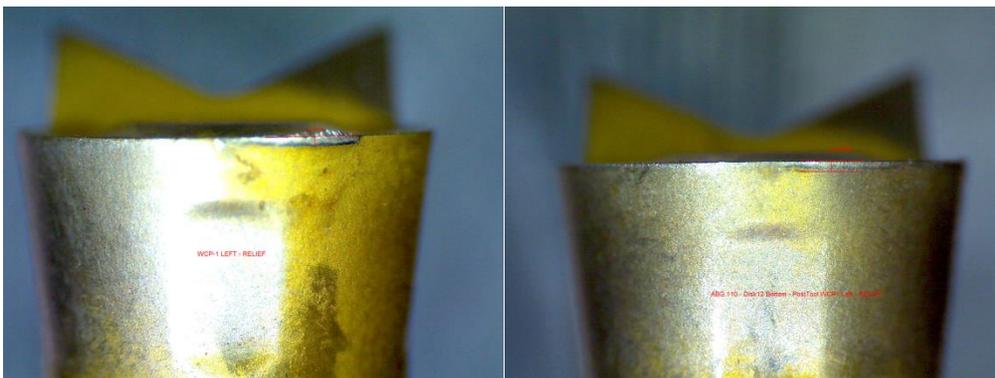


A.3.2. CARA INFERIOR

BORDE DE ATAQUE



BORDE DE ALIVIO



A.4. ESPECIFICACIÓN 4 \equiv DISCO 3

PARÁMETROS DE CORTE

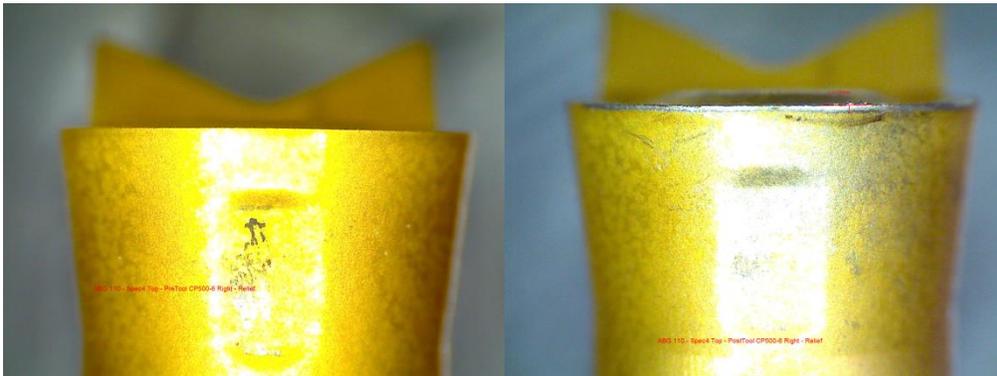
- VELOCIDAD DE CORTE: 60 m/min
- AVANCE: 0.3 mm/rev
- PROFUNDIDAD DE CORTE: 0.45 mm
- ESTADO DE LA HERRAMIENTA: NUEVA “NCP-6”

A.4.1. CARA SUPERIOR

BORDE DE ATAQUE

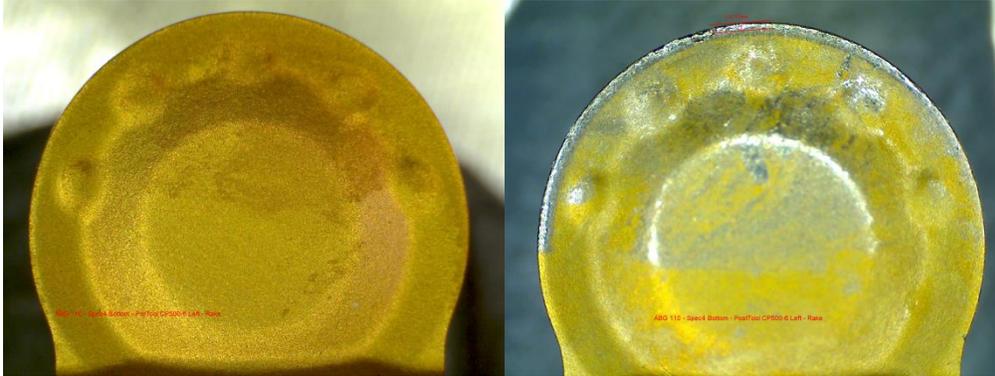


BORDE DE ALIVIO

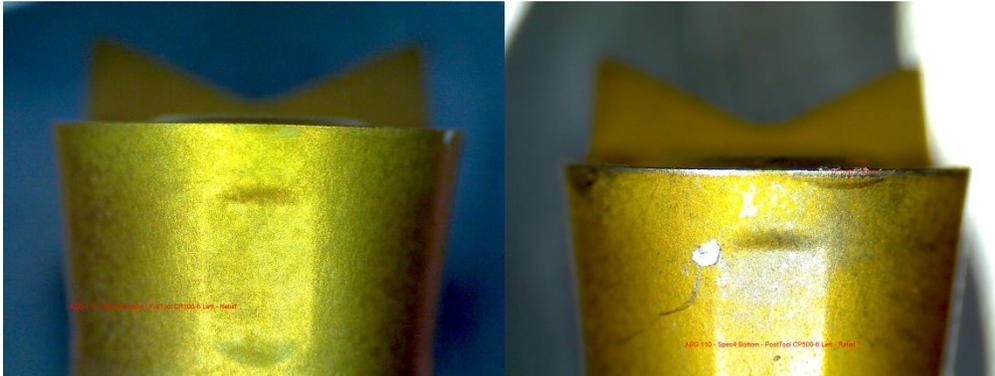


A.4.2. CARA INFERIOR

BORDE DE ATAQUE



BORDE DE ALIVIO



A.5. ESPECIFICACIÓN 5 \equiv DISCO 11

PARÁMETROS DE CORTE

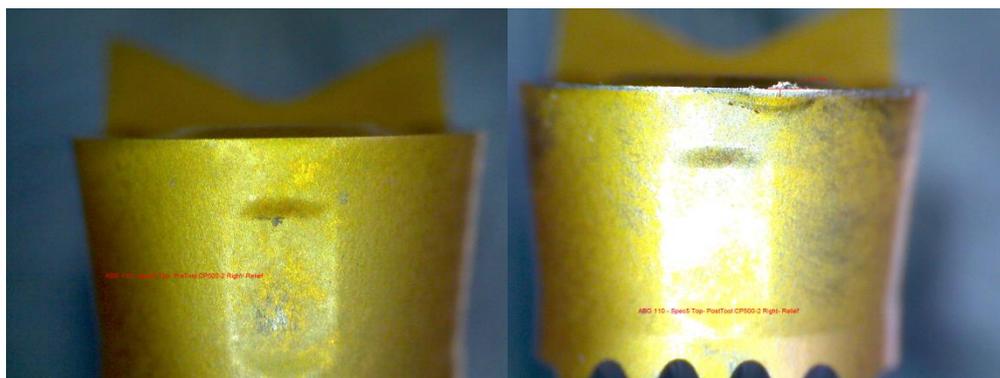
- VELOCIDAD DE CORTE: 100 m/min
- AVANCE: 0.2 mm/rev
- PROFUNDIDAD DE CORTE: 0.3 mm
- ESTADO DE LA HERRAMIENTA: NUEVA “NCP-2”

A.5.1. CARA SUPERIOR

BORDE DE ATAQUE

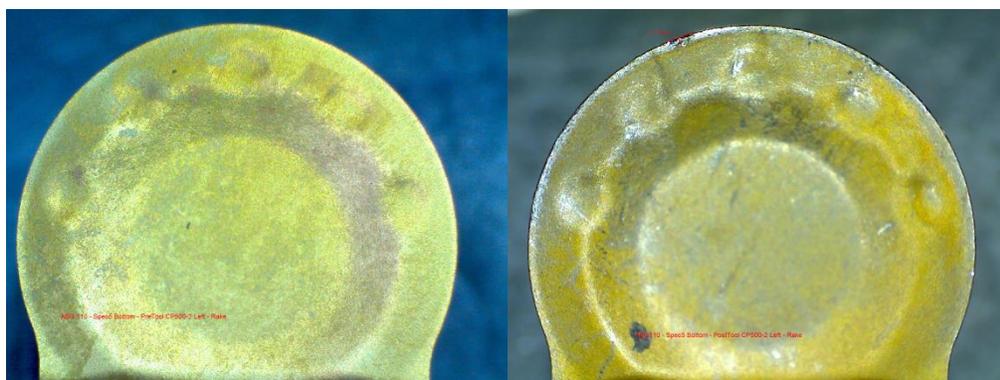


BORDE DE ALIVIO

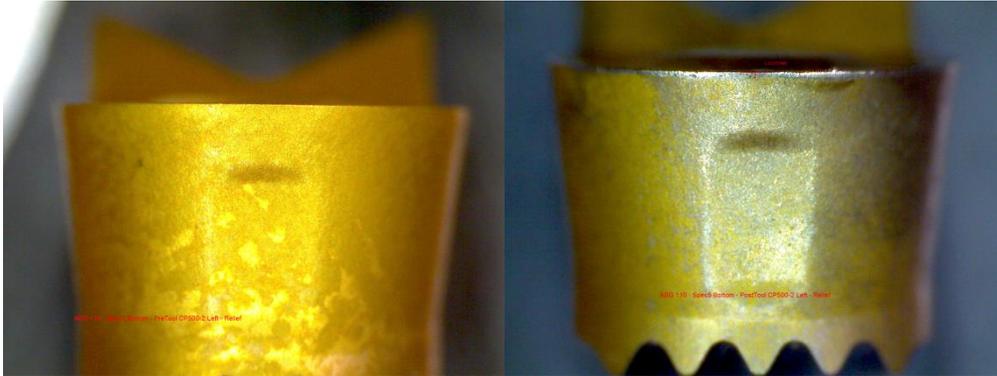


A.5.2. CARA INFERIOR

BORDE DE ATAQUE



BORDE DE ALIVIO



A.6. ESPECIFICACIÓN 6 ≡ DISCO 9

PARÁMETROS DE CORTE

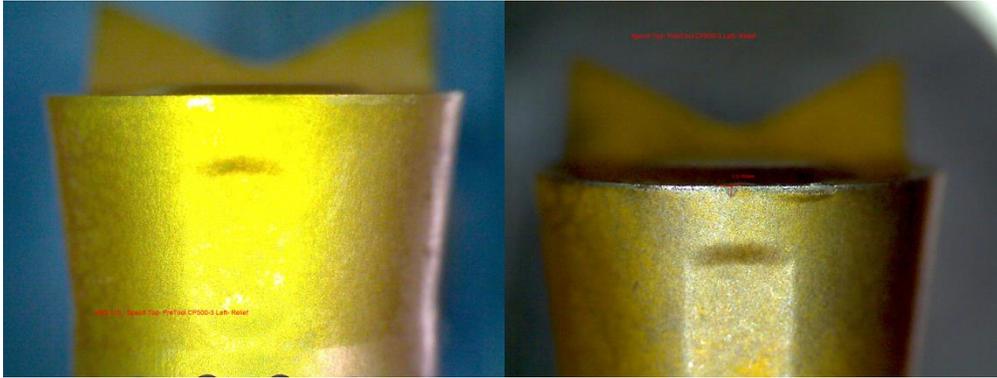
- VELOCIDAD DE CORTE: 100 m/min
- AVANCE: 0.2 mm/rev
- PROFUNDIDAD DE CORTE: 0.3 mm
- ESTADO DE LA HERRAMIENTA: NUEVA “NCP-3”

A.6.1. CARA SUPERIOR

BORDE DE ATAQUE

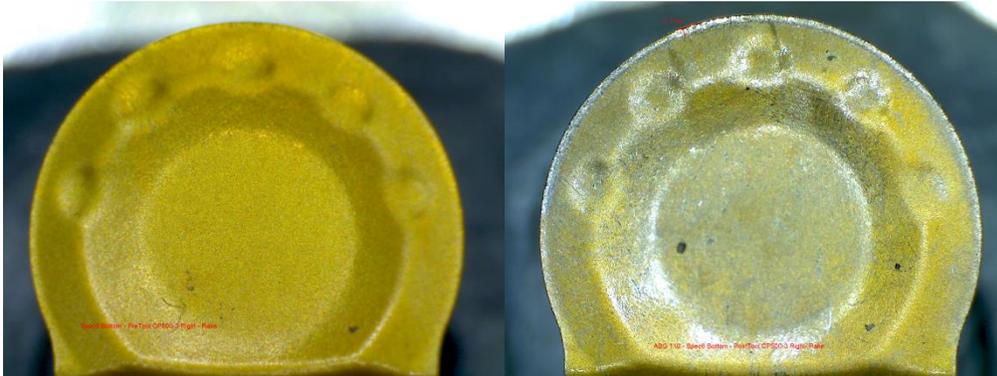


BORDE DE ALIVIO

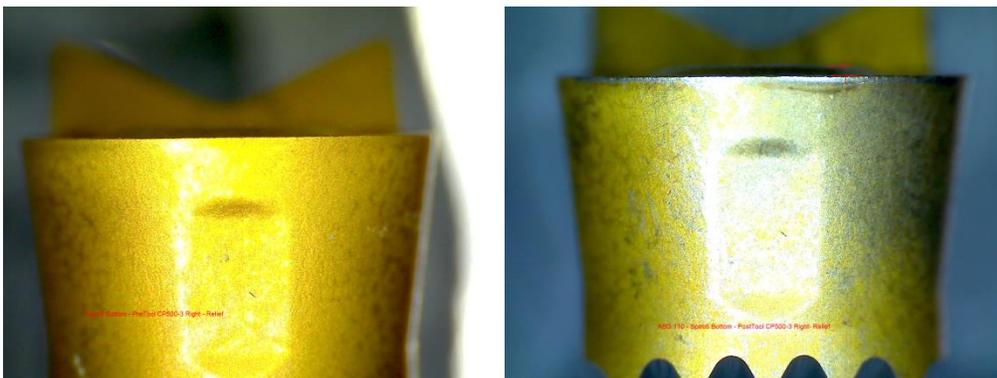


A.6.2. CARA INFERIOR

BORDE DE ATAQUE



BORDE DE ALIVIO



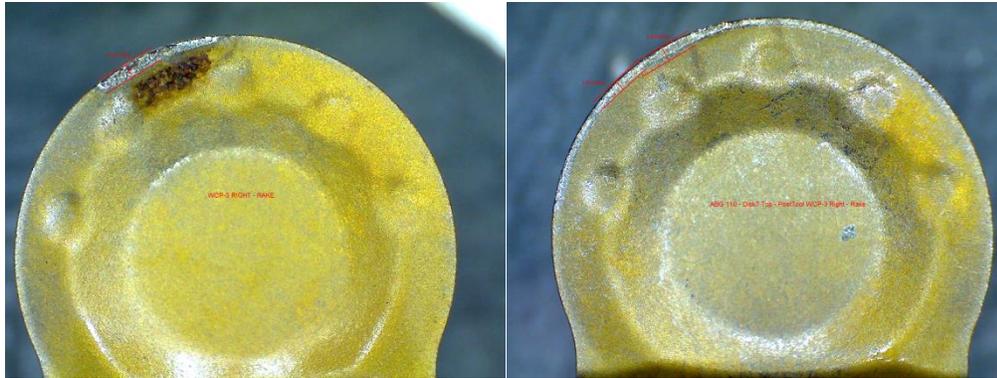
A.7. ESPECIFICACIÓN 7 ≡ DISCO 7

PARÁMETROS DE CORTE

- VELOCIDAD DE CORTE: 100 m/min
- AVANCE: 0.2 mm/rev
- PROFUNDIDAD DE CORTE: 0.3 mm
- ESTADO DE LA HERRAMIENTA: DESGASTADA “WCP-3”

A.7.1. CARA SUPERIOR

BORDE DE ATAQUE



BORDE DE ALIVIO

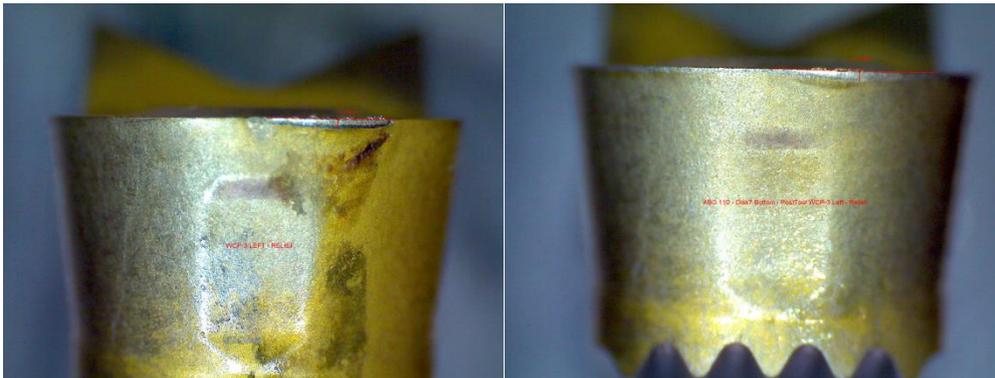


A.7.2. CARA INFERIOR

BORDE DE ATAQUE



BORDE DE ALIVIO



A.8. ESPECIFICACIÓN 8 ≡ DISK 5

PARÁMETROS DE CORTE

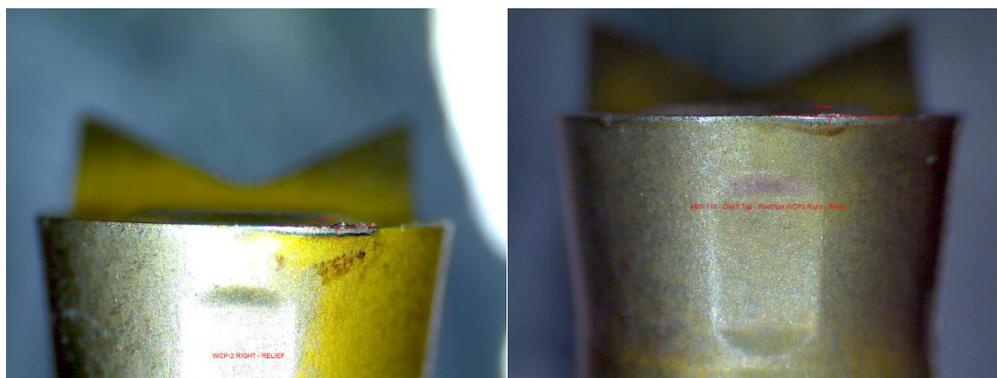
- VELOCIDAD DE CORTE: 100 m/min
- AVANCE: 0.2 mm/rev
- PROFUNDIDAD DE CORTE: 0.3 mm
- ESTADO DE LA HERRAMIENTA: DESGASTADA “WCP-2”

A.8.1. CARA SUPERIOR

BORDE DE ATAQUE



BORDE DE ALIVIO

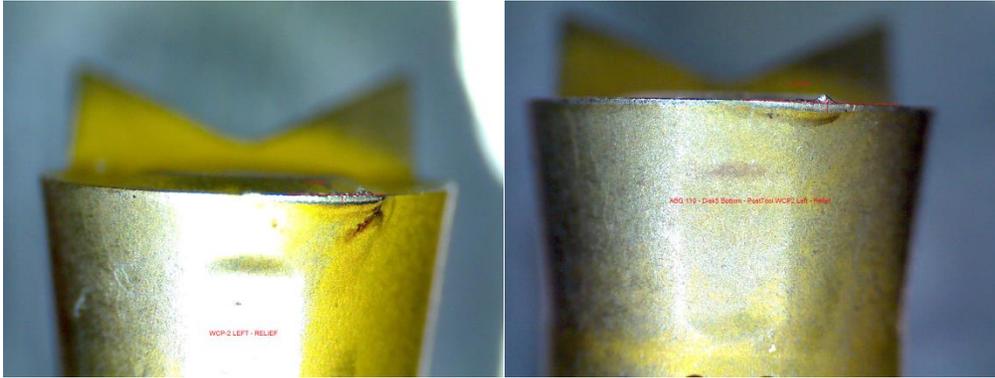


A.8.2. CARA INFERIOR

BORDE DE ATAQUE



BORDE DE ALIVIO



A.9. ESPECIFICACIÓN 9 \equiv DISCO 7

PARÁMETROS DE CORTE

- VELOCIDAD DE CORTE: 140 m/min
- AVANCE: 0.1 mm/rev
- PROFUNDIDAD DE CORTE: 0.15 mm
- ESTADO DE LA HERRAMIENTA: DESGASTADA “WCP-6”

A.9.1. CARA SUPERIOR

BORDE DE ATAQUE

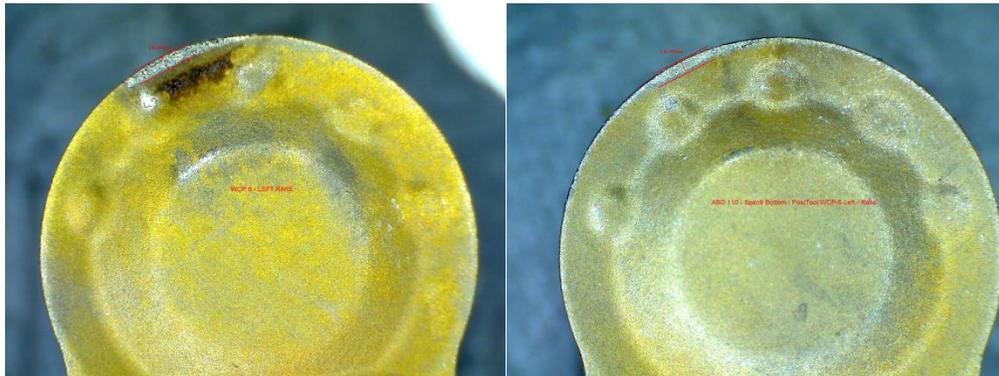


BORDE DE ALIVIO

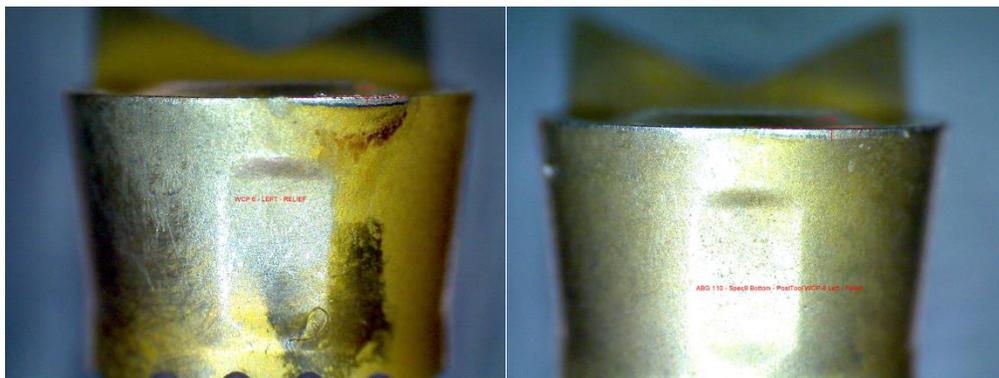


A.9.2. CARA INFERIOR

BORDE DE ATAQUE



BORDE DE ALIVIO



B. Tablas de rugosidad con perfilómetro de contacto

Disco 1	Mediciones de Rugosidad [μm]						Media	Promedio Global [μm]	Microscopía [μm]
Cara Superior Externa	0,254	0,258	0,242	0,262	0,260	0,266	0,257	0,310	0,501
Cara Superior Interna	0,270	0,257	0,256	0,233	0,233	0,235	0,247		
Cara Inferior Externa	0,362	0,335	0,342	0,348	0,346	0,343	0,346		
Cara Inferior Interna	0,399	0,400	0,381	0,400	0,386	0,383	0,392		
Disco 2	Mediciones de Rugosidad [μm]						Media	Promedio Global [μm]	Microscopía [μm]
Cara Superior Externa	0,861	0,861	0,931	0,841	0,856	0,849	0,867	0,735	0,780
Cara Superior Interna	0,707	0,647	0,711	0,688	0,687	0,733	0,696		
Cara Inferior Externa	0,654	0,647	0,647	0,697	0,663	0,672	0,663		
Cara Inferior Interna	0,707	0,742	0,715	0,710	0,707	0,707	0,715		
Disco 3	Mediciones de Rugosidad [μm]						Media	Promedio Global [μm]	Microscopía [μm]
Cara Superior Externa	0,762	0,815	0,825	0,812	0,765	0,807	0,798	0,723	1,014
Cara Superior Interna	1,004	1,022	1,021	1,012	1,026	1,039	1,021		
Cara Inferior Externa	0,446	0,478	0,465	0,481	0,463	0,476	0,468		
Cara Inferior Interna	0,574	0,608	0,619	0,602	0,609	0,628	0,607		
Disco 4	Mediciones de Rugosidad [μm]						Media	Promedio Global [μm]	Microscopía [μm]
Cara Superior Externa	0,320	0,332	0,321	0,342	0,332	0,331	0,330	0,312	0,526
Cara Superior Interna	0,356	0,365	0,348	0,348	0,349	0,367	0,356		
Cara Inferior Externa	0,312	0,272	0,272	0,314	0,293	0,277	0,290		
Cara Inferior Interna	0,320	0,249	0,267	0,265	0,265	0,265	0,272		
Disco 5	Mediciones de Rugosidad [μm]						Media	Promedio Global [μm]	Microscopía [μm]
Cara Superior Externa	0,682	0,687	0,689	0,695	0,694	0,693	0,690	0,689	0,771
Cara Superior Interna	0,718	0,711	0,727	0,740	0,711	0,701	0,718		
Cara Inferior Externa	0,592	0,629	0,606	0,620	0,603	0,673	0,621		
Cara Inferior Interna	0,820	0,716	0,694	0,702	0,715	0,706	0,726		
Disco 6	Mediciones de Rugosidad [μm]						Media	Promedio Global [μm]	Microscopía [μm]
Cara Superior Externa	0,370	0,376	0,362	0,383	0,381	0,378	0,375	0,370	0,535
Cara Superior Interna	0,349	0,357	0,351	0,352	0,361	0,361	0,355		
Cara Inferior Externa	0,383	0,374	0,372	0,358	0,360	0,374	0,370		
Cara Inferior Interna	0,380	0,378	0,381	0,377	0,379	0,382	0,380		

Disco 7	Mediciones de Rugosidad [μm]						Media	Promedio Global [μm]	Microscopía [μm]
Cara Superior Externa	0,668	0,656	0,663	0,706	0,662	0,676	0,672	0,546	0.755
Cara Superior Interna	0,567	0,614	0,557	0,612	0,605	0,596	0,592		
Cara Inferior Externa	0,496	0,497	0,481	0,472	0,491	0,454	0,482		
Cara Inferior Interna	0,468	0,424	0,436	0,425	0,428	0,447	0,438		
Disco 8	Mediciones de Rugosidad [μm]						Media	Promedio Global [μm]	Microscopía [μm]
Cara Superior Externa	0,287	0,249	0,254	0,249	0,267	0,242	0,258	0,319	0.448
Cara Superior Interna	0,243	0,291	0,328	0,304	0,275	0,266	0,285		
Cara Inferior Externa	0,312	0,341	0,352	0,319	0,340	0,334	0,333		
Cara Inferior Interna	0,416	0,408	0,402	0,402	0,383	0,402	0,402		
Disco 9	Mediciones de Rugosidad [μm]						Media	Promedio Global [μm]	Microscopía [μm]
Cara Superior Externa	0,323	0,355	0,338	0,338	0,384	0,446	0,364	0,620	0,842
Cara Superior Interna	0,777	0,855	0,818	0,796	0,829	0,806	0,814		
Cara Inferior Externa	0,660	0,674	0,579	0,690	0,676	0,610	0,648		
Cara Inferior Interna	0,641	0,665	0,665	0,675	0,652	0,626	0,654		
Disco 10	Mediciones de Rugosidad [μm]						Media	Promedio Global [μm]	Microscopía [μm]
Cara Superior Externa	0,939	1,055	1,020	1,105	1,052	1,063	1,039	0,864	1,018
Cara Superior Interna	0,936	0,964	0,919	0,969	0,951	1,005	0,957		
Cara Inferior Externa	0,645	0,682	0,640	0,676	0,637	0,657	0,656		
Cara Inferior Interna	0,868	0,800	0,819	0,789	0,761	0,795	0,805		
Disco 11	Mediciones de Rugosidad [μm]						Media	Promedio Global [μm]	Microscopía [μm]
Cara Superior Externa	1,201	1,327	1,381	1,322	1,319	1,365	1,319	0,480	0,715
Cara Superior Interna	1,364	1,325	1,332	1,276	1,255	1,341	1,316		
Cara Inferior Externa	0,433	0,496	0,457	0,484	0,442	0,494	0,468		
Cara Inferior Interna	0,450	0,527	0,487	0,503	0,493	0,488	0,491		
Disco 12	Mediciones de Rugosidad [μm]						Media	Promedio Global [μm]	Microscopía [μm]
Cara Superior Externa	0,801	0,773	0,790	0,784	0,766	0,776	0,782	0,960	1,078
Cara Superior Interna	0,822	0,836	0,833	0,840	0,856	0,865	0,842		
Cara Inferior Externa	1,117	1,100	1,115	1,105	1,123	1,107	1,111		
Cara Inferior Interna	1,080	1,090	1,132	1,106	1,115	1,110	1,106		

C. Gráficos de Endurecimiento

