



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

**TORNEADO DE ACEROS ESPECIALES
410, PH13-8Mo Y 300M
CON ÉNFASIS EN EL ACABADO SUPERFICIAL**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL MECÁNICA

FERNANDA ROSA DÍAZ SALAS

PROFESOR GUÍA:
JAMES GRIFFIN

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
AQUILES SEPÚLVEDA OSSES
RODRIGO PALMA HILLERNS

Este trabajo ha sido financiado por Tata Steel

SANTIAGO DE CHILE
2015

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE:**

Ingeniera Civil Mecánica

POR: Fernanda Rosa Díaz Salas

FECHA: 05/05/2015

PROFESOR GUÍA: James Griffin

**Torneado en aceros especiales 410, PH13-8Mo y 300M, con énfasis en el
acabado superficial**

Este estudio se realizó en el Centro Avanzado de Manufactura [AMRC], Universidad de Sheffield, Reino Unido, dentro de su programa Proving Factory, que busca dar soporte a las industrias para optimizar sus procesos de mecanizado. Tata Steel, la empresa asesorada, financió los experimentos y proporcionó los aceros.

El objetivo de este trabajo es obtener una baja rugosidad mediante el torneado, menor a $0,4 \mu\text{m}$ y así eliminar un segundo proceso, el rectificado, considerando tres tipos de aceros: de alta resistencia 300M e inoxidables 410 y PH13-8Mo.

Los ensayos para determinar el efecto de los parámetros de corte, la geometría, el material del inserto y el desgaste sobre la rugosidad se clasificaron en 5 grupos. El primero es un análisis del desgaste en el tiempo, con los materiales en condición blanda. En los siguientes grupos, la condición fue dura. En el segundo se probaron 6 insertos con distintas geometrías y materiales de corte aplicados en el acero PH13-8Mo. Las menores rugosidades se obtuvieron con la geometría wiper (radios de nariz múltiples). Conforme al desempeño, se escogió el mejor carburo con radio 1,6 mm y el cermet de radio 0,8 mm, los cuales fueron posteriormente probados en los otros dos materiales. En el tercer grupo se hicieron combinaciones de tasas de alimentación y velocidades de corte con el fin de evaluar las tendencias de 5 características: rugosidad, productividad, fuerzas, condición del inserto y morfología de la viruta. Se asignaron puntajes y ponderaciones a las medidas, lo que permitió visualizar tendencias. A partir de resultados anteriores, en el cuarto grupo se determinó, para cada material, el inserto de mejor desempeño entre los considerados, y la velocidad V15 (para una vida útil del inserto de 15 minutos). En el quinto grupo se buscó establecer una correlación entre las mediciones de desgaste del inserto y rugosidad de la pieza, sin resultado satisfactorio. Por último se hizo un estudio comparativo de los precios, considerando la productividad y otros factores.

Se concluye que la tasa de alimentación es el factor que más afecta la rugosidad; con valores menores se consigue un mejor acabado superficial, sin embargo valores muy bajos disminuyen la calidad. Mayores velocidades de corte son mejores en términos de la rugosidad, pero también existe un límite. Menores radios de los insertos producen resultados más dispersos a distintas tasas de alimentación. La geometría wiper es una gran mejora, pues consigue bajas rugosidades, incluso a altas tasas de alimentación.

Por otra parte, al mecanizar materiales más duros, disminuye la vida de la herramienta y su V15, es costoso, por la baja productividad o, en su defecto, por el precio de los insertos.

Para cada material se estableció el inserto más adecuado entre los considerados aquí. Para el acero 410, el carburo a 380 m/min, PH13-8Mo carburo a 305 m/min, aunque con este valor la rugosidad es cercana a $0,5 \mu\text{m}$. Para el material 300M, CBN ya sea en seco o con refrigerante a velocidades de 305 y 320 m/min respectivamente. Si bien estos insertos tienen un elevado valor, se recomiendan por su alta productividad.

Agradecimientos

En primer lugar a mi madre, quien se sacrificó mucho por mí y mi hermano. Por ser la más entregada, con mejor voluntad, por enseñarme hábitos, apoyarme siempre, dejarme ser, con los límites correspondientes..., por ser la mejor. A mi hermano, por ser un muy buen ejemplo, aconsejarme cuando creí que no podría, por ser tan noble y generoso.

A mi hermosa familia, mis tres primos, más bien hermanos: Iván, otro buen ejemplo y buen compañero de infancia. Katerina por quererme de forma tan entregada y siempre decirme que está orgullosa de mí. Nicole por su enorme motivación en todo lo que hace, transmitida en sus actos. A mi segunda madre, la mamá Rossy, siempre ha confiado plenamente en mí y me ha ayudado un montón. A los chukiquis: Sofi, Simón y Colomba, por ser niños, recordándome que no lo debo olvidar nunca. Mi “vechina” Vero, por apoyarnos siempre como si fuéramos familia. Todos ellos me han aportado mucho, enseñándome valores y puntos de vistas que han contribuido de gran forma sobre mí.

A mis amigos de la carrera, con mención más que honrosa para Mati, Vicho y Garo. Agradezco la experiencia que vivimos en Inglaterra, la cual fortaleció nuestra amistad y nos hizo crecer. También hicieron mis años en mecánica muy entretenidos y acompañados. A todos mis amigos de mecánica, buenos compañeros, con quienes compartí cursos y tareas que nos partieron la cabeza, pero que logramos sacar adelante apoyándonos. Los más queridos: Alberto con sus locuras que me quitaban el estrés, Paragua con su tranquilidad y alegría, también la Marce, Seba, Pichón, Caro y Víctor, con quienes disfruté este proceso.

A mis amigos de plan común, la etapa más difícil de mi carrera. Cami Camila, con la que compartí casi todos mis ramos mechones. Pato por su infinita voluntad y apoyo en todos los sentidos. Sasho, por alentar las decisiones difíciles, por dejarme conocerlo y nunca dejar de lado nuestra parte humana. Antonio Toña, por su sentido del humor necesario y constante preocupación. Kari, por el mutuo apoyo moral cuando era necesario.

También a mis amigos del colegio, quienes me aguantaron toda la ingratitud que conlleva la vida universitaria y su falta de tiempo. Coni la mejor amiga que puedo imaginar, gracias por tu amistad, consejos y confianza en todo sentido. Huaiki, que si bien no entendías mis estreses, hacías el intento. Sota por el apoyo con el humor que le caracteriza, Pollo, por siempre darme a entender que yo era más que capaz.

A mi AMorìo Mario, mi complemento ideal, quien en esta etapa final, me ha ayudado con su tranquilidad y precisión del lenguaje. Agradezco a la vida tenerlo conmigo.

A mi profesor guía James Griffin por darme la tremenda oportunidad de realizar este trabajo en Inglaterra, por ser mi profesor guía y apoyar mi trabajo, siempre buscando más allá en mí. A mi co-guía, profesor Aquiles, por todas las indicaciones y correcciones.

A Chris Taylor, quien respaldó mi trabajo allá en Inglaterra y estuvo todo el tiempo dispuesto a ayudar. Lo mismo para Raúl Alegre, quien me apoyó bastante.

Al departamento, a sus profesores y todos los funcionarios, por hacer mi estadía en la carrera muy grata.

Y básicamente a todos los que confiaron en mí, pues a ratos la carrera es dura, y fácilmente se puede perder la motivación, pero con pequeñas palabras, gestos y acciones uno puede volver a retomar el rumbo.

Tabla de contenido

1	Introducción.....	1
1.1	Antecedentes Generales.....	1
1.2	Motivación	1
1.3	Objetivos y Alcances	2
1.3.1	Objetivo General	2
1.3.2	Objetivos específicos.....	2
1.3.3	Alcances.....	2
2	Antecedentes	3
2.1	Materiales	4
2.2	Rugosidad Superficial.....	5
2.3	Parámetros de corte.....	10
2.3.1	Tasa de alimentación [mm/rev]:.....	10
2.3.2	Velocidad de corte [mm/rev].....	12
2.3.3	Geometría del inserto	13
2.3.4	Material de los insertos.....	15
2.3.5	Fluido de corte	17
2.3.6	Desgaste de la herramienta	17
3	Metodología	19
3.1	Equipos utilizados	20
3.1.1	Torno CNC	20
3.1.2	Refrigerante	20
3.1.3	Microscopio de alta precisión	20
3.1.4	Microscopio portable USB.....	21
3.1.5	Rugosímetro.....	22
3.1.6	Set de dinamómetro.....	22
3.1.7	Sistema de escáner Alicona.....	23
3.2	Condiciones experimentales.....	24
3.3	Información de los tratamientos térmicos.....	25
3.4	Ensayos de dureza	25
3.5	Estrategia de mecanizado.....	26
4	Plan experimental	28
4.1	Análisis progresivo del desgaste de la herramienta.....	28
4.1.1	Parámetros de corte usados/ Grupo 1	30
4.2	Análisis del acabado superficial	31

4.2.1	Parámetros de corte usados / Grupo 2.1	34
4.2.2	Parámetros de corte usados / Grupo 2.2.....	35
4.2.3	Parámetros de corte usados / Grupo 2.2.....	35
4.3	Pruebas con distintos parámetros	36
4.3.1	Parámetros de corte usados / Grupo 3.....	39
4.4	Búsqueda de V15 con insertos idóneos para cada material	41
4.4.1	Parámetros de corte usados / Grupo 4.....	43
4.5	Estudio de la rugosidad y el desgaste en el tiempo.....	47
4.5.1	Parámetros de corte usados / Grupo 5.....	47
4.6	Comparación de los insertos, en términos de costo.....	47
4.7	Resumen de los experimentos.....	49
5	Resultados y análisis	51
5.1	Análisis progresivo del desgaste de la herramienta	51
5.1.1	Acero 410.....	51
5.1.2	Acero PH13-8Mo.....	53
5.1.3	Acero 300M	54
5.2	Análisis del acabado superficial	56
5.2.1	Prueba con 6 insertos en acero PH13-8Mo	56
5.2.2	Prueba con 2 mejores insertos en los tres materiales	58
5.2.3	Rugosidades a muy bajas tasas de alimentación.....	59
5.3	Pruebas con distintos parámetros de corte	60
5.3.1	Acero PH13-8Mo.....	60
5.3.2	Acero 410.....	65
5.3.3	Acero 300M	67
5.4	Búsqueda de V15 con insertos idóneos para cada material	69
5.4.1	Inserto Carburo probado en aceros 410, PH13-8Mo y 300M.....	69
5.4.2	Inserto Cermet probado en acero 300M	71
5.4.3	Inserto CBN probado en acero 300M	72
5.4.4	Inserto Carburo probado en acero PH13-8Mo en estado duro y blando.....	74
5.4.5	Resumen del grupo 4	75
5.4.6	Examinación en microscopio óptico.....	75
5.5	Estudio de la rugosidad y el desgaste en el tiempo	79
5.6	Comparación de los insertos, en términos de costo.....	81
6	Conclusiones	84
7	Glosario	86
8	Bibliografía.....	87

Anexos	92
Anexo A: PH13-8Mo, resultados del grupo 3.....	92
Anexo B: 410, resultados del grupo 3.....	96
Anexo C: 300M, resultados del grupo 3.....	99
Anexo D: Valores usados en el modelo de costos	102

Índice de tablas

Tabla 3.1: Durezas de las barras. Valores nominales y los medidos (promedios).	26
Tabla 4.1: Parámetros de corte recomendados por Sandvik para la condición de desbaste.	31
Tabla 4.2: Parámetros de corte utilizados en “Análisis progresivo del desgaste de la herramienta”.	31
Tabla 4.3: Insertos utilizados en el grupo 2 en el material PH13-8Mo.....	32
Tabla 4.4: Zonas definidas en la barra para realizar las medidas de rugosidad.	33
Tabla 4.5: Insertos con sus respectivas velocidades de corte usadas. La profundidad de corte fue igual para todas las pruebas: 0,25 mm.	35
Tabla 4.6: Segundo set parámetros de corte en el grupo “Análisis del acabado superficial”. Profundidad de corte 0,25 mm	35
Tabla 4.7: Parámetros a considerar, cómo fueron tomados y/o medidos y su respectiva forma de asignar la puntuación.	38
Tabla 4.8: Parámetros de corte combinados para el material PH13-8Mo. Profundidad de corte 0,25 mm. Inserto: carburo con diámetro de nariz 1,6 mm, geometría wiper.	39
Tabla 4.9: Parámetros de corte combinados para el material 410. Profundidad de corte 0,25 mm.....	39
Tabla 4.10: Parámetros de corte combinados para el material 300M. Profundidad de corte 0,25 mm.....	40
Tabla 4.11: Velocidades de corte probadas en el material PH13-8Mo, inserto carburo. ..	44
Tabla 4.12: Velocidades de corte probadas en el material 410, inserto carburo.....	44
Tabla 4.13: Velocidades de corte probadas en el material 300M, inserto carburo.....	45
Tabla 4.14: Velocidades de corte probadas en el material 300M, inserto cermet.	45
Tabla 4.15: Velocidades de corte probadas en el material 300M, inserto CBN con refrigerante.....	45
Tabla 4.16: Velocidades de corte probadas en el material 300M, inserto CBN sin refrigerante.....	46
Tabla 4.17: Velocidades de corte probadas en el material PH13-8Mo, en condición de dureza blanda, inserto carburo.	46
Tabla 4.18: Velocidades de corte probadas en el material PH13-8Mo, en condición de dureza dura, inserto carburo.....	46
Tabla 4.19: Parámetros de corte para el grupo 5.	47
Tabla 4.20: Parámetros considerados para el modelo de costos.	48
Tabla 4.21: Resumen de los experimentos llevados a cabo.	50
Tabla 5.1: Resumen del ensayo V15 en tres aceros con inserto carburo.	70
Tabla 5.2: Insertos con sus costos y productividad, según los distintos estados de corte.	82

Índice de figuras

Figura 2.1: Parámetros de corte en el proceso de torneado. Imágenes adaptadas de: izquierda [2], derecha [3].....	3
Figura 2.2: BUE (Built up Edge). En el inserto se deposita parte del material cortado [10].	4
Figura 2.3: Ejemplo de BUE en el inserto [11].....	5
Figura 2.4: Largos a considerar para medir la rugosidad. Adaptado de [14].	6
Figura 2.5: Rugosidad promedio. Adaptado de [14].	6
Figura 2.6: Rugosidades parciales en los cinco módulos [14].....	7
Figura 2.7: Profundidad total de la rugosidad [14].	7
Figura 2.8: Forma de medir la rugosidad [14].....	8
Figura 2.9: Proceso de rectificado. Adaptado de [16].....	8
Figura 2.10: Ejemplos de capa blanca. Derecha de [22], Izquierda de [23].	9
Figura 2.11: Radios de inserto en orden creciente. Impacto del radio en el mecanizado [28].	11
Figura 2.12: Comparación de rugosidad teórica (con la fórmula mostrada) y experimental, con diferentes radios de la nariz en los insertos [29].	12
Figura 2.13: Efecto de la velocidad de corte y la profundidad de corte [34].....	12
Figura 2.14: Efecto de la velocidad de corte en la formación de BUE. Material AISI 304 [8].	13
Figura 2.15: Las ondulaciones, representan la zona no cortada por el inserto.....	13
Figura 2.16: Ángulos de barrido. Izquierda positivo, derecha negativo [41].	14
Figura 2.17: Comparación de un inserto con geometría convencional (a) y forma Wiper. Símbolos: f – tasa de alimentación; a_p – profundidad de corte; r_e radio del borde cortante: r_{e1} y r_{e2} – radios de la curvatura Wiper: r_b – radio de suavización. : R_z – Rugosidad media [42].	15
Figura 2.18: Gráfico obtenido, el cual demuestra la mejora de la geometría wiper, sobre la convencional [42].....	15
Figura 2.19: Material del inserto de acuerdo a la dureza, el tipo de corte y la calidad superficial buscada. Adaptado de [44].	16
Figura 3.1: Diagrama de metodología.....	19
Figura 3.2: Torno CNC utilizado.....	20
Figura 3.3: Microscopio Carl Zeiss Stemi 2000	21
Figura 3.4: Microscopio USB portable.....	21
Figura 3.5: Rugosímetro Mitutoyo SJ-301	22
Figura 3.6: Set de medición de fuerzas Kistler 921, con su respectivo software, amplificador y dinamómetro.	22
Figura 3.7: Sistema de escáner Alicona.	23

Figura 3.8: Entrega de las barras a probar	24
Figura 3.9: Lápiz grabador Dremel.....	24
Figura 3.10: Pulidora.....	25
Figura 3.11: Test de dureza Rockwell.....	26
Figura 3.12 : Estrategia de corte con escalones al final de la barra.....	27
Figura 3.13: Contacto del inserto con la barra.....	27
Figura 3.14: Ejes en el torneado.....	27
Figura 4.1: Microscopio y su programa para pedir el desgaste.....	29
Figura 4.2: Medición del desgaste en un inserto Wiper.....	29
Figura 4.3: Caras de un inserto.....	29
Figura 4.4: Toma desde arriba del inserto.....	30
Figura 4.5: Inserto utilizado en los tres materiales para el desbaste.....	30
Figura 4.6: Barra dividida en las 3 zonas de preparación y 3 dispuestas para la medición de la superficie.....	34
Figura 4.7: Montaje para medir las rugosidades.....	34
Figura 4.8: Set de parámetros de corte para el material PH13-8Mo.....	37
Figura 4.9: Set de parámetros de corte para el material 410.....	40
Figura 4.10: Set de parámetros de corte para el material 300M.....	40
Figura 4.11: Formato de orden para los valores obtenidos.....	42
Figura 4.12: Barras cortadas, enviadas a Tata Steel, para el análisis de capa blanca.....	43
Figura 5.1: Desgaste progresivo en material 410 en estado blando. Velocidad de corte = 250 m/min, tasa de alimentación= 0,25 mm/rev, profundidad de corte = 2,5 mm.....	51
Figura 5.2: Inserto PH13-8Mo, luego de dos minutos de mecanizado.....	53
Figura 5.3: Desgaste progresivo en material PH13-8Mo en estado blando. Velocidad de corte = 125m/min, tasa de alimentación= 0,125 mm/rev, profundidad de corte = 1,25 mm.....	53
Figura 5.4: Desgaste progresivo en material 300M en estado blando. Velocidad de corte = 250 m/min, tasa de alimentación= 0,25 mm/rev, profundidad de corte = 2,5 mm.....	55
Figura 5.5: Caras del inserto en el corte.....	56
Figura 5.6: Rugosidad para los 6 insertos probados en el material PH13-Mo.....	57
Figura 5.7: Rugosidad con 2 mejores insertos, carburo y cermet, en todos los aceros. ...	59
Figura 5.8: Relación de la rugosidad con la tasa de alimentación.....	60
Figura 5.9: Mapa de contorno de la calidad del corte en el material PH13-8Mo. Escala del 1-100.....	61
Figura 5.10: Mapa de contorno de la rugosidad en el material PH13-8Mo. Escala del 1-10.....	63
Figura 5.11: Mapa de contorno de las fuerzas de corte en el material PH13-8Mo. Escala del 1-10.....	63

Figura 5.12: Imágenes de las virutas en material PH13-8Mo.	64
Figura 5.13: Mapa de contorno de la calidad del corte en el material 410. Escala del 1-100.	65
Figura 5.14: Imágenes de las virutas en material 410.	66
Figura 5.15: Mapa de contorno de la calidad del corte en el material 300M. Escala del 1-100.	67
Figura 5.16: Imágenes de las virutas en material 300M.	68
Figura 5.17: Desgaste en función de la velocidad de corte. Ensayo V15 usando inserto carburo para los tres aceros.	70
Figura 5.18: Desgaste en función de la velocidad de corte. Ensayo V15 usando inserto cermet para 300M.	71
Figura 5.19: Desgaste en función de la velocidad de corte. Ensayo V15 usando inserto CBN en seco y con refrigerante para 300M.	72
Figura 5.20: Chispas generadas al cortar en seco con inserto CBN.	73
Figura 5.21: Viruta generada al cortar en seco.	73
Figura 5.22: Desgaste en función de la velocidad de corte. Ensayo V15 usando inserto carburo para PH13-8Mo en estado blando y duro.	74
Figura 5.23: Resumen de rugosidades en ensayos V15. Valores después de la primera pasada y después de los 15 minutos.	75
Figura 5.24: Imagen metalográfica del 410.	76
Figura 5.25: Imagen metalográfica del PH13-8Mo.	76
Figura 5.26: Imagen metalográfica del 300M.	76
Figura 5.27: Desgaste y rugosidad de forma progresiva en el tiempo, para tres ensayos en el material 300M en las mismas condiciones.	79
Figura 5.28: Imágenes obtenidas con el software Alicona, para los ensayos de rugosidad y desgaste progresivo; a) inserto del primer ensayo b) inserto del segundo ensayo c) inserto del tercer ensayo.	80
Figura 5.29: Costos de remover cada decímetro cubico, en función del costo de la máquina por hora. Comparación de los 3 tipos de insertos.	83

1 Introducción

El desarrollo de las tecnologías está limitado por los avances que se hagan en los materiales. Hoy en día existen cientos de materiales muy específicos, aleaciones también conocidas como aceros de ingeniería. Estos requieren ser manufacturados con las últimas tecnologías, lo mismo aplica si se buscan geometrías peculiares, como por ejemplo, la de los álabes de una turbina. Para responder a esta necesidad, el AMRC [Advanced Manufacturing Research Center] junto a Tata Steel, lideraron la iniciativa “Proving Factory”, que pone la investigación al servicio de la industria manufacturera.

Tata Steel tiene un interés particular en mejorar el mecanizado de los aceros de bajo carbono, usados en la industria automotriz. Con el programa Proving Factory, busca reducir tiempos, aumentar la calidad y generar una óptima producción en masa, en resumen, ser reconocidos como industria modelo.

En la presente investigación, la cual pertenece a este gran programa, se genera información sobre los aceros especiales 410, PH13-8Mo y 300M, que permita facilitar las decisiones futuras de mecanizado, conocer más acerca de la calidad superficial obtenible al tornearse estos materiales en estado duro, así como evaluar los insertos y parámetros más influyentes.

1.1 Antecedentes Generales

Industrias como la automotriz y aeroespacial requieren de gran precisión y conocimientos que permitan mecanizar de forma óptima materiales especiales, obteniendo un buen acabado superficial que evite el desarrollo de grietas que pueden ser catastróficas. Normalmente, luego de tornearse se lleva a cabo en un proceso extra, el rectificado, el cual mediante la abrasión de una piedra, consigue una superficie del tipo espejo.

Los procesos de manufactura, tales como torneado, fresado y taladrado se han desarrollado a tal punto que se ha conseguido una especialización mayor, descubriendo y desarrollando insertos para distintas especificaciones de material, dureza, rugosidad, entre otros. Por tanto, la apuesta ahora es relacionar a cada material los factores de corte que optimicen su proceso de manufactura, acorde a los resultados esperados.

El concepto maquinabilidad describe que tan fácil es mecanizar un material. Se tiene una buena maquinabilidad cuando se consigue una superficie aceptable, con una vida de la herramienta prolongada, bajo consumo de potencia y gran productividad.

Las propiedades de los materiales, cómo fueron formados y sus microestructuras tienen una directa influencia en sus maquinabilidades. Definir parámetros de corte y propiedades de los insertos, ayudan a facilitar su mecanizado.

Este trabajo de investigación experimental apunta a encontrar los parámetros óptimos, para los aceros especiales, difíciles de mecanizar, 410, PH13-8Mo y 300M, utilizados en la industria automotriz.

1.2 Motivación

El proceso de rectificado, permite alcanzar una buena calidad superficial, sin embargo retrasa la fabricación de los componentes, debido a que es un proceso extra que sigue al torneado; por tanto, necesita un desmontaje y montaje adicional, lo que significa perder

material en alinear la instalación. También implica un gasto extra de energía y un proceso de coordinación entre los operarios del torno y los de la rectificadora.

Es así como la motivación es eliminar este proceso y conseguir una rugosidad baja en el torno, haciendo este proceso autosuficiente.

1.3 Objetivos y Alcances

1.3.1 Objetivo General

Determinar las condiciones de corte, en términos de velocidad de corte, tasa de alimentación, y geometría y material del inserto, para obtener una baja rugosidad por torneado en tres aceros especiales —410, PH13-8Mo y 300M—, de modo de evitar una ulterior etapa de rectificado.

1.3.2 Objetivos específicos

- Estudiar los parámetros de corte que influyen en el buen acabado superficial en torneado, que permitan obtener una rugosidad menor a $0.4 \mu\text{m}$ para cada material en estado duro.
- Caracterizar el desgaste de la herramienta en términos de tiempo de vida.
- Estudiar el comportamiento de insertos, cada uno de distinta geometría y materiales, tales como Carburos, Cermet y CBN.
- Obtener la combinación idónea de factores para los tres materiales especiales.
- Evaluar el mecanizado en duro. Particularmente determinar qué es más conveniente, hacer un semi-desbaste en estado suave y luego dar el acabado superficial o trabajar todo en estado duro.
- Relacionar la rugosidad con el desgaste progresivo del inserto.
- Hacer evaluaciones de los insertos en términos de costos.

1.3.3 Alcances

Los alcances de esta investigación, estuvieron definidos por el tiempo disponible para hacer los experimentos, 3 meses en el AMRC. Por tanto, sólo 3 materiales de insertos fueron probados: carburo, cermet y CBN. Es posible que otros pueden funcionar incluso mejor, pero no se dispone del tiempo suficiente para comparar más materiales.

En cuanto a la comparación de parámetros y costos, los resultados se trabajaron sólo con relaciones lineales, por simplicidad.

2 Antecedentes

En esta sección se muestran los antecedentes recopilados de distintas investigaciones, libros y material en línea, los cuales permitieron conducir el plan experimental.

El torneado es un proceso de mecanizado por arranque de viruta. Consiste en hacer girar una pieza —comúnmente cilíndrica— mientras una herramienta corta puntualmente alrededor de su perímetro, cara o al interior.

En el proceso de torneado se identifican tres parámetros de corte (ver Figura 2.1), los cuales definen el tiempo que toma el proceso y la calidad superficial que se obtiene, entre otros aspectos. A continuación se describen las medidas que toman, unidades y su denominación en inglés [1]:

- Velocidad de corte, V_c [m/min]: Corresponde a la longitud que recorre la herramienta, a través del material a tornear, por unidad de tiempo. Cutting speed, en inglés.
- Tasa de alimentación, f_r [mm/rev]: Corresponde a la distancia que avanza la herramienta, linealmente en dirección de la línea de centro de la pieza a cortar, por cada revolución que da la pieza. Feed rate, en inglés.
- Profundidad de corte, d [mm]: Es la distancia entre la superficie no cortada y la que ya fue mecanizada. Se mide perpendicular a la dirección de la tasa de alimentación. Depth of cut, en inglés.

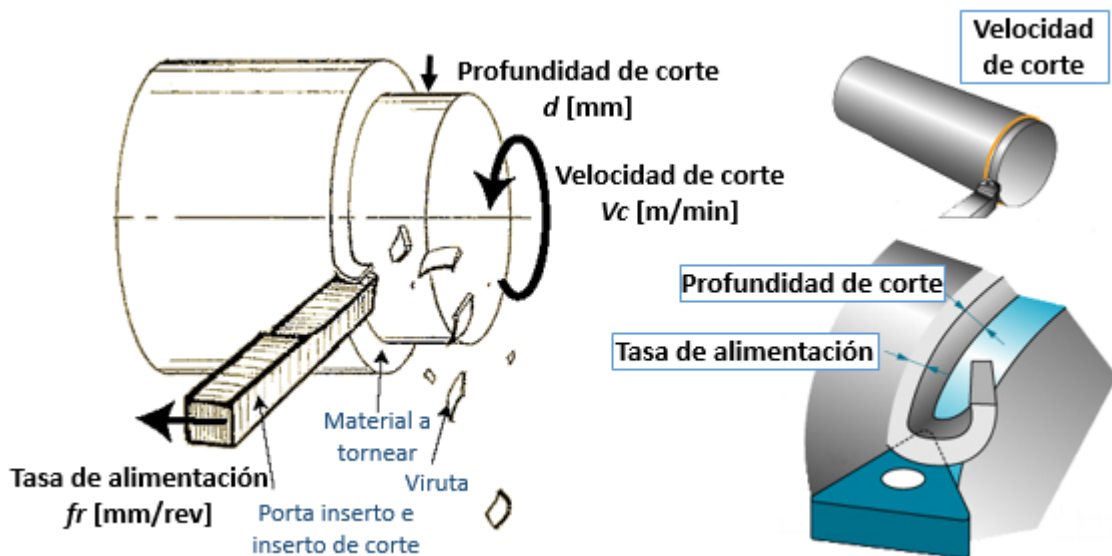


Figura 2.1: Parámetros de corte en el proceso de torneado. Imágenes adaptadas de: izquierda [2], derecha [3].

Los procesos de mecanizado están influenciados en gran medida por el material a cortar. En esta investigación se trabaja con aceros especiales, por tanto es importante analizar algunas de sus características.

2.1 Materiales

Los materiales seleccionados son usados en la industria automotriz, su ductilidad y dureza los vuelve idóneos para la fabricación de chasis, pues en caso de recibir un impacto se deformaran superado un elevado límite de esfuerzos, de esta forma en caso de colisiones menores, la deformación es mínima. Estos son comercializados por la empresa auspiciadora, Tata Steel, la cual busca tener mayor información de estos aceros, particularmente de sus procesos de mecanizado.

A continuación se describen las principales características de los materiales.

Los aceros de alta resistencia son aleaciones usadas donde se requiere un comportamiento mecánico sometido a elevadas sollicitaciones. El material 300M—también conocido como S155— corresponde a esta categoría de materiales. Es una aleación con buena combinación de resistencia, tenacidad, resistencia a la fatiga y ductilidad. El conjunto de estas propiedades hacen que sea difícil de mecanizar [4].

Los otros dos materiales son aceros inoxidable. Ellos no son tan tenaces como el anterior, pero su resistencia a la oxidación y corrosión los hace muy atractivos para un amplia variedad de aplicaciones. La propiedad inoxidable se genera al agregar Cromo como elemento aleantes. El Cromo normalmente incrementa la dureza, también la tenacidad y resistencia al desgaste; como consecuencia, la maquinabilidad decrece, acortando la vida de la herramienta. Adicionalmente, agregar Cromo altera las temperaturas críticas en tratamientos térmicos [5].

Los aceros inoxidables pueden ser divididos en diferentes sub grupos dependiendo de su composición, la que altera su microestructuras. El material 410 pertenece al sub grupo de aceros inoxidables martensíticos. Estos son ferromagnéticos, pueden ser endurecidos por tratamiento térmico, tienen buena ductilidad y tenacidad, las cuales decrecen al aumentar la resistencia con un templado.

Por otro lado, el PH13-8Mo pertenece a los aceros inoxidables endurecidos por precipitación, lo que se caracterizan por proveer un óptima combinación de las propiedades de los aceros martensíticos, tales como poder ser endurecidos por tratamientos térmicos, y los austeníticos, con mayor resistencia a la corrosión [6].

Algunos autores han definido las principales características que hacen que los aceros inoxidables sean difíciles de mecanizar [7,8,9]: baja conductividad térmica, elevada tendencia a acumular viruta—desde ahora llamado BUE, por sus siglas en inglés Built Up Edge, ver Figura 2.2 y Figura 2.3—, alta tenacidad a la fractura, tendencia al endurecimiento por deformación y partículas abrasivas.



Figura 2.2: BUE (Built up Edge). En el inserto se deposita parte del material cortado [10].

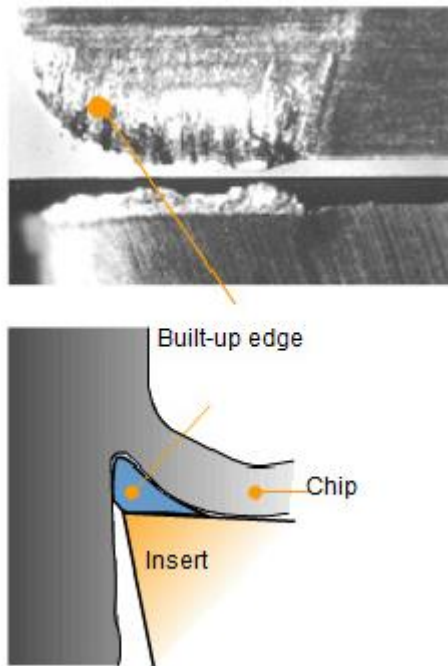


Figura 2.3: Ejemplo de BUE en el inserto [11].

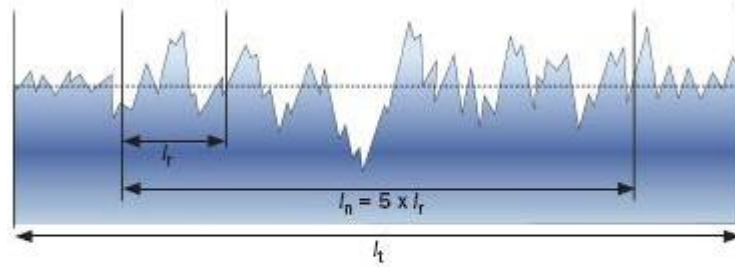
2.2 Rugosidad Superficial

La rugosidad corresponde a una desviación vertical de la superficie real respecto a la ideal completamente llana. La superficie generada es el resultado de la cinética, interacción con la herramienta y las vibraciones originadas, así como también depende de las propiedades del material, intrínsecas y extrínsecas, como alteraciones de los procesos de fundición [12,13].

Propiedades como la resistencia a la fatiga, resistencia a la corrosión, comportamiento tribológico¹ y precisión geométrica, mejoran con menores rugosidades, ya que superficies con imperfecciones, son el escenario ideal para generar grietas en estado de fatiga. Por otro lado, superficies rugosas al estar en fricción con otras piezas, originan un desgaste mayor, disminuyendo la vida útil de las piezas y generando pérdidas energéticas por fricción.

Para medir la calidad superficial, se definen longitudes de medición, mostradas en la Figura 2.4, la función de esto es actuar como filtro, eliminando ondulaciones y otras anomalías de la medición. Existe el largo total l_t correspondiente a la distancia total que recorre la aguja del rugosímetro. Esta longitud registra las oscilaciones iniciales y finales, las cuales se excluyen del registro. Es así como se define una distancia medible l_n , su largo es cinco veces la distancia mínima para captar la información l_r (definida por normas internacionales).

¹ Se denomina tribología (del griego “tribos”; roce o frotación) a la ciencia que se ocupa de la fricción, el desgaste y la lubricación de las superficies en contacto.



Largos de medición

l_t = largo total que recorre la aguja al medir

l_n = largo de evaluación

l_r = largo de referencia, 5 longitudes equidistantes

Figura 2.4: Largos a considerar para medir la rugosidad. Adaptado de [14].

Al momento de medir se obtienen típicamente 4 parámetros de la rugosidad, nombrados a continuación [15]:

Rugosidad promedio R_a : Corresponden al promedio aritmético de los valores absolutos de los puntos del perfil de rugosidad respecto de la línea media. La Ecuación 2.1 muestra el cálculo por definición, pero en términos prácticos se toma como puntos discretos, resultando en una sumatoria en lugar de una integral.

$$R_a = \frac{1}{l_n} \int_0^{l_n} |y| dx \quad (2.1)$$

R_a : Rugosidad promedio [μm]

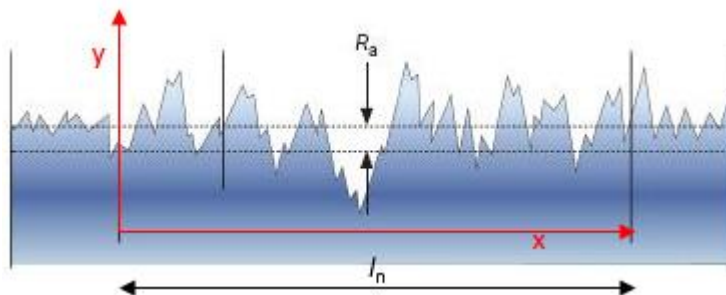


Figura 2.5: Rugosidad promedio. Adaptado de [14].

En la Figura 2.5 se muestra la interpretación física de este parámetro.

Es el parámetro más usado, pues es fácil de obtener e interpretar. No es recomendable en procesos donde los valles y picos son muy pronunciados, pues al promediar absorbe dicha información.

Rugosidad media R_z : Es el valor promedio de las diferencias máximas entre valle y pico en cada longitud R_i (ver Figura 2.6). Se usa cuando el perfil es periódico y conocido.

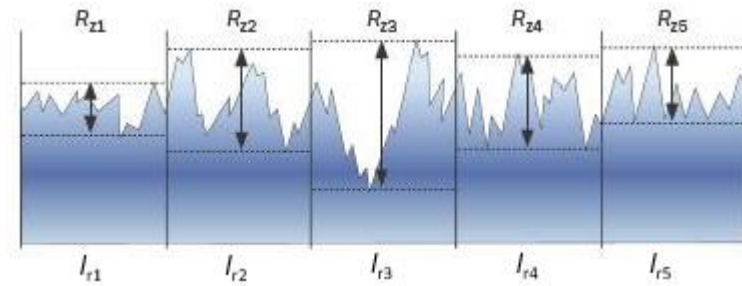


Figura 2.6: Rugosidades parciales en los cinco módulos [14].

$$R_z = \frac{R_{z1} + R_{z2} + R_{z3} + R_{z4} + R_{z5}}{5} \quad (2.2)$$

R_z : Rugosidad media [μm]

Profundidad total de la rugosidad R_y : Corresponde a la mayor diferencia entre un valle y un pico, dentro de un tramo de la longitud de referencia (ver Figura 2.7). Informa sobre el máximo deterioro presentado en la superficie.

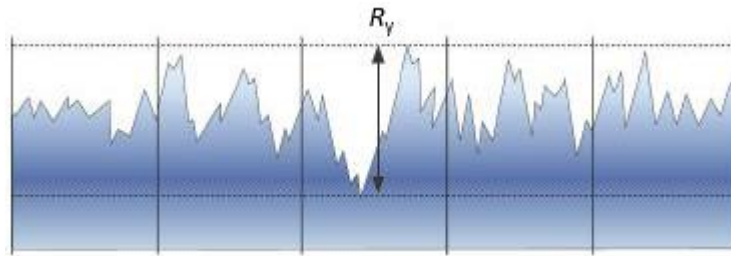


Figura 2.7: Profundidad total de la rugosidad [14].

Rugosidad media cuadrática R_q : Es el valor medio cuadrático de las desviaciones del perfil (Ecuación 2.3). Dado que representa la desviación estándar de las medidas del perfil, es más sensible a los valores extremos que el valor promedio.

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l_n} \int_0^{l_n} y^2 dx} \quad (2.3)$$

R_q : Rugosidad media cuadrática [μm]

En la Figura 2.8 se ilustra cómo se mide la rugosidad al usar un instrumento de contacto. Se genera un perfil, similar al mostrado en color rojo. De esos valores se obtienen las medidas señaladas anteriormente.



Figura 2.8: Forma de medir la rugosidad [14].

Se tienen distintos procesos de manufactura que son capaces de obtener superficies espejo. El fresado y el torneado no se caracterizan por las menores rugosidades obtenidas, pero constituyen los procesos más sencillos y eficientes en términos de la producción.

Normalmente, para mejorar la superficie obtenida después del torneado, fresado o perforado; se mecaniza la pieza usando un proceso de terminación. El rectificado es la opción más común; consiste en una herramienta abrasiva —llamada piedra— que remueve el material por efecto de la fricción. Se trata de un proceso con una muy baja productividad. Su calidad depende del tamaño de grano, el material de la piedra y sus aglutinantes. La superficie obtenida se encuentra en el rango de 0.1 a $0.2 \mu\text{m}$. La Figura 2.9 ilustra el proceso de rectificado.

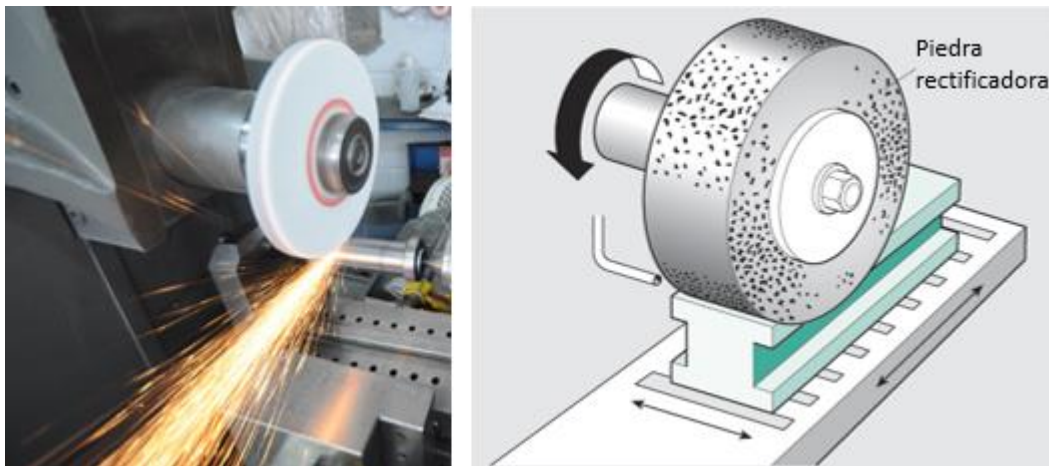


Figura 2.9: Proceso de rectificado. Adaptado de [16].

Si se buscan rugosidades menores, el pulido es una mejor solución. En este se usa herramientas abrasivas, las cuales son más exactas que las de rectificado, y es posible obtener una rugosidad tan baja como $0.05 \mu\text{m}$.

El rectificado y el pulido implican un consumo mayor de energía, la mayoría de esta se transfiere en forma de temperatura al material. Además estos procesos significan mayor tiempo, pues se debe trasladar el material, hacer un nuevo montaje; comunicación entre los operadores de las distintas áreas. Todo esto encarece el mecanizado e impacto

ambiental, pues se remueve más material del necesario. En ocasiones se usan refrigerantes, aumentando la energía y la contaminación.

En función de lo anterior, prescindir de estos procesos de finalizado es necesario. En los últimos años el torneado en duro ha ido reemplazando al rectificado, debido a su capacidad de obtener las mismas o similares superficies. El torneado en duro, por definición, se aplica a materiales con una dureza igual o superior a 45 HRC, bajo esta dureza, solo se llama torneado. Dada las características de los tres materiales considerados, el estudio se focalizó en las superficies obtenidas para materiales duros, sobre 45 HRC o más, por tanto se trata de torneado en duro.

Como referencia de rugosidades obtenidas en torneado en duro; un estudio [17] en acero inoxidable de 3%Co y 12%Cr fresado usando distintos ángulos de barrido (rake angle), mostró que luego de 16.5 minutos se pudo obtener una rugosidad promedio de $0.49 \mu\text{m}$.

Matsumoto et al. [18] señalan que el torneado en duro puede alcanzar superficies tan buenas como las obtenidas en el rectificado. A esto debe agregarse la gran ventaja de que el torneado en duro consigue una productividad significativamente mayor, fuerzas de corte menores y posibilidad de cortar sin refrigerante, lo cual disminuye aún más el impacto medio ambiental. Mayor detalle de sus ventajas económicas y ambientales se encuentra reportada en [19]. Además, un punto importante, es que el torneado en duro aumenta la vida a la fatiga [20,21]. No obstante, el torneado en duro requiere una mayor rigidez de la máquina, para evitar vibraciones.

Los cambios de temperatura y las deformaciones, son consecuencias de tornear materiales duros, pues se emplea mucha energía, esto imposibilita mecanizar piezas delgadas. Transformaciones metalográficas pueden surgir de estos cambios de temperatura abruptos. “Capa blanca” es el término genérico para referirse a las deformaciones provocadas por cambios metalográficos o endurecimientos. Recibe este nombre, pues aparece como una película blanca en el microscopio óptico (ver Figura 2.10). En algunos casos se atribuye este cambio como una transformación a martensita en los aceros templables.

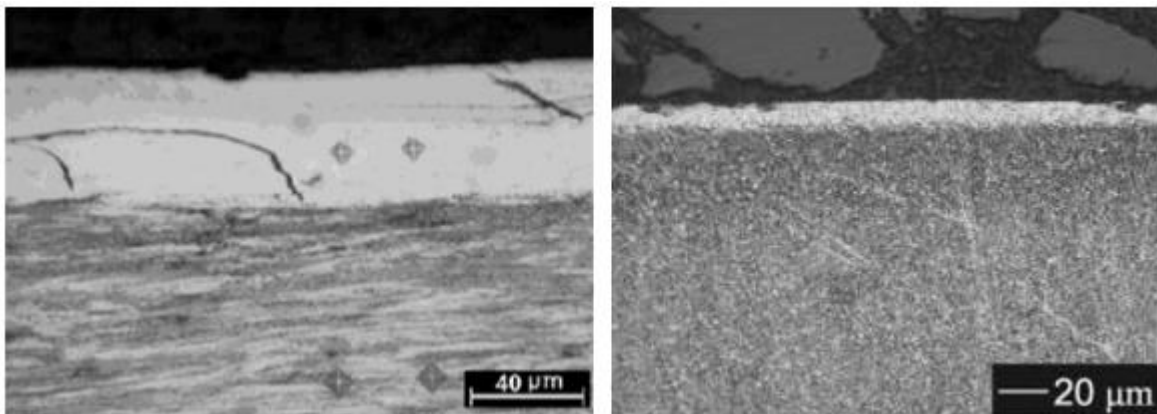


Figura 2.10: Ejemplos de capa blanca. Derecha de [22], izquierda de [23].

La capa blanca consiste en una envoltura de dureza mayor, acompañada de una fragilidad mayor que hace el material menos resistente a la fatiga y empeora el acabado superficial. Su profundidad varía en función de la capacidad calorífica —puede alcanzar espesores de $10 \mu\text{m}$ — y las propiedades químicas y mecánicas de los materiales. Una de las

explicaciones encontradas de esta formación es el rápido calentamiento y enfriamiento al que se expone una superficie trabajada [19].

Como se mencionó, el torneado en duro en ocasiones se puede aplicar en estado seco. Lo que facilita la remoción del material pues se incrementa la temperatura al cortar sin refrigerante, haciendo al material más suave y por tanto más fácil de cortar. Los insertos CBN (Cubic Boron Nitride) son usualmente usados en seco, dado a su elevada resistencia al calor, pueden soportar hasta 2.000 °C. Pese a que se ha reportado a lo largo de los años que el fluido de corte actúa como un lubricante, disminuyendo el desgaste de la herramienta [24], esta opción gana más adeptos.

Es así como se observa que muchos factores influyen en obtener un buen acabado superficial. Una de las mejores superficies encontradas en el estudio de publicaciones, fue la obtenida por Olivera et al [25], quienes analizaron el corte continuo e interrumpido y encontraron una rugosidad de 0.6 µm luego de 40 minutos de corte.

A pesar de que la calidad superficial es un factor importante, no se debe dejar completamente de lado la productividad. Al hacer acabados superficiales, la productividad disminuye, comparando con el proceso de desbaste del material. La productividad se puede cuantificar con el índice MRR (por sus siglas en inglés; Material Removal Rate, traducido como Tasa de Remoción del Material). La definición de este factor se presenta en la Ecuación 2.4.

$$MRR = V_c \cdot f_r \cdot d \quad (2.4)$$

Donde

MRR : Tasa de remoción del material $\left[\frac{\text{cm}^3}{\text{min}}\right]$

V_c : Velocidad de corte $\left[\frac{\text{mm}}{\text{min}}\right]$

f_r : Tasa de alimentación, f_r por sus siglas en inglés feed rate $\left[\frac{\text{mm}}{\text{rev}}\right]$

d : Profundidad de corte, d por su sigla en inglés depth of cut [mm]

Es decir la productividad depende netamente de los parámetros de corte. A continuación se explica lo que se ha reportado en la literatura de la influencia de los distintos factores en la rugosidad, comenzando por los parámetros de corte.

2.3 Parámetros de corte

Se ha reportado la influencia de los parámetros de corte en el acabado superficial. Un ejemplo integral de esto, es el estudio realizado por Das et al. [26] que se focalizó en la influencia de los parámetros de velocidad de corte, tasa de alimentación y profundidad de corte, concluyendo que el parámetro más importante es la tasa de alimentación y el de menor relevancia es la profundidad de corte. A continuación se hace un análisis con mayor detalle.

2.3.1 Tasa de alimentación [mm/rev]:

Muchos autores concluyen que este es el parámetro más importante para conseguir buena rugosidad. Menores valores generan menor rugosidad.

Durante los años, en internos por cuantificar la influencia de los parámetros, algunos autores han desarrollado modelos matemáticos, en los cuales incluyen todas las variables. Seireg et al. [27], condujeron un estudio experimental para encontrar en una sola ecuación la influencia de la velocidad de corte, la tasa de alimentación, la profundidad de corte y el radio de la nariz del inserto (Figura 2.11 representa distintos radios de inserto) . Obtuvieron una ecuación muy compleja, de todas formas al hacer un estudio de sensibilidad, notaron que los factores que más influyen son la tasa de alimentación y el radio de la nariz del inserto. Si el radio se incrementa, entonces la rugosidad disminuye, el mismo efecto se tiene al disminuir la tasa de alimentación.

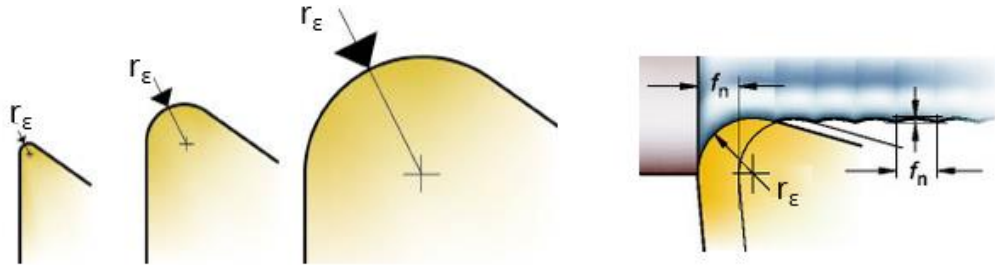


Figura 2.11: Radios de inserto en orden creciente. Impacto del radio en el mecanizado [28].

La ecuación más conocida, pero no exacta, de la rugosidad es la siguiente:

$$R_{max} = \frac{fr^2}{8r_\epsilon} \quad (2.2)$$

R_{max} : Rugosidad máxima [μm]

fr : Tasa de alimentación [$\frac{\text{mm}}{\text{rev}}$]

r_ϵ : Radio del inserto [mm]

Petropoulos [29] en sus investigaciones experimentales notó que esta ecuación no es del todo precisa. La Figura 2.12 muestra sus resultados obtenidos. Con líneas segmentadas se representa el valor teórico y en continuas el medido. A la izquierda de la figura se nota que los valores siguen una tendencia, pero no lo hacen en forma precisa clara como lo sugiere la ecuación.

Con el fin de encontrar una ecuación más exacta, se están haciendo investigaciones haciendo uso de las redes neuronales [30], las cuales muestran resultados más complejos, con largas ecuaciones que relacionan todos los parámetros de corte e influencia de la nariz del inserto, empero ninguna de estas ecuaciones es absoluta, dicho de otra manera, ninguna funciona en todos los casos de igual forma.

En el estudio de la influencia de la tasa de alimentación, Dawson and Kurfess [31] observaron en sus estudios, realizados en un material de 58 HRC con un inserto CBN, que bajo un cierto valor de la tasa de alimentación, la rugosidad comienza a aumentar nuevamente, pues la herramienta rasguña en lugar de cortar.

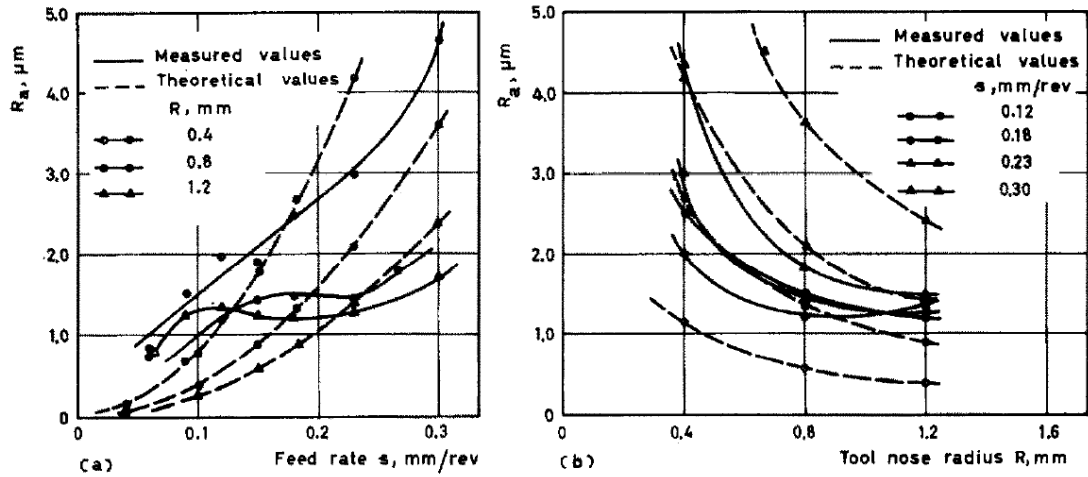


Figura 2.12: Comparación de rugosidad teórica (con la fórmula mostrada) y experimental, con diferentes radios de la nariz en los insertos [29].

2.3.2 Velocidad de corte [mm/rev]

Resultados experimentales obtenidos por varios autores [27,32,33], concluyen que la rugosidad superficial mejora al incrementar la velocidad de corte. Suresh et al. [34], estudiaron la maquinabilidad para un acero endurecido, el AISI 4340. La Figura 2.13 exhibe uno de los resultados obtenidos, en el cual se observa cómo la rugosidad se ve influenciada de forma perfectamente lineal por la velocidad de corte. La proporcionalidad exacta mostrada, sugiere hacer un estudio experimental, pues es extraño que en mecanizados se de una relación tan perfecta, considerando que muchos factores influyen.

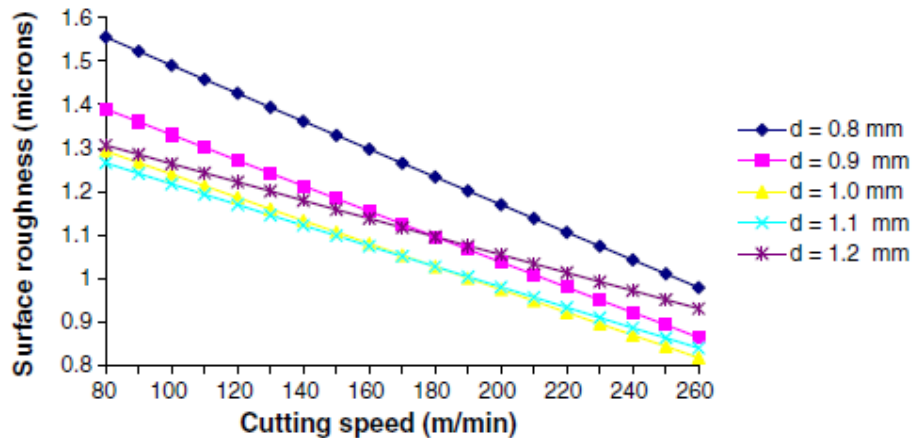


Figura 2.13: Efecto de la velocidad de corte y la profundidad de corte [34].

Korkut et al [35] atribuyeron a la relación inversamente proporcional entre rugosidad y velocidad de corte, la presencia de BUE a bajas velocidades de corte, ya que el tiempo de contacto es mayor y permite acumular material en los insertos, deformando su cara de corte. Tekiner y Yeşilyurt [8] construyeron el gráfico mostrado en la Figura 2.14, el cual muestra que el alto del BUE decrece al aumentar la velocidad de corte, por tanto mejora su calidad superficial, ya que el inserto corta de forma pareja, plana, sin material que produzca olas en la superficie. El experimento fue llevado a cabo en el acero AISI 304.

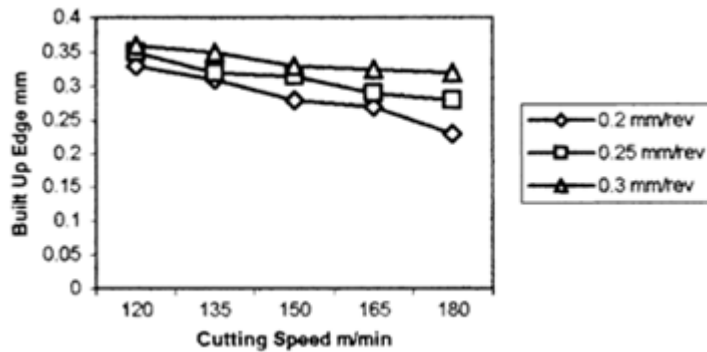


Figura 2.14: Efecto de la velocidad de corte en la formación de BUE. Material AISI 304 [8].

Por otro lado, respecto a la influencia de la velocidad de corte, Selvaraj et al. [36] concluyen que es posible encontrar un óptimo de velocidad de corte para cada material, que la calidad no mejora asintóticamente, y llega un punto en que altas velocidades empeoran el acabado superficial. También comentan que el desgaste producido en la herramienta, se incrementa a elevadas velocidades de corte, teniendo por consecuencia un acabo superficial más pobre, es decir atribuyen al uso de la herramienta la calidad de la superficie que se puede generar.

2.3.3 Geometría del inserto

Este es otro factor clave en la rugosidad obtenida en una superficie.

Lo que más afecta en términos de la geometría, como ya se mencionó, es el radio de la nariz del inserto. Chou y Song [37] explican que se obtiene una mejor superficie con radios mayores, porque se obtienen una menor área sin cortar, la Figura 2.15 representa la zona no cortada en el torneado. A esto agregan que en herramientas ya gastadas, mayores radios generan capas blancas más profundas, sin embargo cuando se corta con las herramientas nuevas, la capa es más superficial.

Otro factor que influye en la generación de la capa blanca es la velocidad de corte, pero las conclusiones difieren, Chou y Evans [38] plantean un incremento en el espesor de la capa blanca a elevadas velocidades de corte, con la presencia de un máximo en los valores. Por otra parte Boshch y Mativenga [19] encontraron que a mayor velocidad de corte, la profundidad y dureza de la capa blanca disminuye.

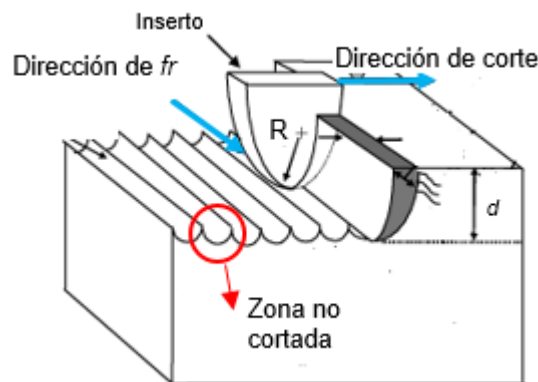


Figura 2.15: Las ondulaciones, representan la zona no cortada por el inserto.

Asimismo como el radio de la nariz influye en la presencia y profundidad de la capa blanca, lo hace en los esfuerzos generados, mayores radios generan menores esfuerzos de compresión, los cuales ayudan a disminuir la vida a la fatiga [26,39].

En términos de la rugosidad otro factor a evaluar en el inserto es su ángulo de barrido (conocido como rake angle). Saglam et al. [40] sugieren usar ángulos positivos para mejorar la superficie, pues la forma afilada con la que entra al inserto (ver Figura 2.16), ayuda a la viruta a salir, sin tener que arrancar la viruta en impulsos de energía, además esto disminuye las fuerzas. Por su parte los ángulos negativos son más usados en procesos de desbaste, ya que tiene más superficie en contacto con la viruta.

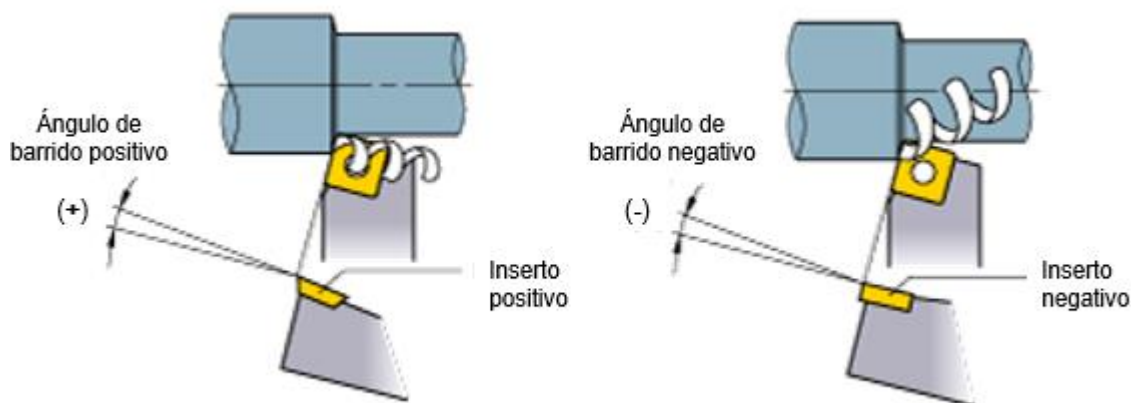


Figura 2.16: Ángulos de barrido. Izquierda positivo, derecha negativo [41].

Una gran mejora en términos de la geometría del inserto son los insertos Wiper. Estos tienen un radio múltiple como lo muestra la Figura 2.17. Como gran ventaja, puede conseguir el mismo acabado superficial que una herramienta convencional, pero con el doble de la tasa de alimentación [42], en la Figura 2.18 se presentan los resultados obtenidos en esta investigación.

Los distribuidores de este inserto lo recomiendan como inserto para reemplazar el rectificado. De hecho Özel et al. [43] en su estudio obtuvieron una rugosidad tan buena como la que se puede alcanzar por medio del rectificado; de $0,18 \mu\text{m}$ con una tasa de alimentación de $0,05 \text{ [mm/rev]}$ en una material de dureza 60 HRC.

Estos insertos son una alternativa interesante en términos de la productividad y la calidad superficial.

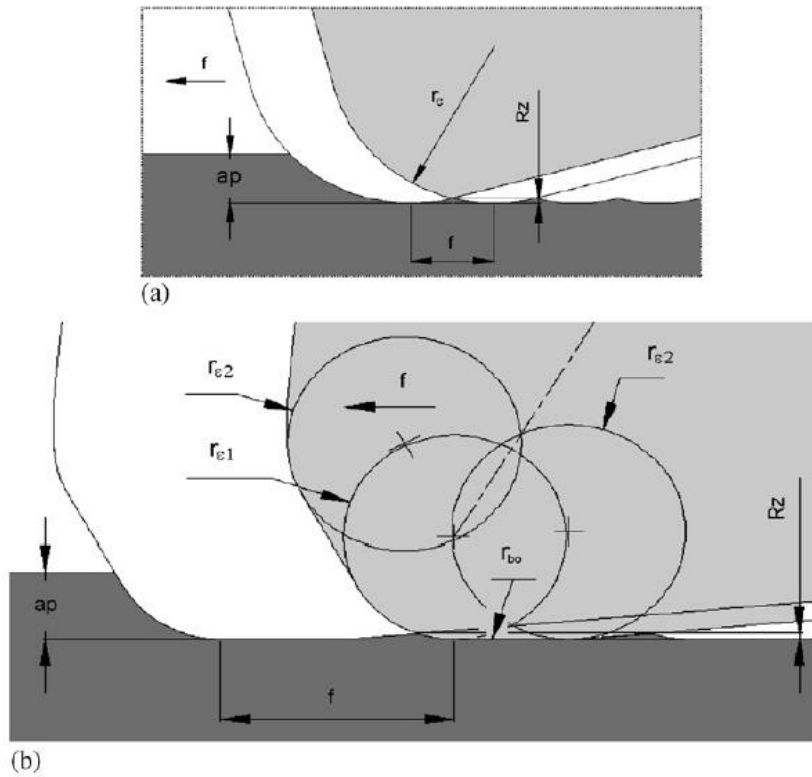


Figura 2.17: Comparación de un inserto con geometría convencional (a) y forma Wiper. Símbolos: f – tasa de alimentación; a_p – profundidad de corte; r_c radio del borde cortante; r_{c1} y r_{c2} – radios de la curvatura Wiper; r_b – radio de suavización. : R_z – Rugosidad media [42].

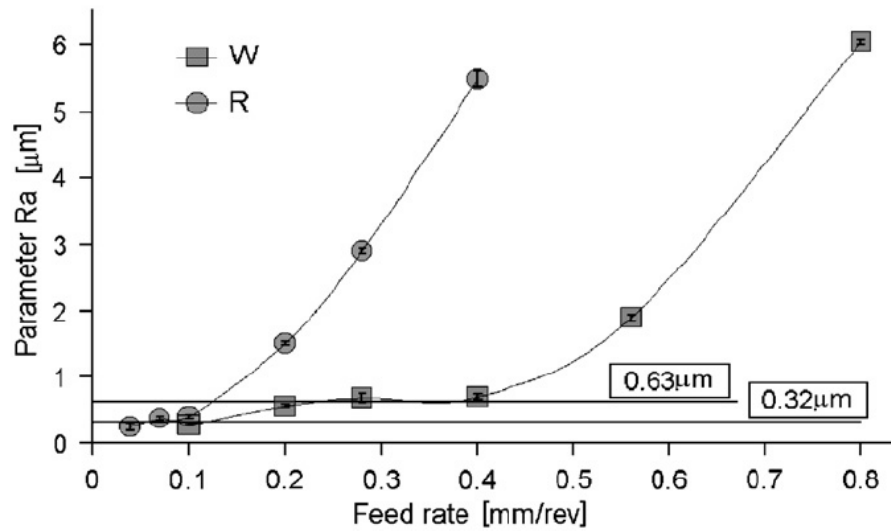


Figura 2.18: Gráfico obtenido, el cual demuestra la mejora de la geometría wiper, sobre la convencional [42].

2.3.4 Material de los insertos

Varios investigadores han realizados experimentos en torneado en duro con distintos materiales, tales como CBN cubiertos y no cubiertos, CBN policristalinos, cermet, carburos, cerámicas y herramientas con diamante.

La tónica general es recomendar el uso de herramientas cubiertas. Existen dos formas de hacer el recubrimiento: CVD Deposición química por vapor [Chemical Vapor Deposition] y PVD Deposición física por vapor [Physical Vapor Deposition]. Cuando el material depositado consiste en su mayoría en Carbonitruros de titanio (TNC) se identifica el inserto con las siglas MTCVD o MTPVD respectivamente.

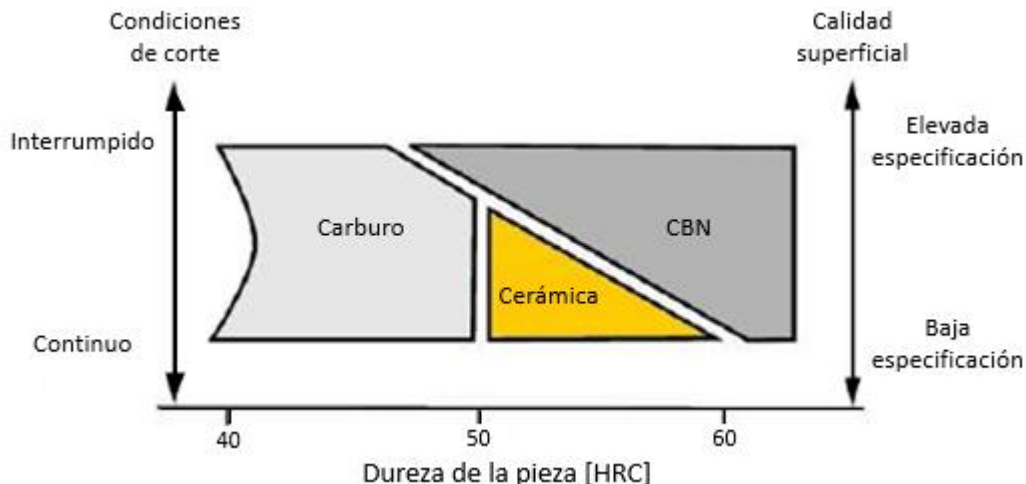


Figura 2.19: Material del inserto de acuerdo a la dureza, el tipo de corte y la calidad superficial buscada. Adaptado de [44].

De acuerdo al principal distribuidor de herramientas, Sandvik, un criterio para la elección del material es considerar su dureza, la calidad superficial que se quiere obtener y el tipo de corte, como se presenta en la Figura 2.19. Se observa que el uso de carburos no se recomienda para materiales de dureza superior a 50 HRC. Por su parte cerámicas son recomendadas para durezas entre 50 y 60 HRC. Los CBN son la mejor opción cuando se tornean materiales con dureza superior a 48 HRC, enfocado en la superficie obtenida. A esta información, se le suma la obtenida en conversaciones internas con representantes de Sandvik, quienes recomiendan usar cermets cuando se trabaja con durezas cercanas a los 45 HRC, sobre todo si se trata de aceros inoxidables. Es conocido también que herramientas de diamante —sintéticas y naturales— mecanizan sin problema materiales duros, el gran problema es que al interactuar con aceros producen grafitización [45], lo que merma el perfil de la herramienta. Por esto y su elevado precio se descartan de la investigación insertos de diamante.

En base a lo anterior, se estudian los tres materiales que resultan más interesantes [46]:

Carburos: Son los insertos más comunes representando 80-90% del mercado. Los carburos, principalmente de TiC se encuentran unidos por medio de cementos. Existen cubiertos y no cubiertos, siendo los primeros los que obtienen mejores propiedades de corte. Nótese que de aquí en adelante al decir carburo, se hace alusión a los carburos recubiertos unidos por cementos y producidos en una ambiente rico en Cobalto que le da tenacidad.

El éxito de esos insertos, se debe su combinación de resistencia al desgaste y ductilidad, lo último le permite conseguir diversas formas.

De particular interés son los carburos MTCVD, es decir recubiertos químicamente con Carburos de titanio y Nitruros de titanio, pues la dureza que alcanzan permite disminuir el desgaste de flanco.

Cermets: Similares a los carburos en composición, la diferencia es que además de poseer carbonitruros de titanio, tienen una segunda fase dura compuesta de Titanio, Tungsteno, Niobio, Nitrutos, todos en forma de carburos.

CBN: Son la tecnología más reciente. Su muy elevada resistencia a la temperatura, —hasta 2000 °C— dureza, elevada productividad, excelente resistencia a la abrasión y su gran estabilidad química al cortar, los hacen un inserto muy llamativo. Los materiales que más cerca está de los CBN por su dureza y resistencia a la temperatura, son las cerámicas. Oliveira et al. [25] los compararon, consiguiendo una menor rugosidad con los insertos CBN.

En el caso de los CBN, se estudian los insertos PVD, unidos principalmente por cerámicas.

2.3.5 *Fluido de corte*

Hoy en día, el uso de fluido de corte, ha sido muy discutido entre los investigadores y empresas manufactureras. Actualmente es usado de forma masiva, por sus propiedades lubricantes y de refrigeración. A lo largo de la historia se han realizado bastantes investigaciones sobre los refrigerantes, es por esto que actualmente existen diversos tipos en el mercado.

El problema está en el impacto que este genera en el medio ambiente y los costos asociados a la mantención, almacenaje y reciclaje —cuando es posible—, razones que hacen pensar en alternativas a los refrigerantes usados actualmente.

Un estudio realizado en la industria automotriz Europea en los años 90, [47] concluye que un 16.9% de los costos totales, se atribuye al uso de refrigerante. Considerando los impuestos aplicados hoy en día por contaminar y el impacto que esto produce, los costos aumentan aún más.

De esta manera estudios sustentan el interés en hacer cortes en seco, los cuales son posibles con herramientas de alta resistencia al calor, tales como CBN.

Otras alternativas son los sistemas MQL, que buscan la cantidad mínima de refrigerante en el proceso de corte. Investigadores [24] hicieron pruebas con tres métodos: refrigerante, seco, MQL. Concluyeron que el método MQL es el mejor en términos de fuerzas, vida de la herramienta, superficie, morfología de la viruta y temperaturas alcanzadas. Es un método interesante, pero se necesitan equipos especiales para llevarlo a cabo y las pruebas que determinen cuál es la cantidad mínima a ser inyectada.

Otra alternativa que está siendo investigada hace pocos años, es usar un enfriamiento criogénico, lo cual es mucho más amigable con el medio ambiente.

2.3.6 *Desgaste de la herramienta*

Respecto a la influencia del desgaste de la herramienta en la calidad superficial, no se encontraron muchos estudios. Pavel et al. [48] hicieron experimentos de este tema en

corte continuo e interrumpido —se entiende por corte interrumpido el que usa el inserto por un par de minutos, luego lo deja de usar, dándole tiempo de recuperación y lo retoma para seguir mecanizando— para torneado en duro. Usaron un acero 1117 endurecido y un 1137 de mediana dureza, ambos con 45 HRC aproximadamente. Para las mismas condiciones, la calidad superficial obtenida fue de 0,2 μm en corte interrumpido y de 0,57 μm en corte continuo. Lo que sugiere una mejora en la superficie haciendo uso del corte interrumpido

En base a estos antecedentes y otros omitidos por la extensión del informe, se eligen los parámetros de corte, insertos con sus respectivos materiales y geometrías, y condiciones de enfriamiento a ser probados en este estudio.

3 Metodología

Para cumplir los objetivos de este proyecto, el primer paso es realizar una revisión de la literatura, con el fin de recopilar los antecedentes respecto al tipo de insertos que se recomienda, específicamente referente a sus materiales y geometría. Además tener referencia de valores de rugosidades alcanzadas en materiales duros y especiales.

Una vez abordado los temas de forma teórica, se pasa a programar los experimentos, que consisten principalmente en tornejar los tres materiales bajo diversas condiciones. Para que estas sean consistentes, se diseña un plan de trabajo dividido en grupos, de esta forma los objetivos se pueden desarrollar de manera focalizada, y a la vez interdependiente.

A continuación se muestra un diagrama que sintetiza la forma en que se lleva a cabo este estudio.

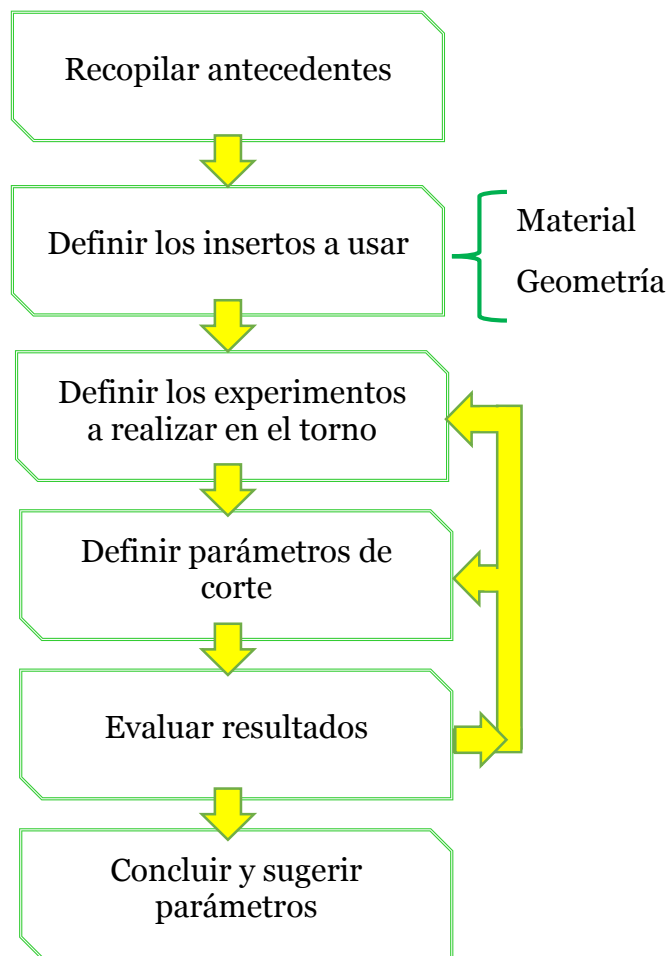


Figura 3.1: Diagrama de metodología

Considerando que esta es una investigación netamente experimental, se necesita un torno y equipos para realizar las mediciones. En esta sección se nombran todos los equipos e instrumentos utilizados.

3.1 Equipos utilizados

En esta sección se describen las características más importantes de los equipos que fueron utilizados en las pruebas.

3.1.1 Torno CNC

Pieza clave del estudio es el torno CNC. Corresponde a un torno marca Cininnati, modelo Hawk 300 NC. El centro de investigación contaba con más de 10 tornos CNC, este fue escogido por dos razones principales: es un torno convencional, similar al que se posee en el proyecto “Proving Factory”, y porque es de fácil uso, lo que facilitó que las pruebas fueran realizadas por la alumna y quienes la ayudaron, sin mayor dificultad.



Figura 3.2: Torno CNC utilizado.

Este torno es de control numérico. Tiene una pantalla táctil Siemens Acramatic 2000 y también cuenta con teclado para ingresar los parámetros, tal como se muestra a la izquierda de la Figura 3.2.

Su torre de herramientas, puede soportar 12 herramientas, como lo muestra la figura a la derecha. Tiene una capacidad máxima de giro de 3300 revoluciones por minuto.

3.1.2 Refrigerante

El refrigerante usado para las pruebas fue Holocut 7686. La concentración de este se mantuvo dentro del 6-7%. El caudal de este fue de 22-24 litros por minuto.

3.1.3 Microscopio de alta precisión

Para la medición del desgaste fue utilizado el microscopio de alta precisión Carl Zeiss Stemi 2000, mostrado en la Figura 3.3. Este se conecta a un computador y posee su propio programa que permite medir las pruebas de desgaste, tomar fotografías y hacer observaciones en tiempo real. Su resolución fluctúa de x10 a la máxima x50.



Figura 3.3: Microscopio Carl Zeiss Stemi 2000

3.1.4 *Microscopio portable USB*

Este microscopio tiene la gran ventaja de ser transportable a cualquier lugar de forma fácil, sólo se necesita de un computador para ser conectado y descargar el software para que las imágenes aparezcan.

Tiene una resolución de x20. No pueden tomarse medidas del desgaste con el programa, pero es útil para hacer inspecciones visuales preliminares, tanto del desgaste como de la rugosidad (por las marcas que quedan).



Figura 3.4: Microscopio USB portable

3.1.5 Rugosímetro

El cual permite medir los distintos parámetros de la rugosidad:

- Rugosidad promedio, Ra
- Rugosidad media, Rz
- Profundidad total de la rugosidad, Ry
- Rugosidad media cuadrática, Rq

Se utilizó el rugosímetro de contacto Mitutoyo SJ-301, mostrado en la Figura 3.5. La pantalla mostraba los valores obtenidos luego de que el cabezal —posicionado como se muestra al costado derecho de la figura— hiciera su recorrido por la superficie.



Figura 3.5: Rugosímetro Mitutoyo SJ-301

3.1.6 Set de dinamómetro

Para medir las fuerzas al tornearse la barra, se instaló un dinamómetro conectado al sostenedor del inserto y al inserto, como se observa al costado derecho de la Figura 3.6.



Figura 3.6: Set de medición de fuerzas Kistler 921, con su respectivo software, amplificador y dinamómetro.

Se debe ubicar una manguera de forma especial, para suministrar el refrigerante. Otra modificación que se debe realizar es realizar una perforación en la carcasa del torno, que permita transmitir la señal al amplificador que se encuentra fuera del torno, es importante que este cable no se enrede dentro del torno, para esto se debe observar y tomar las medidas necesarias, como detener el corte en casos extremos. El amplificador de la señal se conecta al computador, el cual muestra los resultados obtenidos, como se ve al costado izquierdo de la Figura 3.6.

3.1.7 Sistema de escáner Alicona

Alicona es una empresa dedicada a desarrollar equipos capaces de escanear elementos en forma tridimensional, lo que permite reproducir y amplificar un inserto, analizando con mayor detalle su estado.

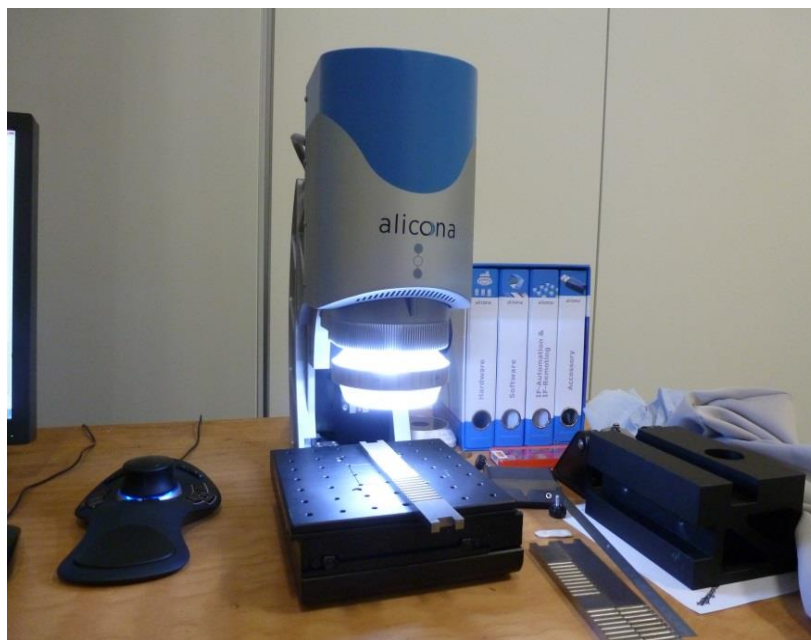


Figura 3.7: Sistema de escáner Alicona.

El sistema de escáner, mostrado en la Figura 3.7, consiste en un sistema óptico, el cual hace variaciones focales con una luz blanca LED. Avanza de arriba hacia abajo tomando distintas fotografías en los diferentes niveles, lo que permite formar la imagen, todo esto explicado en términos muy simplificados.

Diversos usos pueden ser dados, para efectos de este estudio, se usa en el análisis del desgaste de las herramientas. Para esto el inserto debe ser escaneado en su condición nueva y luego en la que se desea estudiar, pues de esta forma se hace la comparación de las modificaciones sufridas. Es un sistema interesante, que permite observar con detalle la condición del inserto en 3 dimensiones, el principal problema es que toma bastante tiempo, cerca de 1 hora para cada escaneo, además se debe tener un conocimiento mínimo, pues un mal posicionamiento de las luces, puede generar una imagen completamente blanca, o se pueden perder algunas características, es por esto que algunos trabajadores del AMRC realizan curso de perfeccionamiento constantemente.

3.2 Condiciones experimentales

Los materiales fueron suministrados por el auspiciador del proyecto, Tata Steel.

Todos los materiales se recibieron en estado blando, después, desde el centro de investigación, y de acuerdo a una orden emitida por Tata Steel, 2/3 de las barras de cada material se enviaron a una empresa dedicada a realizar tratamientos térmicos.

Las barras presentaban distintos diámetros y tamaños, dependiendo del acero, facilitando la identificación. Así, las barras cilíndricas de mayor diámetro corresponden al acero inoxidable martensítico 410, las de mediano grosor al acero inoxidable por precipitación PH13-8Mo y las largas de menor diámetro al acero 300M, ver Figura 3.8.



Figura 3.8: Entrega de las barras a probar.

Los materiales se marcaron con el número del proyecto (AS645B) y el grado del material, en ambos planos de los cilindros. Para esto se usó un lápiz grabador, marca Dremel, ver Figura 3.9. Este lápiz permite marcar materiales con dureza cercana a los 60 HRC. Los insertos también fueron marcados con esta herramienta; en ellos se marcaba el número de la prueba, para así no generar confusiones y tener los insertos disponibles para futuros análisis.



Figura 3.9: Lápiz grabador Dremel.

3.3 Información de los tratamientos térmicos

La información mostrada a continuación fue proporcionada por Tata Steel, relativa a los tratamientos térmicos realizados a los materiales:

410: Fue endurecido, primeramente se elevó la temperatura a 927 °C por una hora, para luego ser enfriado al aire. Se hizo un tratamiento de revenido para liberar las tensiones residuales. La temperatura fue de 316 °C por dos horas, siendo enfriado al aire nuevamente.

PH13-8Mo: Su tratamiento consistió en calentarlo por cerca de una hora a 926 °C, seguidamente se enfrió en una habitación con ventiladores. Una vez alcanzada la temperatura ambiente, se sometió a un tratamiento de enfriamiento bajo cero. Específicamente se enfrió a -73 °C, manteniéndolo a esta temperatura por 2 horas. El tratamiento terminó con un envejecido a 510 °C por 4 horas, el que se culminó con un enfriamiento a temperatura ambiente.

300M: Se mantuvo por una hora a 870 °C, luego se enfrió en aceite quieto (para un enfriamiento más rápido) hasta alcanzar la temperatura ambiente. Seguido de esto se hizo un revenido dos veces, a una temperatura de 300 °C, enfriado a temperatura ambiente en los dos casos.

3.4 Ensayos de dureza

Una vez que las barras regresaron de la realización de los tratamientos térmicos, se realizaron pruebas de dureza para verificar que los valores eran los indicados. Primeramente se pulieron las caras de las barras en el sitio donde se haría la prueba. Este procedimiento se llevó a cabo utilizando la pulidora mostrada en la Figura 3.10.

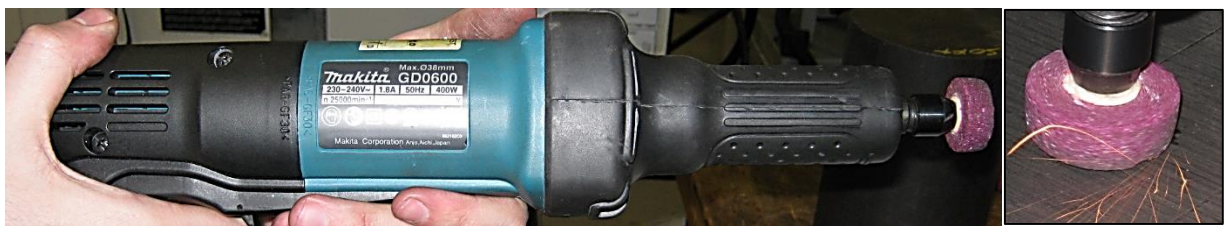


Figura 3.10: Pulidora.

Con la superficie ya limpia, se procedió a usar el durómetro portable tipo impacto Mitutoyo HH-401, presentado en la Figura 3.11. Esta herramienta puede ser manipulada fácilmente con una sola mano, pudiendo medir valores dentro del rango de 20 – 68 HRC.

Dado que los valores de dureza no son exactamente igual en todas las barras y posiciones de esta, se midió este parámetro en 2 barras del material en sus distintos estados, es decir, 2 barras en estado blando y 2 en estado duro, lo que da un total de 12 barras. De estas 12 se midieron 4 puntos por barra, donde posteriormente se obtuvo el valor promedio para cada material, en ambos estados. Esta información se muestra en la Tabla 3.1, donde “valor medido” corresponde al promedio calculado, y “valor nominal” es aquel entregado por la empresa que realizó el tratamiento térmico.



Figura 3.11: Test de dureza Rockwell.

Tabla 3.1: Durezas de las barras. Valores nominales y los medidos (promedios).

Material	Estado blando		Estado duro	
	Valor nominal	Valor medido	Valor nominal	Valor medido
410	21 HRC	21.9 HRC	42.0 HRC	40.9 HRC
PH13-8Mo	36 HRC	36.4 HRC	47.0 HRC	48.9 HRC
300M	30 HRC	28.9 HRC	55.5 HRC	54.7 HRC

Fuente: Durezas nominales entregadas por Tata Steel

Por otro lado, la empresa realizó sus propias pruebas de dureza, por lo que además de informar los valores nominales, entregó los resultados de estas mediciones. Al comparar estos últimos con el promedio calculado, se observó que la información entregada por la empresa fue intercambiada entre dos materiales, confundiendo la dureza del acero 410 con la del PH13-8Mo. Por lo tanto, la realización de esta prueba resultó de gran utilidad, ya que se evitó una confusión en los valores de cada acero.

3.5 Estrategia de mecanizado

Se utilizó una estrategia de escalones al torneado, transversal a todos los experimentos. Tal como lo muestra la Figura 3.12 se descontaban centímetros de mecanizado en cada pasada. Esto con el fin de evitar las vibraciones que produce la herramienta al levantarse de esta posición final. Además, evita que la herramienta se desgaste de forma violenta al ser retirada de la pieza. Por su lado, la Figura 3.13 representa un contacto del inserto con la barra. Si este se desprende rápidamente hacia arriba —en el caso de llegar al último

corte—, se daña la cara del inserto innecesariamente. El daño es mayor si la profundidad se incrementa, porque mayor será el tiempo de contacto que tendría el inserto. Para evitar esto, se escalona.

En la mayoría de los ensayos fue disminuido el eje z en 5 mm. (Ver ejes en Figura 3.14)

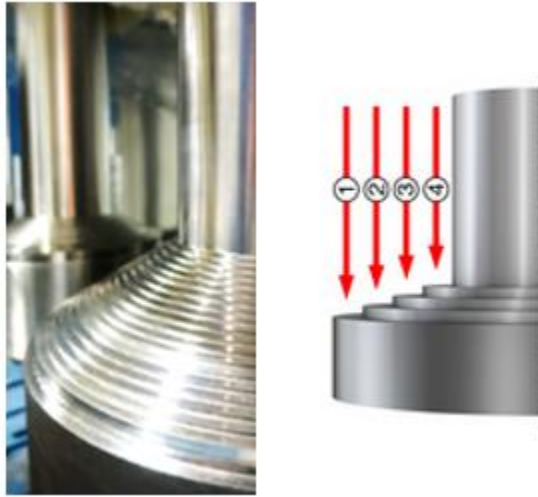


Figura 3.12 : Estrategia de corte con escalones al final de la barra.

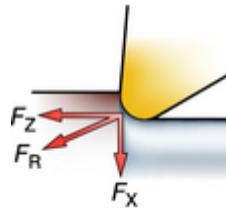


Figura 3.13: Contacto del inserto con la barra.

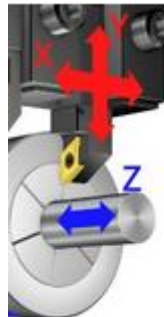


Figura 3.14: Ejes en el torneado.

4 Plan experimental

A continuación se mencionan los grupos de experimentos realizados, con las respectivas condiciones de dureza probadas, así como también las máquinas que fueron utilizadas (de medición, soporte, insertos y soportes de estos), las cuales se describen con mayor detalle al final de la sección. Nótese que todas las pruebas fueron realizadas en el torno CNC Cincinnati (MAG) Hawk 300 NC.

Adicionalmente se explican los objetivos y funciones que se abordan en este estudio, así como también se mencionan las máquinas que se utilizaron, equipos de medición, equipos de soporte e insertos.

Luego de la explicación de los grupos definidos, se presentan los parámetros de corte utilizados en cada experimento y el orden en que estos fueron realizados.

4.1 Análisis progresivo del desgaste de la herramienta

Estado de los materiales: Blando

Equipos utilizados: Microscopio óptico de alta precisión Carl Zeiss Stemi 2000

Microscopio portable USB VEHO

Este ensayo se llevó a cabo en los tres materiales en estado blando, por tanto el inserto y los parámetros de corte utilizados fueron escogidos de acuerdo a la sugerencia del proveedor Sandvik para el caso de desbaste de los materiales, es decir, mecanizado en condiciones rápidas, en el que se consigue remover más volumen por unidad de tiempo.

Tal como lo dice el nombre del grupo, se midió el desgaste de las herramientas en el tiempo, con el fin de generar curvas características de desgaste. El desgaste fue cuantificado midiendo la longitud gastada en los flancos de los insertos, con el uso del microscopio óptico Carl Zeiss Stemi 2000, ver Figura 4.1. La forma de hacer las medidas se definió de la siguiente forma: en cada pasada con el microscopio portable de menor resolución se debía verificar las condiciones del inserto, si este se presentaba distinto a la última revisión era necesario llevarlo al microscopio óptico y reportar el cambio en el flange de la herramienta. Sin embargo, si no se presentaban cambios se debía continuar hasta dos minutos desde la última medición, de esta forma se iba revisando de manera constante en el tiempo.

El desgaste de flanco, consiste en observar una de las caras del inserto en un microscopio óptico, luego de tomar una foto, con las herramientas del microscopio se hacen mediciones de las longitudes que resultaron gastadas. La Figura 4.2 muestra un ejemplo de cómo se hacen las mediciones del desgaste, donde el inserto utilizado es un Wiper. Es posible diferenciar el desgaste por el cambio de color, uno más oscuro muestra las zonas que fueron desprendidas del inserto, que está relacionada con el uso y deterioro del inserto.

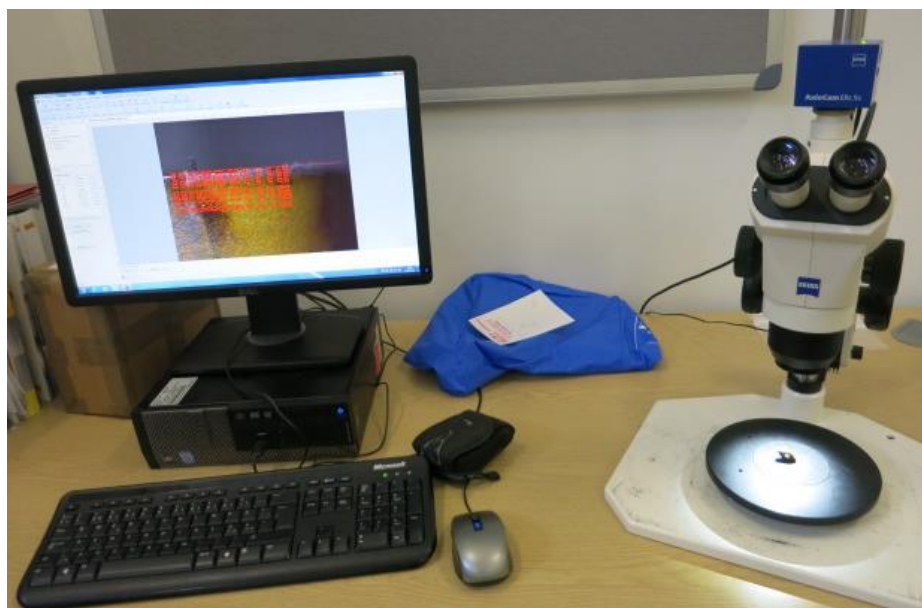


Figura 4.1: Microscopio y su programa para pedir el desgaste.

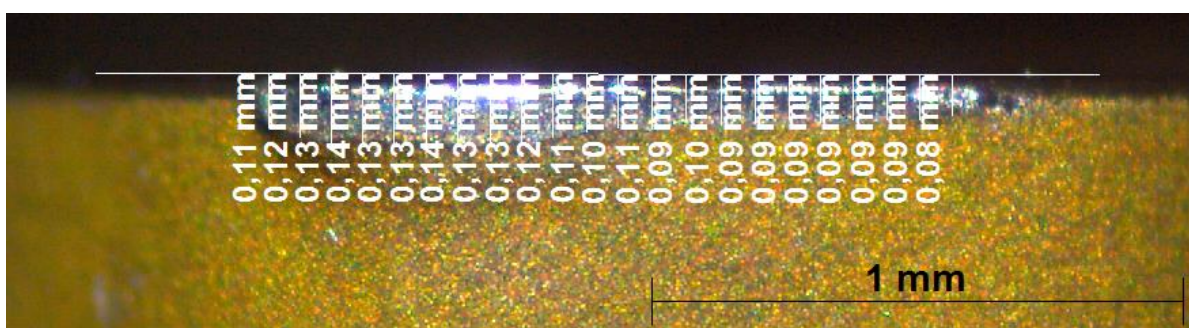


Figura 4.2: Medición del desgaste en un inserto Wiper.

De acuerdo a lo anterior, el desgaste fue tomado en la cara 1 y 2, más conocidas en su término en inglés como relief 1 y 2 (ver Figura 4.3). En algunos casos, cuando la herramienta era Wiper, como la mostrada anteriormente, se tomaba la nariz del inserto, es decir la parte frontal que se encuentra entre la cara 1 y 2. Para todos los insertos, las fotografías fueron tomadas con un zoom de amplificación de $\times 20$. Cabe destacar que es importante ser consistente con el zoom, pues esto permite hacer comparaciones de forma más rápida y ordenada.



Figura 4.3: Caras de un inserto.

Adicionalmente se tomaron fotografías desde el plano superior, para observar cualquier anomalía. Fueron tomadas con un zoom de $\times 10$, como lo muestra la Figura 4.4.

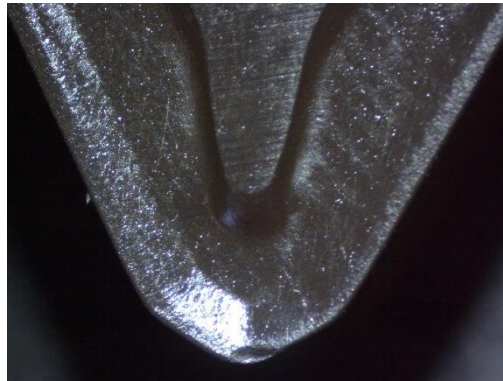


Figura 4.4: Toma desde arriba del inserto.

En este ensayo existe la opción de que los insertos se gasten luego de una hora, o contrariamente, se gasten demasiado rápido. Esto dependerá de los parámetros de corte que sean escogidos. Para evitar estas situaciones se definen los siguientes criterios de término de ensayo y cuándo los insertos son considerados gastados:

- Desgaste máximo mayor a 0.5 mm,
 $V_{B\ max} \geq 0.5\ mm \Rightarrow$ inserto agotado
- Promedio de desgaste mayor a 0.25 mm
 $V_{B\ prom} \geq 0.25\ mm \Rightarrow$ inserto agotado
- Tiempo de prueba mayor a 15 minutos
- Material agotado

Para los tres materiales se usaron los mismos parámetros de corte, por tanto los efectos en el desgaste del inserto se esperaban fueran distintos para cada material. De igual forma, se escogió un solo inserto para el desbaste, el cual se muestra en la Figura 4.5. El código de este inserto es CNMG 12 04 12-PM 4235.



Figura 4.5: Inserto utilizado en los tres materiales para el desbaste.

4.1.1 Parámetros de corte usados/ Grupo 1

Al preguntar al proveedor Sandvik por sugerencia de parámetros de corte para desbaste, y mencionar las durezas involucradas, surgieron los datos mostrados en la Tabla 4.1

Dado que el experimento busca comparar el desgaste en los distintos materiales, se decidió unificar la velocidad de corte. El valor escogido fue de 250 m/min, de esta forma se asegura que todos los insertos se gasten en la prueba.

Tabla 4.1: Parámetros de corte recomendados por Sandvik para la condición de desbaste.

Material	Profundidad de corte d [mm]	Tasa de alimentación fr [mm/rev]	Velocidad de corte Vc [m/min]
410	3	0,3	250
PH13-8Mo	3	0,3	120
S155	3	0,3	200

Respecto a la profundidad de corte y la tasa de alimentación, se decidió usar un valor más estándar (de acuerdo a la norma ISO3685) para el desbaste: 2,5 para la profundidad de corte y 0,25 para la tasa de alimentación.

Los resultados, abordados en la sección 5.1, sugieren que estos parámetros eran muy elevados para el material PH13-8Mo, por tanto se decidió repetir la prueba, pero usando la mitad de los valores originales.

La Tabla 4.2 muestra los parámetros de corte aplicados en este experimento.

Tabla 4.2: Parámetros de corte utilizados en “Análisis progresivo del desgaste de la herramienta”.

Nº Test	Material	Profundidad de corte d [mm]	Tasa de alimentación fr [mm/rev]	Velocidad de corte Vc [m/min]
1.1	410	2,50	0,250	250
1.2	PH13-8Mo	2,50	0,250	250
1.3	PH13-8Mo	1,25	0,125	125
1.4	300M	2,50	0,250	250

4.2 Análisis del acabado superficial

Estado de los materiales: Duro

Equipos utilizados: Rugosímetro Mitutoyo SJ-301

Las pruebas que siguen son principalmente en estado duro de los materiales, pues el énfasis está en el mecanizado de estas en la etapa final de los componente.

El objetivo abordado en este grupo es principalmente estudiar el comportamiento de insertos de distinta geometría y materiales, tales como Carburos, Cermet y CBN. Para esto, se disponen de 6 insertos facilitados por el proveedor Sandvik. La Tabla 4.3 muestra fotografías de estos y resume sus características más importantes, tales como geometría, material y radio del inserto.

Tabla 4.3: Insertos utilizados en el grupo 2 en el material PH13-8Mo

Código del inserto	
Geometría – Material – Diámetro de la nariz del inserto	
	1. DNMG 15 06 04-PM 4215 Rómbico estándar – Carburo – 0.4 mm
	2. DNMX 15 06 16-WMX 4215 Rómbico wiper – Carburo – 1.6 mm
	3. DNGA 15 04 16-EA 7015 Rómbico estándar – CBN – 1.6 mm
	4. DNGA 15 04 04-S01030A 7015 Rómbico estándar – CBN – 0.4 mm
	5. DNGA 15 04 12-S01030AWH 7015 Rómbico wiper – CBN – 1.2 mm
	6. DNMX 15 06 08-WF 1525 Rómbico wiper – Cermet – 0.8 mm

Fuente: Proveedor de los insertos, Sandvik

Para optimizar el tiempo, estos insertos fueron probados en el material de dureza intermedia PH13-8Mo. Los dos mejores insertos, en términos de la rugosidad y estabilidad fueron probados en los otros dos materiales. Dentro de estos dos insertos, fue requisito que uno de estos fuera un carburo, por sus características de popularidad y precio bajo, el otro fue el más estable.

Otro objetivo que se aborda en este grupo es estudiar los parámetros que influyen en el buen acabado superficial en torneado. Como se mostró en los antecedentes, muchos autores concuerdan en que la tasa de alimentación es el factor más importante para un buen acabado superficial, es por esto que en esta prueba se probaron 3 tasas de alimentación, lo que permitió definir la estabilidad de los insertos frente a distintas geometrías.

Las distintas tasas de alimentación fueron probadas dentro de un mismo diámetro de las barras, de esta forma se ahorró material y tiempo. Los valores se incrementaron a lo largo de la barra, quedando 0,05; 0,1 y 0,2 rev/min. Iniciando con una tasa de alimentación de 0,05 rev/min, seguido de 0,1 rev/min, terminando con 0,2 mm/rev.

Considerando que son velocidades distintas programadas en el mismo diámetro, se definió un criterio de normalización antes de las zonas de medición, de esta forma se asegura que el inserto esté estable en su corte. De esta manera se identificaron dos zonas en la barra:

- Preparación: Constituyen las primeras 40 revoluciones del diámetro, donde el inserto se comienza a estabilizar en el corte. Dado que las tasas de alimentación son distintas, esta zona cambia en su largo según sea el caso, siendo proporcional a las tasas de alimentación, así se tienen largos crecientes de 2 – 4 – 8 mm para cada caso.
- Medición: El largo de esta zona es igual para todas las velocidades y está definido por la distancia que recorre la punta del rugosímetro de contacto, que se estima igual a 4 mm. A esta medida se le agregan 2 mm por lado de holgura, resultando un total de 8 mm disponibles en la barra para medir las rugosidades alcanzadas.

La Tabla 4.4 explica estas 6 zonas definidas. Estas también se visualizan en la Figura 4.6, donde es posible apreciar la diferencia en las rugosidades producidas por las distintas tasas de alimentación. Esta figura representa el caso de mayor diferencia en los resultados de las rugosidades, en otros casos la disparidad en la superficie no es tan notoria.

Tabla 4.4: Zonas definidas en la barra para realizar las medidas de rugosidad.

Zona	Largo [mm]	Especificaciones de la zona
1	2	Zona de preparación [P] Tasa de alimentación de 0,05 rev /min.
2	8	Zona medible, tasa de alimentación 0.05 rev/min
3	4	Zona de preparación [P] Tasa de alimentación de 0,1 rev /min.
4	8	Zona medible, tasa de alimentación 0.1 rev/min
5	8	Zona de preparación [P] Tasa de alimentación de 0,2 rev /min.
6	8	Zona medible, tasa de alimentación 0.2 rev/min

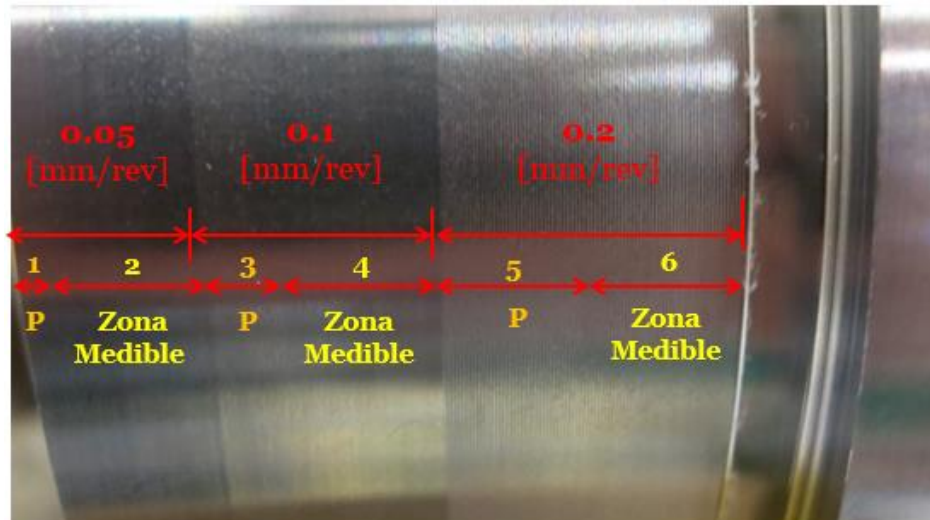


Figura 4.6: Barra dividida en las 3 zonas de preparación y 3 dispuestas para la medición de la superficie.

De esta misma forma se realizó una prueba extra, con el carburo elegido, que busca estudiar los resultados a bajos valores de la tasa de alimentación, según lo encontrado en los antecedentes, sin mayor respaldo. Para esto, las tasas de alimentación extras fueron bastante bajas: 0,005; 0,01 y 0,02 [mm/rev].

Considerando el margen de error propio de los instrumentos de medición, 6 medidas de rugosidad fueron tomadas en cada zona, las que luego se promediaron. Esto disminuye los errores por ajuste del rugosímetro en la pieza.

En todos los casos el montaje fue como el que se muestra en la Figura 4.7. Las barras se ubicaron sobre dos bloques en V, que le dieran estabilidad y permitieran hacerlas girar para tomar las medidas en distintas zonas del cilindro. Por su parte, el sensor del rugosímetro fue sostenido por un soporte que permitía fijarlo de forma paralela a la barra para obtener la rugosidad a lo largo de esta zona.

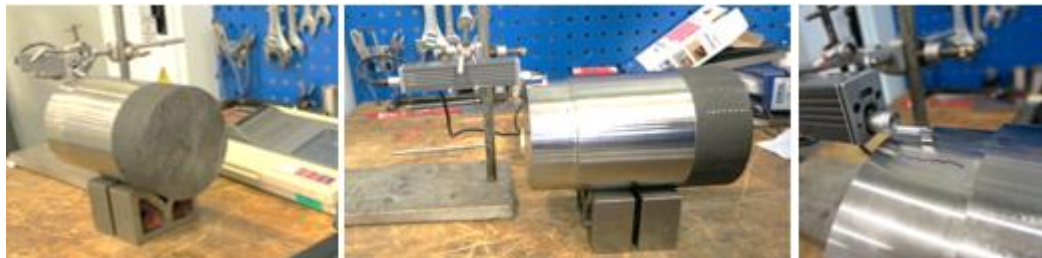


Figura 4.7: Montaje para medir las rugosidades.

4.2.1 Parámetros de corte usados / Grupo 2.1

En la Tabla 4.5 se presentan los 6 insertos con sus respectivas velocidades de corte, las cuales, una vez más, fueron sugeridas por la persona representante de Sandvik en el AMRC. Por su parte, la tasa de alimentación se fue variando dentro de tres valores para todos los casos, donde la profundidad de corte fue escogida de 0,25, valor típico usado en acabados superficiales.

Tabla 4.5: Insertos con sus respectivas velocidades de corte usadas. La profundidad de corte fue igual para todas las pruebas: 0,25 mm.

Nº Test	Material	Inserto	Tasa de alimentación fr [mm/rev]	Velocidad de corte Vc [m/min]
2.a.1	PH13-8Mo	Carburo - 0,4	0,05 0,1 0,2	150
2.a.2		Carburo - 1,6 w		150
2.a.3		CBN - 1,6		230
2.a.4		CBN - 0,4		230
2.a.5		CBN - 1,2 w		230
2.a.6		Cermet - 0,8 w		180

Conforme a los resultados obtenidos, explicados en la sección 5.2, se escogieron los dos mejores insertos para las pruebas en los otros dos materiales.

4.2.2 Parámetros de corte usados / Grupo 2.2

Para esta prueba la velocidad de corte fue igual en los tres materiales, lo que permitió comparar si existe una diferencia en el comportamiento según la dureza. Eventualmente, la existencia de esta diferencia se puede justificar más en las propiedades de los materiales que en su dureza. Sin embargo, se consideró interesante hacer evaluaciones con estos parámetros uniformes. En la Tabla 4.6 se presentan los parámetros para esta prueba.

Tabla 4.6: Segundo set parámetros de corte en el grupo “Análisis del acabado superficial”. Profundidad de corte 0,25 mm

Nº Test	Material	Inserto	Tasa de alimentación fr [mm/rev]	Velocidad de corte Vc [m/min]
2.a.7	410	Carburo - 1,6 w	0,05 0,1 0,2	180
2.a.8		Cermet - 0,8 w		
2.a.9	PH13-8Mo	Carburo - 1,6 w		
2.a.6		Cermet - 0,8 w		
2.a.10	300M	Carburo - 1,6 w		
2.a.11		Cermet - 0,8 w		

4.2.3 Parámetros de corte usados / Grupo 2.2

Para el tercer experimento en este grupo se usaron los mismos parámetros de corte que en el primero, para el acero PH13-8Mo, con el inserto carburo a una velocidad de 150 m/min. Las tasas de alimentación fueron: 0,025; 0,01 y 0,005 mm/rev.

4.3 Pruebas con distintos parámetros

Estado de los materiales: Duro

Equipos utilizados: Rugosímetro Mitutoyo SJ-301

Microscopio portable USB VEHO

Microscopio óptico de alta precisión Carl Zeiss Stemi 2000

Dinamómetro y software del equipo, Kistler 9121

Cámara fotográfica

Así como lo indica el nombre de este grupo, su objetivo está en determinar la influencia de los distintos parámetros de corte en la rugosidad y en otros factores claves al momento de producir, tales como la productividad, el desgaste de la herramientas, las fuerzas que ejerce el inserto (relacionando esta con la potencia y la energía utilizada) y la forma que adquiere la viruta.

Esta prueba fue realizada con un solo inserto, el carburo seleccionado, para los tres materiales. El diseño de esta prueba se describe a continuación.

Se escogieron distintas velocidades de corte y tasas de alimentación, las cuales se fueron combinando entre sí. Por su parte la profundidad de corte se mantuvo constante, pues como se señaló en la revisión de la literatura, esta no tiene mayor influencia.

La elección de los parámetros de corte, se realizó en base a las recomendaciones que fueron dadas por el proveedor de los insertos, Sandvik. Tomando dicho valor de la velocidad de corte se definieron tres puntos de medición:

V_c	La velocidad de corte sugerida por Sandvik
$0,5 \cdot V_c$	Mitad de la sugerencia
$1,5 \cdot V_c$	Velocidad sugerida aumentada en la mitad

Por otro lado, las tasas de alimentación a probar fueron obtenidas de acuerdo a lo encontrado en la revisión de la literatura, cercanas a 0,1 mm/rev, el doble de esta y la mitad, quedando las siguientes 3 tasas de alimentación : 0,05; 0,125 y 0,2 milímetros por revolución.

Con esto es posible construir 5 puntos de testeo. Parte del objetivo es encontrar una combinación óptima de los parámetros. Para poder realizarlo se evaluaron los primeros puntos iniciales, luego se hizo una evaluación del comportamiento de las variables anteriormente mencionadas (el cual consiste en un sistema de ponderación explicado a continuación), en base a los resultados obtenidos se agregaron 4 puntos que buscan acercarse a la mejor puntuación obtenible, o en su defecto hallar el óptimo para cada material. En la Figura 4.8 se ilustra la combinación de parámetros siguiendo la lógica descrita. Los puntos iniciales son los verde claro, los que fueron añadidos se encuentran delineados con rojo.

Para los otros dos materiales, los puntos probados fueron menores. Sólo se escogieron 3 iniciales, correspondientes a los extremos y se probaron dos valores extras, pues la

primera prueba da una idea general de la tendencia y lo que se busca en estas pruebas es encontrar la combinación óptima.

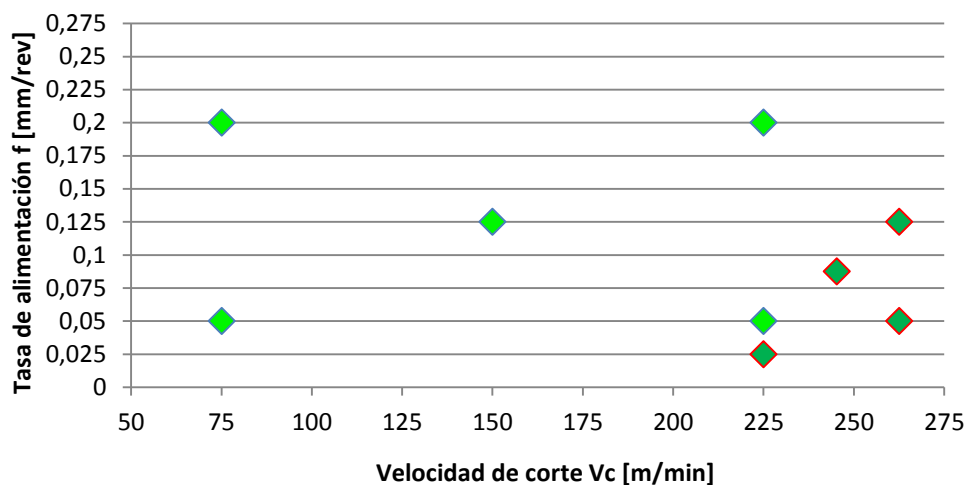


Figura 4.8: Set de parámetros de corte para el material PH13-8Mo.

Para efectos de las pruebas, y por simplicidad, se mantuvo el largo de la barra en las combinaciones de parámetros de cada material, lo que resultó en tiempos menores según el parámetro.

La puntuación se asignó con ponderaciones, siendo el más importante el parámetro de la rugosidad que se ponderó con un factor 4. Como se muestra en la Ecuación 4.1, le siguen en importancia la producción y el desgaste de la herramienta, finalmente con una ponderación de un 10% están las fuerzas de corte y la forma de la viruta.

$$\begin{aligned}
 \text{Puntaje final} = & 4 \cdot \{\text{Rugosidad}\} + 2 \cdot \{\text{Productividad}\} + 2 \cdot \{\text{Condición inserto}\} \\
 & + 1 \cdot \{\text{Fuerzas}\} + 1 \cdot \{\text{Morfología de la viruta}\}
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

En la Tabla 4.7 se muestra la forma de medir cada uno de los parámetros. Cada uno de ellos se escogió para ser evaluado por su importancia en la producción, de esta forma se remarca que estos resultados serán útiles para un mecanizado en masa, por tanto no se pueden recomendar bajos valores de la tasa de alimentación (como lo recomienda la literatura), pues estos tomarían demasiado tiempo y serían contraproducentes con el objetivo de este estudio. Por su parte, el desgaste de la herramienta es clave, ya que determina la vida útil de esta, y si es usada más de lo que se debería, se perdería calidad en la superficie. Las fuerzas de corte dan cuenta de los esfuerzos que debe hacer el torno, por tanto de la energía que debe consumir para producir el mecanizado y si este puede suministrarla sin problema.

Finalmente se encuentra la forma de la viruta que es un factor importantísimo para la producción con tornos CNC automatizados. Una viruta de mala calidad es larga, se enreda en el torno, por tanto produce rasguños y grietas en el material. También puede interrumpir el corte si esta se enreda de tal forma que la barra no puede girar. Contrariamente, una viruta de buena calidad es corta y con pocas curvas, facilitando la automatización y ayudando al acabado superficial.

Tabla 4.7: Parámetros a considerar, cómo fueron tomados y/o medidos y su respectiva forma de asignar la puntuación.

Parámetros	Forma de medirlos	Puntuación
Rugosidad	Rugosidad promedio usando el rugosímetro.	$\frac{\text{Valor más bajo de la rugosidad}}{\text{Valor obtenido de Ra}} \cdot 10$
Productividad	Usando la definición de Material Removido por Segundo [cm ³ /min] MRR = Vc · fr · d	$\frac{\text{Valor obtenido de MRR}}{\text{Valor más alto de MRR}} \cdot 10$
Desgaste inserto	Fotografías de la condición de los insertos haciendo uso del microscopio portable USB. Luego analizando las imágenes fueron comparados cualitativamente haciendo uso del microscopio de alta precisión.	Valores fluctuando del 1 al 10, siendo 1 el inserto gastado completamente y 10 un inserto nuevo.
Fuerzas de corte	Con el dinamómetro y el software que lo respalda, fueron tomadas las fuerzas en los tres ejes durante todo el proceso de corte. De cada una se obtuvo un valor promedio de la parte estable, el valor total corresponde a la raíz de la suma al cuadrado de las fuerzas $F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2}$	$\frac{\text{Valor más bajo de fuerzas}}{\text{Valor obtenido de fuerzas}} \cdot 10$
Morfología de la viruta	Se obtuvieron fotografías y muestras de cada viruta en las pruebas. Las cuales fueron luego comparadas de forma cualitativa, según la cantidad de curvas, el tamaño de la curva y el color de esta (si presentaban quemaduras)	Valores fluctuando del 1 al 10, siendo 1 la que forma enredada que forma un nido en la barra y 10 una corta y con pocas curvas.

Como se ve en la tabla, para el caso de la rugosidad y las fuerzas, la puntuación viene dada por la Ecuación 4.2. Esto significa que la puntuación es relativa a los puntajes obtenidos, obteniendo 10 puntos el valor más bajo, pues menores valores de Ra dan cuenta de una terminación de mayor calidad, de la misma forma, menores fuerzas son preferibles

$$\frac{\text{Valor más bajo obtenido}}{\text{Valor obtenido en la prueba}} \cdot 10 \quad (4.2)$$

Por otra parte, para el caso de la productividad la formula se invierte, pues es deseable obtener mayores valores de esta.

Con los valores obtenidos para cada caso, se hacen mapas que muestran líneas isolíneas de cada parámetro, con valores que van del 1 al 10. Esto se hace con un programa hecho en Matlab, con el cual contaba el supervisor. Este ingresaba los puntajes obtenidos e

interpolaba de forma lineal las isolíneas con diferencias de 0,4 en los valores para el caso de los mapas específicos (de rugosidad, fuerza o cualquiera de los parámetros mencionados anteriormente) y de 2 puntos para el mapa de la calidad, el cual tiene valores que van del 1 al 100, obtenido de las ponderaciones señaladas anteriormente. Estos se muestran en la sección de resultados.

Además de los mapas de los parámetros en forma separada se generaba uno total, considerando los puntajes ponderados, por tanto identificaba la influencia total en el mecanizado de la combinación de parámetros. Este mapa fluctúa sus valores del 1 al 100, cuanto mayor el resultado mejor la calidad esperada.

4.3.1 Parámetros de corte usados / Grupo 3

Anteriormente se explicó la combinación de parámetros de corte a usar. En la Tabla 4.8 se muestran estos resumidamente. En texto azul se encuentran los agregados de acuerdo a los resultados obtenidos (sección 5.3).

Tabla 4.8: Parámetros de corte combinados para el material PH13-8Mo. Profundidad de corte 0,25 mm. Inserto: carburo con diámetro de nariz 1,6 mm, geometría wiper.

Nº Test	Material	Tasa de alimentación fr [mm/rev]	Velocidad de corte Vc [m/min]
3.a.1	PH13-8Mo	0,05	75
3.a.2		0,125	150
3.a.3		0,2	225
3.a.4		0,05	225
3.a.5		0,2	75
3.a.6		0,125	262,5
3.a.7		0,05	262,5
3.a.8		0,025	225
3.a.9		0,0875	245,25

Tabla 4.9: Parámetros de corte combinados para el material 410. Profundidad de corte 0,25 mm.

Nº Test	Material	Tasa de alimentación fr [mm/rev]	Velocidad de corte Vc [m/min]
3.b.1	410	0,125	90
3.b.2		0,05	270
3.b.3		0,2	270
3.b.4		0,125	300
3.b.5		0,25	330

Para los otros dos materiales, la cantidad de combinaciones fue menor. Las Tablas 4.10 y 4.11 muestran los parámetros para los materiales 410 y 300M respectivamente. Además se observan de forma más gráfica en las Figuras 4.16 y 4.17.

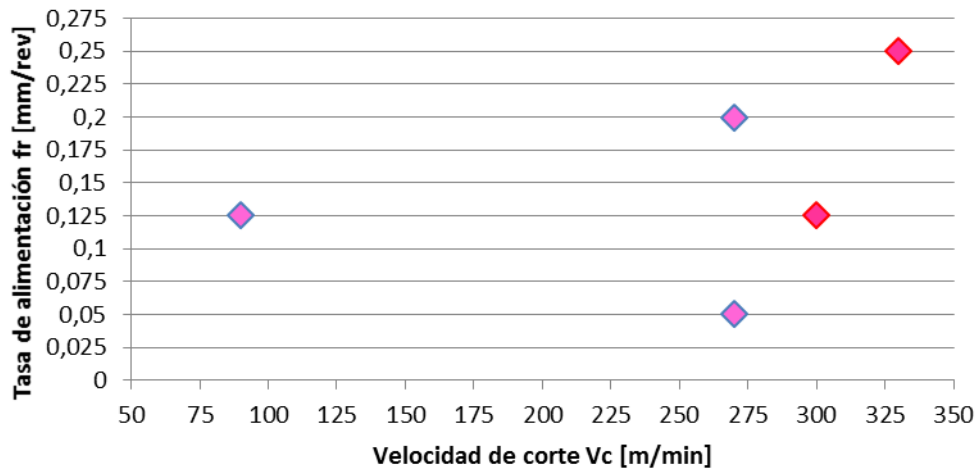


Figura 4.9: Set de parámetros de corte para el material 410.

Tabla 4.10: Parámetros de corte combinados para el material 300M. Profundidad de corte 0,25 mm.

Nº Test	Material	Tasa de alimentación fr [mm/rev]	Velocidad de corte Vc [m/min]
3.c.1	300M	0,1250	30
3.c.2		0,0500	90
3.c.3		0,2000	90
3.c.4		0,0875	120
3.c.5		0,1000	150

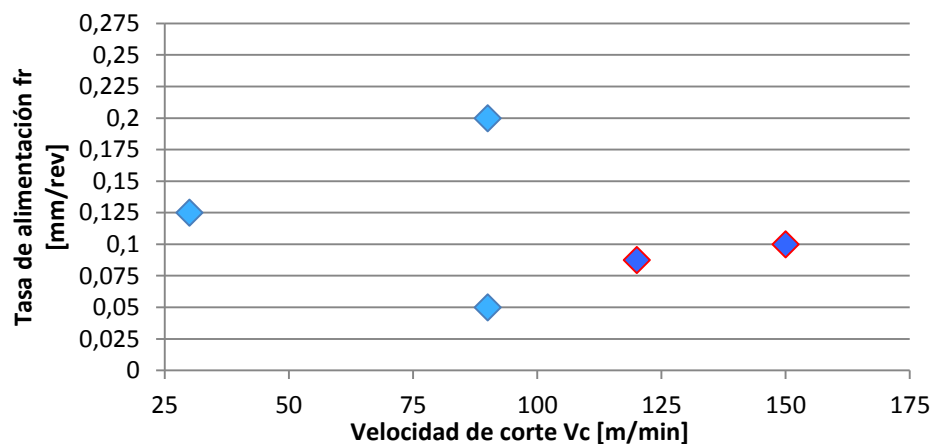


Figura 4.10: Set de parámetros de corte para el material 300M.

4.4 Búsqueda de V15 con insertos idóneos para cada material

Estado de los materiales: Duro

Equipos utilizados: Rugosímetro Mitutoyo SJ-301

Microscopio óptico de alta precisión Carl Zeiss Stemi 2000

La V15 consiste en la velocidad de corte [m/min] tal que el inserto logra tener una vida útil de 15 minutos, por tanto su gasto de flanco en promedio es menor a 0,25 mm y/o su mayor valor no supera los 0,5 mm. Esta velocidad debe ir acompañada de una tasa de alimentación y una profundidad de corte. Los proveedores de los insertos tienen en su página web alguna de estas velocidades para los materiales más convencionales y para distintos acabados. Dado que para estos materiales no se encuentra esta información disponible, es parte de este estudio encontrarla, teniendo en consideración que la rugosidad conseguida con el inserto luego de 15 minutos no supere los 0,4 μm .

Existen dos formas de encontrar la V15:

- Método teórico logaritmo
- Método empírico

Del primero no se maneja mucha información, se sabe que es usado, pero los insertos no siempre siguen una ecuación. Es por esta razón que se prefirió encontrar esta velocidad de forma experimental.

El método empírico utilizado consiste en probar distintas velocidades de corte, para una tasa de alimentación y profundidad de corte constante, por 15 minutos. Una vez terminada la prueba, se examina en el microscopio el desgaste generado. Los resultados se ordenan en un gráfico de velocidad versus desgaste, como lo muestra la Figura 4.11.

Se espera tener dos valores bajo la v15, y dos sobre esta. Pues la forma ideal de realizar la prueba consiste en intentar con un valor bajo, luego incrementarlo, para ver la tendencia, posteriormente sobrepasar el nivel, como cuarto intento se esperaría sobrepasar pero más cercano al valor, para finalmente dar con el resultado definitivo. Cuando se realizó la quinta prueba, pensando que era el valor final, se hizo una medida de la rugosidad luego de la primera y última pasada, es decir, en los primeros minutos y luego de 15 minutos, lo que permitió analizar si los resultados obtenidos en las primeras pruebas fueron fehacientes. Adicionalmente se pretendió observar alguna relación entre el desgaste y la rugosidad.

El tiempo en esta prueba era calculado de acuerdo a los parámetros de corte, pues si se tiene la distancia de la barra a cortar y la velocidad con la que se realiza, es posible obtener el tiempo mediante la Ecuación 4.3.

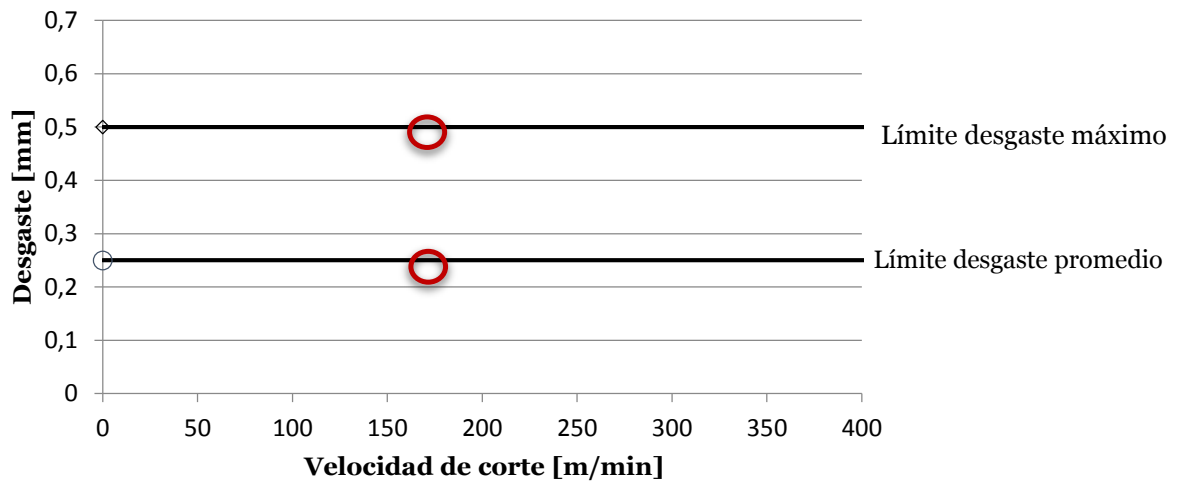


Figura 4.11: Formato de orden para los valores obtenidos.

$$t = \frac{l_b}{RPM \cdot fr} \quad (4.3)$$

t : Tiempo [min]

l_b : Largo de barra [mm]

RPM : Revoluciones por minuto $\left[\frac{rev}{min}\right]$

fr : Tasa de alimentación $\left[\frac{mm}{rev}\right]$

Luego este tiempo se va sumando con los acumulados y todos estos parámetros son conocidos antes de comenzar. Es posible identificar el fin de la prueba cuando se llega a un largo determinado.

Como ya se mencionó, este trabajo está focalizado para el servicio de una empresa manufacturera, quienes necesitan un valor de rugosidad menor a $0.4 \mu m$ en estos tres materiales en estado duro. Esta prueba está diseñada pensando en el objetivo mayor de dar los parámetros y el inserto para cada material. Para realizarla, fueron necesarios los resultados de las tres anteriores, pues estas permitieron escoger el mejor carburo.

Para tener una aproximación del rendimiento de los insertos en los distintos materiales, se realizó una prueba del análisis del acabado superficial. Si bien no todos los insertos fueron probados sobre todos los materiales, se hicieron observaciones de los testeados y se obtuvo apoyo de la revisión de la literatura.

Por su parte, el análisis progresivo, que da una idea del comportamiento del desgaste, permite saber cuan cerca se está de la V15, según el punto de la curva.

Con la prueba de distintos parámetros se escogió el mejor parámetro de tasa de alimentación para estas pruebas, que consiguiera una productividad mínima, permitiera ser automatizado el proceso y por sobre todo que la superficie se mantenga dentro del objetivo. Además esta prueba entregó una aproximación de la velocidad de corte óptima, lo cual fue considerado al momento de hacer los distintos intentos.

Esta prueba fue realizada en los tres materiales. Inicialmente, con el mejor carburo encontrado, se realizó en orden de dureza creciente, comenzando con el material 410 y

terminando con el S155, de esta forma se tenía una referencia de valores, esperando que para el material más blando el V15 fuera mayor y para el más duro, menor.

Luego, se hicieron más de estas pruebas, con el fin de obtener más información del mecanizado de estos materiales y encontrar el inserto que mejor se adaptara a estos. En el material S155 se probó un cermet —decisión basada en los resultados obtenidos en las pruebas de análisis del acabado superficial—, a esto se le sumó la prueba de un inserto CBN en este material, por el interés particular de estos insertos relativamente modernos. Particularmente, y según lo señalado en la bibliografía, se probaron estos materiales sin refrigerante, en seco y en condición normal.

Pruebas adicionales también fueron realizadas en el material PH13-8Mo, las que se realizaron con el mejor carburo. La singularidad es que se escogieron tasas de alimentación y profundidades de corte típicas del desbaste, es decir, elevadas, más focalizadas en la producción. Esta prueba se realizó en el material en condición dura y blanda, todo esto para responder la interrogante: ¿Es mejor realizar el tratamiento térmico de endurecimiento antes o después de haber desbastado el material? Esta interrogante también está focalizada en la eficiencia de la producción. Se entiende que realizar el tratamiento térmico luego del desbaste implica más trabajo, donde la barra debe moverse desde el mecanizado, al tratamiento térmico y regresar a ser mecanizada, mientras que la opción de trabajar el desbaste en estado duro ahorra un paso. Sin embargo, al hacer el desbaste en duro, se cree instintivamente que no se pueden incrementar los parámetros de corte en gran medida, pues un material más duro desgasta más las herramientas. Este dilema se buscó resolver de forma experimental.

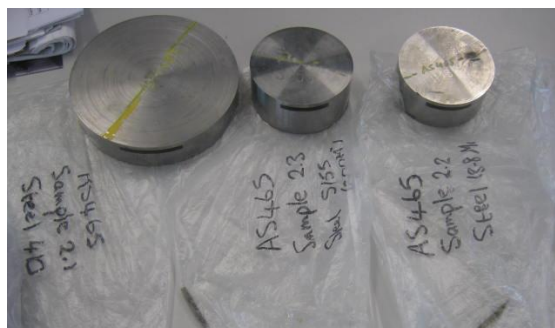


Figura 4.12: Barras cortadas, enviadas a Tata Steel, para el análisis de capa blanca.

Finalmente, considerando las posibilidades de formar capa blanca en este material (como se mencionó en los antecedentes), se mandaron a realizar análisis micro estructurales, para las pruebas con el inserto carburo que se hicieron en todos los materiales. La Figura 4.12 muestra cómo se enviaron las barras, se cortaron en secciones más pequeñas, pues no se necesita toda la superficie, sino que se toma una muestra.

Lo que siguió a esto fue pulir la superficie en 1 m de profundidad, para luego aplicar un reactivo de Vilella (1 gramo de ácido pícrico, 5 ml HCl, 100ml propanol). Esto permite tener una imagen más clara en el microscopio.

4.4.1 Parámetros de corte usados / Grupo 4

Para la realización de estas pruebas se fijó la profundidad de corte en 0,25 mm y la tasa de alimentación en 0,0875 mm/rev. Este último valor fue desprendido de los resultados

conseguidos en el grupo “Prueba de distintos parámetros” (sección 5.3), pues resultó ser el valor con mejores valores considerando los tres materiales.

La velocidad de corte se fue cambiando conforme a los resultados de desgaste que se obtenían. A continuación, se presentan las tablas que resumen las pruebas realizadas, el material probado con el inserto y muestran en orden las velocidades que fueron probadas.

Las Tablas 4.11, 4.12 y 4.13 señalan las velocidades probadas en los materiales PH13-8Mo, 410 y 300M respectivamente, haciendo uso del mejor carburo (de acuerdo a los resultados del grupo 2, ver sección 5.2)

Tabla 4.11: Velocidades de corte probadas en el material PH13-8Mo, inserto carburo.

N° Test	Velocidad de corte Vc [m/min]
4.a.1	105
4.a.2	150
4.a.3	200
4.a.4	250
4.a.5	300
4.a.6	370
4.a.7	315
4.a.8	305

Tabla 4.12: Velocidades de corte probadas en el material 410, inserto carburo.

N° Test	Velocidad de corte Vc [m/min]
4.a.1	180
4.a.2	275
4.a.3	350
4.a.4	400
4.a.5	375
4.a.6	385
4.a.7	395

Tabla 4.13: Velocidades de corte probadas en el material 300M, inserto carburo.

N° Test	Velocidad de corte Vc [m/min]
4.a.1	60
4.a.2	150
4.a.3	200
4.a.4	170
4.a.5	190
4.a.6	195

Las tres tablas a continuación, muestran las posteriores pruebas realizadas en el material 300M, pues dado que este material es de interés especial, se buscó el inserto que mejor se adaptara a él. El orden es inserto cermet, CBN en condiciones normales, es decir haciendo uso del refrigerante y CBN sin refrigerante, respectivamente según las tablas.

Tabla 4.14: Velocidades de corte probadas en el material 300M, inserto cermet.

N° Test	Velocidad de corte Vc [m/min]
4.a.1	150
4.a.2	75
4.a.3	100
4.a.4	105
4.a.5	115

Tabla 4.15: Velocidades de corte probadas en el material 300M, inserto CBN con refrigerante.

N° Test	Velocidad de corte Vc [m/min]
4.a.1	150
4.a.2	300
4.a.3	500
4.a.4	400
4.a.5	320

Tabla 4.16: Velocidades de corte probadas en el material 300M, inserto CBN sin refrigerante.

N° Test	Velocidad de corte Vc [m/min]
4.a.1	300
4.a.2	200
4.a.3	350
4.a.4	315
4.a.5	305

Las pruebas que siguen se realizaron en el material PH13-8Mo. Se hacen en estado blando y duro, en condiciones de semi-desbaste para ambos casos, pues buscan determinar la conveniencia de trabajar el material en duro inicialmente. Es así como la profundidad de corte se aumentó a 1,25 mm (como en las pruebas anteriores) y la tasa de alimentación se fijó a 0,125 mm/rev. En la Tabla 4.17: Velocidades de corte probadas en el material PH13-8Mo, en condición de dureza blanda, inserto carburo. Tabla 4.17 se muestran las velocidades probadas en estado blando. Fueron pocas pruebas, por la escasez de este material y porque la experticia era mayor a esta altura de las pruebas, por tanto fue más fácil llegar al valor. En la Tabla 4.18 se observan estos valores para el caso de la barra en estado duro.

Tabla 4.17: Velocidades de corte probadas en el material PH13-8Mo, en condición de dureza blanda, inserto carburo.

N° Test	Velocidad de corte Vc [m/min]
4.a.1	200
4.a.2	280

Tabla 4.18: Velocidades de corte probadas en el material PH13-8Mo, en condición de dureza dura, inserto carburo.

N° Test	Velocidad de corte Vc [m/min]
4.a.1	125
4.a.2	250
4.a.3	200
4.a.4	240
4.a.5	235

4.5 Estudio de la rugosidad y el desgaste en el tiempo

Estado de los materiales: Duro

Equipos utilizados: Rugosímetro Mitutoyo SJ-301

Microscopio óptico de alta precisión Carl Zeiss Stemi 2000

Software de escáner 3D Alicona

En el grupo anterior se buscaba la relación entre las variables de rugosidad y desgaste. Dado que el resultado no fue clarificador, se decidió realizar este test de forma separada y progresiva en el tiempo.

Se escogió nuevamente el mejor carburo, probado en el material 300M. Los parámetros de corte fueron los escogidos de la prueba V15.

Se midió la rugosidad en la barra cada 1 ½ minuto de mecanizado (utilizando la fórmula aplicada a las pruebas del V15), exceptuando el primer minuto, y los últimos 2 minutos de la prueba que eran más críticos. Simultáneamente se midió el desgaste de los insertos en el microscopio de alta resolución.

Una vez completados los 15 minutos, al inserto se le midió el desgaste. Posteriormente fue analizado en el sistema Alicona 3D, con el fin de obtener un detalles del desgaste de este.

4.5.1 Parámetros de corte usados / Grupo 5

Para el último test, los parámetros fueron únicos, mostrados en la Tabla 4.19. Esta prueba fue repetida en tres oportunidades, por la inconsistencia de los resultados (ver sección 5.5), pero los parámetros de corte fueron invariantes. El inserto usado fue el mejor carburo.

Tabla 4.19: Parámetros de corte para el grupo 5.

Nº Test	Material	Profundidad de corte d [mm]	Tasa de alimentación fr [mm/rev]	Velocidad de corte Vc [m/min]
5.1	300M	0,25	0,0875	195

4.6 Comparación de los insertos, en términos de costo

Además de los experimentos, se desarrolló un modelo de costos, pues en términos de mecanizado, no se trata sólo de comparar los costos de los insertos. Se deben evaluar los tiempos, costos de las máquinas, pasos a realizar, entre otros factores más complejos.

Por tanto se desarrolló un modelo de comparación, para ayudar a decidir entre los insertos carburos, cermet y CBN en condiciones de acabado.

Los parámetros a considerar se muestran en la Tabla 4.20 a continuación.

Tabla 4.20: Parámetros considerados para el modelo de costos.

Abreviación	Parámetro
CTM	Costo total por mecanizar
CBM BMC	Costo básico de la máquina [£]
CH TC	Costo herramienta [£]
CO OC	Costo de operador [£]
CPH	Costo de la máquina por hora [£]
MRR	Tasas de remoción del material (Machine Removal Rate) [cm ³ /min]
V	Volumen del material [cm ³]
V15	Velocidad de corte tal que la herramienta tiene una vida útil de 15 minutos [m/min]
fr	Tasa de alimentación [mm/rev]
d	Profundidad de corte [mm]
CI IC	Costo de los insertos [£]
NB NE	Número de bordes que se pueden usar en un inserto (en algunas insertos, se pueden usar sus 8 bordes, en la mayoría se puede usar 4 de estos)
COH OPH	Costo del operador por hora [£/hr]

Nótese que los costos están en libras esterlinas £, pero por términos prácticos se normalizan los costos por precio del carburo. En los resultados esto se ve más claro.

Al calcular los costos básicos de mecanizado, se agregaron 2 minutos extras, que consideran la ubicación del inserto. Quedando en 17 minutos, pues se consideran 15 minutos de vida útil del inserto. Además se considera un 25% extra, tiempo usando en hacer el set up inicial de la barra.

El costo básico de la máquina queda como lo señala la Ecuación 4.4:

$$CBM = \frac{CPH}{60} \cdot \frac{V}{MRR} \cdot \left(\frac{17}{15}\right) \cdot \left(\frac{5}{4}\right) = \frac{17 \cdot CPH \cdot M}{720 \cdot V15 \cdot fr \cdot d} [£] \quad (4.4)$$

Por su parte, el costo de la herramienta se debe evaluar en función de los bordes que se pueden usar de esta, pues a mayores bordes útiles, menor es el precio que se percibe. También se debe considerar la productividad que logra conseguir en los 15 minutos. La Ecuación 4.5 resume esto.

$$CH = \frac{CI}{NB} \cdot \frac{V}{MRR} = \frac{CI}{NB} \cdot \frac{V}{V15 \cdot fr \cdot d \cdot 15} \quad (4.5)$$

Este valor es comparativo. El segundo término no tiene unidades, por tanto es una tasa que permite comparar. Por ejemplo, el inserto 1 remueve $\frac{1}{4}$ del material, mientras que el 2 remueve $\frac{3}{4}$ del acero. Esta tasa se multiplica por el valor de cada borde usado en el inserto.

Para obtener el costo global del operador (CO), se consideran los mismos tiempos de la máquina anteriormente mencionados, más un porcentaje destinado a su colación y tiempos en que se encarga de otros asuntos y no de producir. Según esto se consideró que el operador está el 66% de su tiempo mecanizando. Ecuación 4.6 muestra el valor global útil.

$$CO = \frac{COH}{60} \cdot \frac{V}{MRR} \cdot \left(\frac{17}{15}\right) \cdot \left(\frac{5}{4}\right) \cdot \left(\frac{66}{100}\right) = \frac{17 \cdot 66 \cdot COH \cdot V}{72000 \cdot V15 \cdot fr \cdot d} \quad (4.6)$$

Estas tres ecuaciones se suman para obtener el costo total de mecanizar, mostrado en la Ecuación 4.7

$$CTM = (CBM) + (CH) + (CO)$$

$$CTM = \left(\frac{17 \cdot CPH \cdot M}{720 \cdot V15 \cdot fr \cdot d}\right) + \left(\frac{CI}{NB} \cdot \frac{V}{V15 \cdot fr \cdot d \cdot 15}\right) + \left(\frac{17 \cdot 66 \cdot COH \cdot V}{72000 \cdot V15 \cdot fr \cdot d}\right) \quad (4.7)$$

Algunos de los parámetros son iguales para todos los insertos, tales como el número de bordes usados —4 para todos los insertos—, la tasa de alimentación y la profundidad de corte, costo de la máquina por hora y del operador.

Los parámetros que varían son: precio del inserto, el volumen removido, la productividad (MRR) y la V15.

Los costos considerados por operador incluyen su salario, costos generales de seguros, y se le sumo el costo de mantener el edificio, dando un total de £40 por hora (aproximadamente 38.000 CLP). El precio por hora de la máquina usada es de £30 (aproximadamente 28.600 CLP).

Como se mencionó anteriormente, se normaliza el precio para poder comparar sin importar la moneda de cambio. Los costos totales fueron divididos por el costo del inserto carburo, £13,95 (13.300 CLP). A esto se le suma que se descontó el costo del refrigerante en los casos en que los insertos fueron probadas en seco, 17% menos según los antecedentes encontrados.

Con esto es posible comparar la conveniencia de los insertos de mayor valor, tales como CBN.

El resto de los precios y valores considerados (MRR, V, entre otros), se encuentran en la tabla mostrada en el Anexo D.

4.7 Resumen de los experimentos

En la Tabla 4.21 se muestra de forma resumida todos los experimentos que fueron llevados a cabo para efectos de este estudio, destacando el estado de los materiales y la cantidad de insertos que fueron probados.

Tabla 4.21: Resumen de los experimentos llevados a cabo.

Grupo	Condición de dureza	Materiales e insertos probados		
		410	PH13-8Mo	300M
1. Análisis progresivo del desgaste de la herramienta	Blando	1	1	1
2. Análisis del acabado superficial	Duro	2	7	2
3. Pruebas con distintos parámetros de corte	Duro	1	1	1
4. Búsqueda de V15 con inserto idóneo para cada material	Duro	1	1	3
5. Estudio de la rugosidad y desgaste en el tiempo	Duro	-	-	1

5 Resultados y análisis

En esta sección se muestran los resultados obtenidos. Considerando que los grupos buscan objetivos distintos, el análisis de los resultados se hace en forma separada.

5.1 Análisis progresivo del desgaste de la herramienta

A continuación se muestran las curvas obtenidas de las pruebas del desgaste progresivo, en el cual se midieron las dos caras del inserto.

En las figuras se presenta con una línea negra gruesa los límites definidos para la prueba –límite de desgaste máximo y límite de desgaste promedio–, de ser superados el inserto ha cumplido su vida útil. También se encuentran símbolos triangulares, los cuales muestran los promedios conseguidos en el desgaste, siendo amarillo para la cara 1 y verde para la 2. Los cuadrados representan los valores máximos para cada cara, de rojo la cara 1 y de azul la 2.

5.1.1 Acero 410

Los resultados obtenidos en el acero 410, se muestran en la Figura 5.1. Lo primero a notar es que no hubo un desgaste total de la herramienta, de hecho el valor promedio luego de 15 minutos fue 0,153 mm, cerca de la mitad del límite de desgaste promedio 0,25 mm.

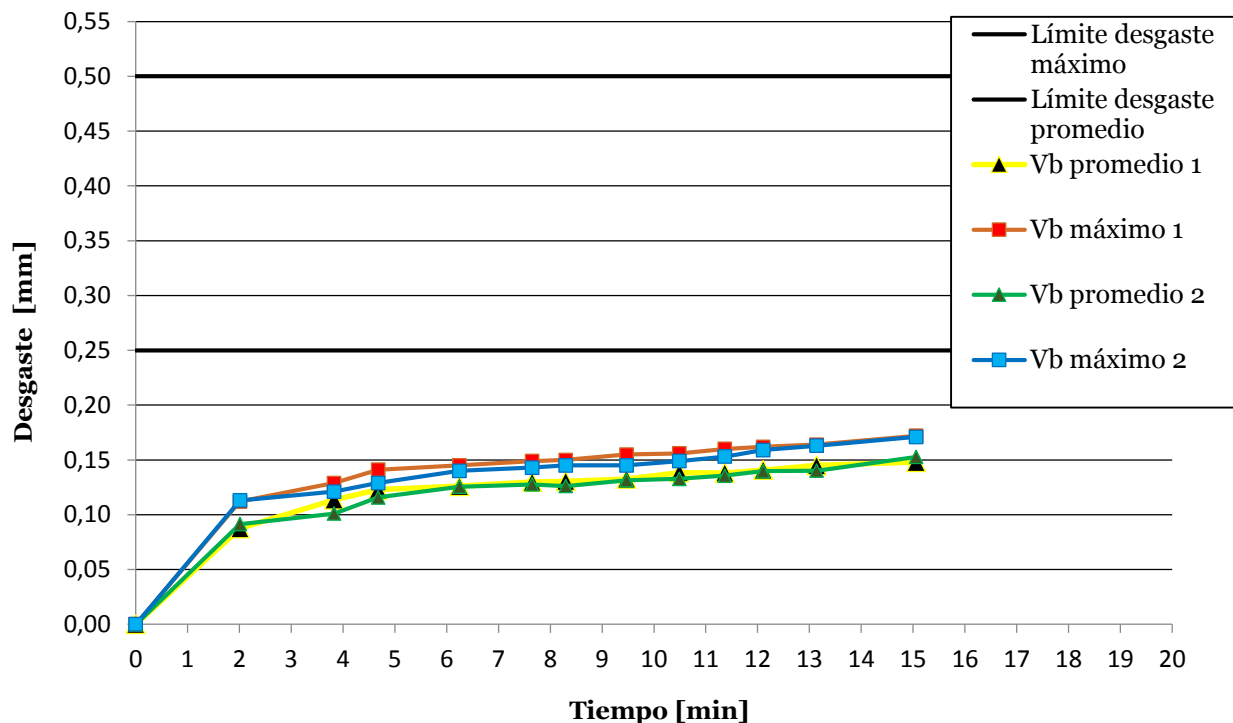


Figura 5.1: Desgaste progresivo en material 410 en estado blando. Velocidad de corte = 250 m/min, tasa de alimentación= 0,25 mm/rev, profundidad de corte = 2,5 mm.

Otro aspecto que sobresale inmediatamente, es la forma de la curva. En el minuto dos da un salto muy notorio, pero luego es más bien uniforme, aumentado levemente, incluso no se distinguen grandes diferencias entre los valores máximos y promedios. Cuando se revisaron estas medidas se tuvo que volver a examinar las imágenes capturadas de los insertos y tomar los valores nuevamente, pues los resultados eran inconsistentes (el desgaste disminuía en el tiempo). Se reformó usar más puntos, para obtener valores más representativos; fue así como se estableció medir 18 puntos del desgaste de flanco en la cara 1 y 8 puntos para la cara 2, esta última tenía una zona menos afectada.

Se observa también que la cara 1 sufre mayor desgaste, tanto en el promedio como en su valor máximo.

Análisis

Vida útil mayor a 15 minutos

La herramienta no se gastó luego de 15 minutos, esto está relacionado con los parámetros de corte que fueron utilizados. Como se señaló, en el desarrollo de los experimentos, se decidió unificar los parámetros de corte, los cuales eran recomendados únicamente para este material. Nótese que la tasa de alimentación y la profundidad de corte recomendadas, eran menores que las empleadas en el experimento.

Por lo cual, concluir que los datos entregados están subestimados no es del todo correcto. Sin embargo, al percatar que luego de los 15 minutos aún está lejos de fallar, se concluye que la V15, en estas condiciones, debe ser mayor a la sugerida de 250 m/min. No obstante para efectos de esta investigación, de comparación de precios, se usará este valor como la V15 del acero 410 en estado blando.

La subestimación de los parámetros de corte es típica en las recomendaciones, pues entregan un margen de error, considerando que estos no se comportan siempre de la misma forma.

Forma constante de la curva

La forma de la curva, exhibe un desgaste de flanco parejo en los insertos, es decir, sin cráteres ni desgastes focalizados; fenómenos que ocurren al utilizar un inserto equivocado o hacerlo en condiciones poco adecuadas.

Consistencia en los experimentos

Por último, es importante señalar que para este tipo de pruebas es muy importante la consistencia en la medición, pues esto puede generar distorsión de los resultados como sucedía en un principio cuando los valores mostraban una regeneración del inserto. Es por ello que para las pruebas siguientes se tomaron los desgastes de forma casi equidistante (el programa no tenía una forma automática de hacerlo, así que se definió un procedimiento manual, haciendo uso de la pantalla del computador).

5.1.2 Acero PH13-8Mo

Para el caso del material más duro en condición blanda, existieron problemas con los parámetros de corte usados. Pues luego del primer minuto los desgastes eran mayores a 0,10 mm y al segundo minuto el inserto quedó completamente arruinado como lo muestra la Figura 5.2. Además, al mecanizar, era posible ver chispas.

La prueba se repitió, revisando que todo estuviera en su lugar, ajustando el refrigerante, verificando la posición del inserto y la alineación de la barra, pero el mismo resultado fue obtenido.

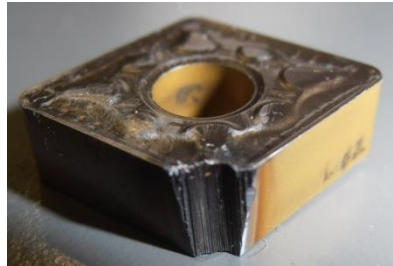


Figura 5.2: Inserto PH13-8Mo, luego de dos minutos de mecanizado.

Para seguir con la prueba, todos los parámetros fueron divididos en la mitad de su valor original. Con este cambio se obtuvo la Figura 5.3.

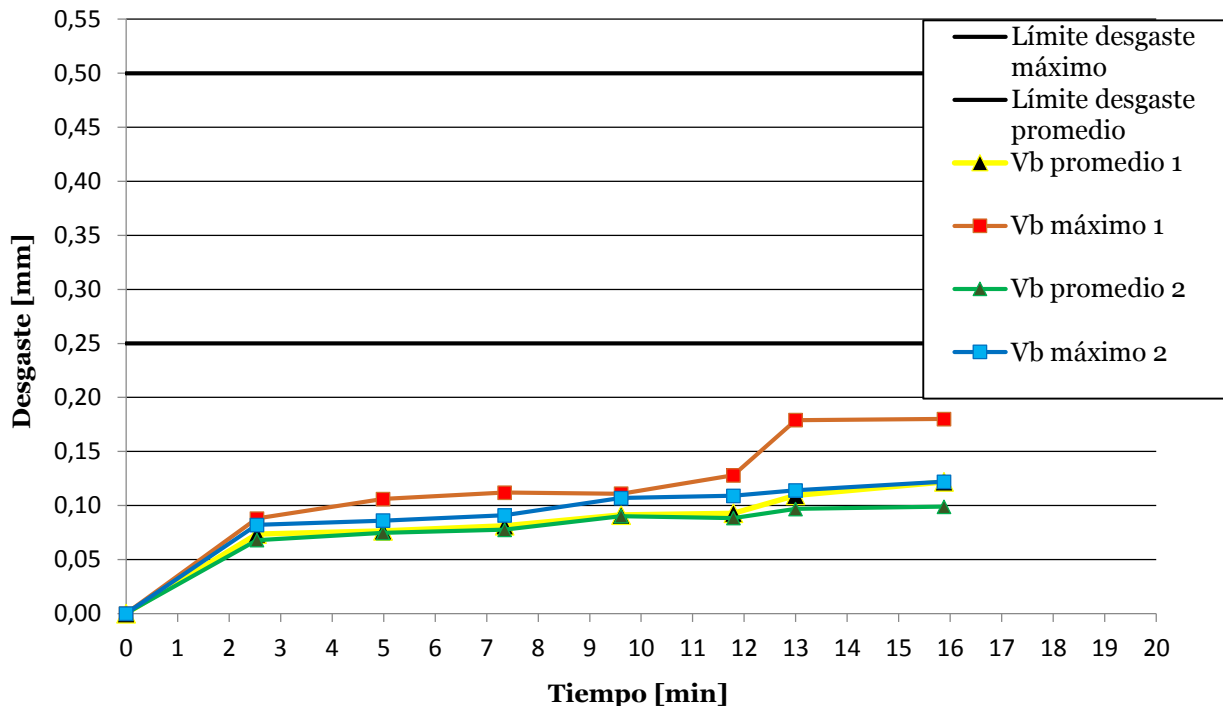


Figura 5.3: Desgaste progresivo en material PH13-8Mo en estado blando. Velocidad de corte = 125 m/min, tasa de alimentación = 0,125 mm/rev, profundidad de corte = 1,25 mm.

En este caso, los intervalos de tiempo para medir el desgaste fueron menores, dado que el desgaste en la prueba anterior evolucionó lentamente en el tiempo, además con el

microscopio portable era posible observar cualquier alteración en el inserto, sin tener que sacarlo para transportarlo al microscopio de mayor resolución.

La vida útil en este caso también resultó ser mayor a 15 minutos.

La forma de la curva también tiende a ser constante, sin embargo entre el minuto 12 y 13 aparece un desgaste de flanco sobresaliente, dilucidando un máximo y separando los valores de la cara 1 y 2; siendo la cara 1 la que presenta un mayor desgaste.

Análisis

Dureza y desgaste del inserto

La dureza afecta considerablemente el desgaste que sufre un inserto, debe ser el primer factor evaluado antes de escoger los parámetros de corte que se van a utilizar, seguido de la superficie que se desea obtener. Frente a un material de elevada dureza existen dos opciones a la hora de mecanizar: se disminuyen los parámetros de corte, principalmente la tasa de alimentación y velocidad de corte o se trabaja con un inserto de mayor dureza. La desventaja de la segunda opción es el precio que este alcanza; insertos con mayor dureza generalmente son de un valor más elevado.

Aparición de un máximo

La aparición de un máximo, por tanto de un desgaste no homogéneo, da cuenta de una equivocada elección del inserto o de sus parámetros de corte. Efectivamente, al considerar la dureza de este material, no se recomienda usar este inserto.

5.1.3 Acero 300M

Figura 5.4 ilustra los resultados para el acero 300M. En este caso la herramienta resultó gastada por completo a los 5,4 minutos. Cabe recordar que se utilizaron los mismos parámetros de corte para los tres materiales

Se observa que en los primeros minutos el desgaste tiene una tendencia lineal, pero a medida que se acerca a fallar, los valores se incrementan más rápidamente en el tiempo.

De forma similar a los experimentos anteriores, el desgaste siempre fue mayor en la cara 1 del inserto. Al igual que en el acero 410, no existe una gran diferencia entre los resultados de los valores máximos y promedios.

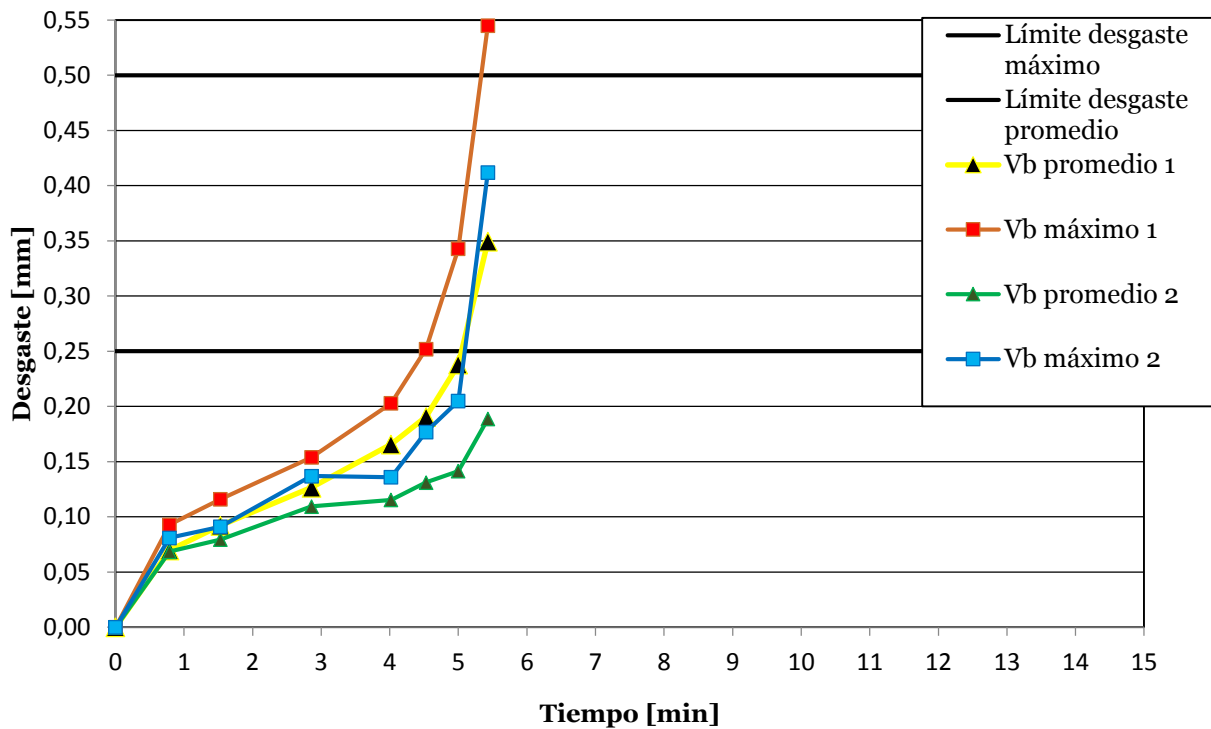


Figura 5.4: Desgaste progresivo en material 300M en estado blando. Velocidad de corte = 250 m/min, tasa de alimentación= 0,25 mm/rev, profundidad de corte = 2,5 mm.

Análisis

Forma de la curva de desgaste

Dado que este fue el único experimento que se falló antes de los 15 minutos, las deducciones mostradas a continuación se hacen en base a este resultado.

La forma de la curva no es lineal —como se podría pensar al observar los dos gráficos anteriores—el desgaste se incrementa más rápidamente en los minutos próximos a fallar. En consecuencia, no es posible predecir, basándose en la tendencia lineal inicial, el minuto exacto en qué minuto fallará el inserto.

Mayor desgaste en la cara 1 del inserto

En las tres pruebas realizadas el desgaste fue mayor en la cara 1 del inserto. Este resultado era esperable, pues es la cara 1 la que impacta con la barra en movimiento. En la Figura 5.5 es posible observar cómo se posiciona el inserto en la barra.

Esta información resulta útil para las mediciones de desgaste en los siguientes grupos, pues se midió el peor de los casos, es decir, la cara 1; ahorrando tiempo. Cabe señalar, que en los insertos con geometría wiper, la medición se realizó tomando una imagen de frente a la nariz, pues está bien delimitada y es la que recibe el impacto del material.



Figura 5.5: Caras del inserto en el corte.

5.2 Análisis del acabado superficial

Los resultados y análisis de los ensayos en el grupo 2, se enseñan en esta sección.

5.2.1 Prueba con 6 insertos en acero PH13-8Mo

En la Figura 5.6 se observan las rugosidades obtenidas con los 6 insertos probados en el acero PH13-8Mo, a distintas tasas de alimentación.

Tal como se mencionaba en los antecedentes, menores tasas de alimentación implican menores valores en la rugosidad. La rugosidad más baja — $0,123 \mu\text{m}$ — se obtiene con una tasa de alimentación de $0,05 \text{ mm/min}$, en contraste la rugosidad más alta — $3,54 \mu\text{m}$ — se alcanza con la mayor tasa de alimentación: $0,2 \text{ mm/rev}$.

Dentro de los objetivos principales está encontrar los dos mejores insertos. El mejor carburo es el 2, el cual posee una geometría wiper y un radio de la nariz de $1,6 \text{ mm}$. Este respecto de su competencia (inserto 1) logra gran ventaja, sobre todo al usar tasas de alimentación de $0,2 \text{ mm/rev}$, donde el inserto 1 obtiene una rugosidad excesiva, muy por sobre el valor meta de $0,4 \mu\text{m}$.

Observando la Figura 5.6 es posible separar en dos grupos los insertos: los que se encuentran bajo el valor límite objetivo —insertos 2, 5 y 6— y los que no —insertos 1, 3 y 4—. Estos últimos tienen en común valores dispersos entre sí, es decir hay una gran diferencia entre el resultado obtenido con la tasa de alimentación de $0,05 \text{ mm/rev}$ y el de $0,2 \text{ mm/rev}$. Dentro de este grupo, las rugosidades más altas se consiguen en los insertos de menor radio de la nariz : $0,4 \text{ mm}$.

Por su parte, los insertos que logran bajas rugosidades, tienen en común geometría wiper y radios de nariz mayor a $0,8 \text{ mm}$. El inserto 2 y 6 destacan por sus resultados similares a distintas tasas de alimentación.

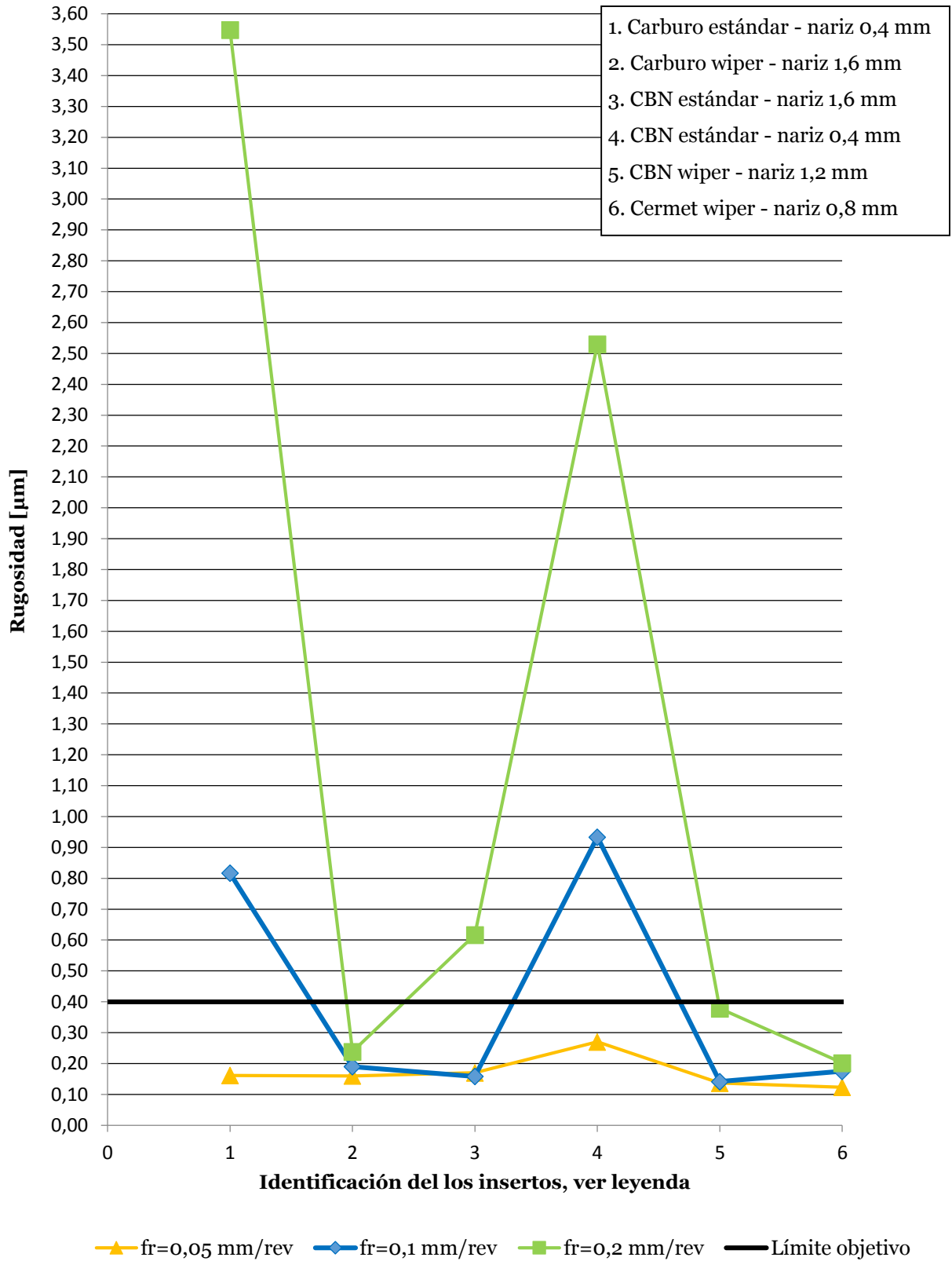


Figura 5.6: Rugosidad para los 6 insertos probados en el material PH13-Mo.

Análisis

Mejora en la geometría wiper

Conforme a los resultados, la geometría wiper representa una mejora en la rugosidad obtenida. El valor agregado más sobresaliente es que a elevadas tasas de alimentación, se consiguen rugosidades similares a las obtenidas a bajas tasas. Esta relación no se observa en los insertos de geometría estándar.

Influencia del diámetro de la nariz

Los valores de rugosidad más altos presentaron con un diámetro menor de 0,4 mm. Se concluye de los resultados, que una curvatura mayor genera mejor superficie. Esto se explica si se considera que una mayor nariz, afecta área menor al mecanizar, dejando menos zonas no cortadas.

Representatividad de los resultados

Ya se comentó en el desarrollo que estos resultados no pretenden ser del todo representativos —respecto de la rugosidad que se puede alcanzar—, pues se mecanizaron en tiempo bajos, menores a 1 minuto. Lo que buscan es comparar los 6 insertos escogidos, para elegir a los dos que alcancen las menores rugosidades y ser utilizados en las pruebas que le proceden.

5.2.2 Prueba con 2 mejores insertos en los tres materiales

En base a la prueba anterior se escogieron los dos mejores insertos —los que obtienen menor rugosidad, incluso a elevadas tasas de alimentación— y fueron probados en los otros dos aceros.

Para esta prueba la velocidad de corte fue fijada en 180 m/min, igual para todos los materiales, pues de los antecedentes se recoge que este factor puede mejorar la calidad superficial, además esto ayuda para hacer comparaciones.

En la Figura 5.7 se visualizan las rugosidades obtenidas. De inmediato se observan que gran parte de ellas, cumplen con el objetivo de rugosidad menor a 0,4 μm , las excepciones nuevamente se presentan en elevados valores de la tasa de alimentación.

El acero 410 fue el único que tuvo una rugosidad menor a una tasa de 0,1 mm/rev, los otros dos materiales consiguen su menor rugosidad a la menor tasa de alimentación. En los otros casos fue mejor usar menores valores de la tasa de alimentación.

Los valores de rugosidad más separados unos de otros, se dan en el material 300M con ambos insertos.

En el acero PH13-8Mo se aprecia una mejora haciendo uso del inserto cermet, de hecho las menores rugosidades se consiguieron en este acero.

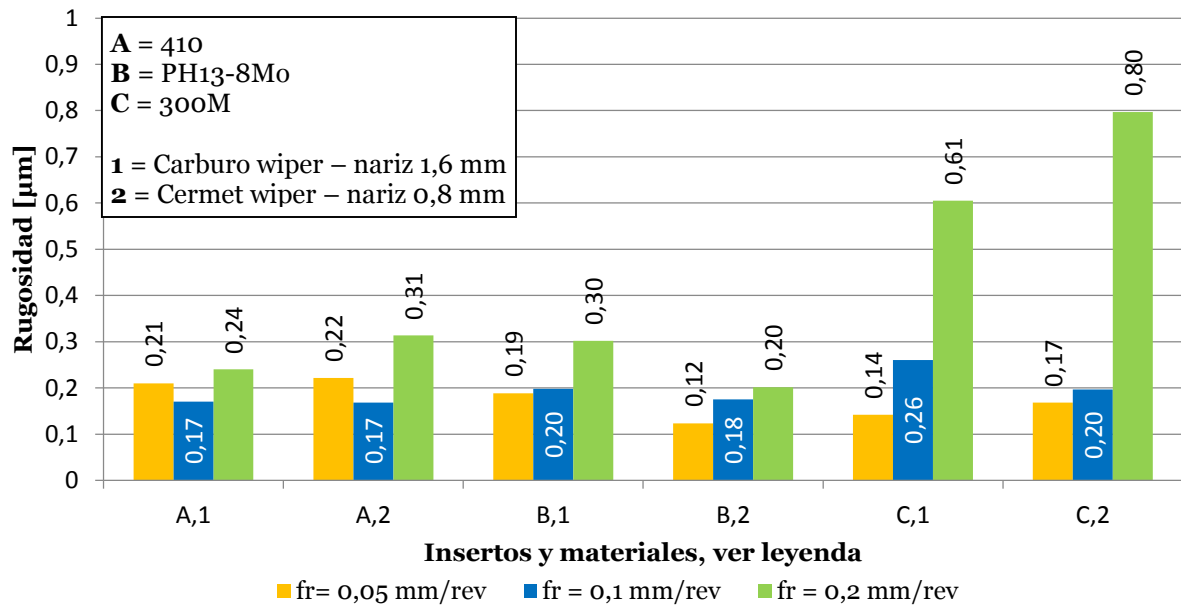


Figura 5.7: Rugosidad con 2 mejores insertos, carburo y cermet, en todos los aceros.

Análisis

Influencia de los materiales

El hecho de que los mejores resultados se obtuvieran con el material PH13-8Mo no es casual, pues los dos insertos que se escogieron se hicieron en base a las pruebas en este acero, asimismo los parámetros de corte —específicamente la velocidad de corte— fue escogida conforme al buen rendimiento anterior. Nótese que al aplicar estos mismos parámetros e insertos sobre los otros dos aceros, se nota que la rugosidad —a altas tasas de alimentación— se incrementa por sobre el valor esperado. Esto confirma la importancia de la elección de los materiales, para cada cual hay un inserto que se adapta mejor a lo buscado. Es por esto que las investigaciones en materiales específicos son valiosas, pues aceptan y/o descartan posibilidades para obtener un mejor rendimiento al mecanizar.

5.2.3 Rugosidades a muy bajas tasas de alimentación

Figura 5.8 muestra la rugosidad en función de la tasa de alimentación. Se nota la existencia de un mínimo en los valores, el cual se diferencia de la tendencia mostrada entre 0,05 a 0,2 mm/rev.

Bajo 0,025 mm/rev el valor de la rugosidad vuelve a aumentar siendo similar al que se puede obtener con una tasa de alimentación 10 veces mayor.

También se observa la gran diferencia existente entre la mayor tasa —0,2 mm/rev— y el resto de las tasas.

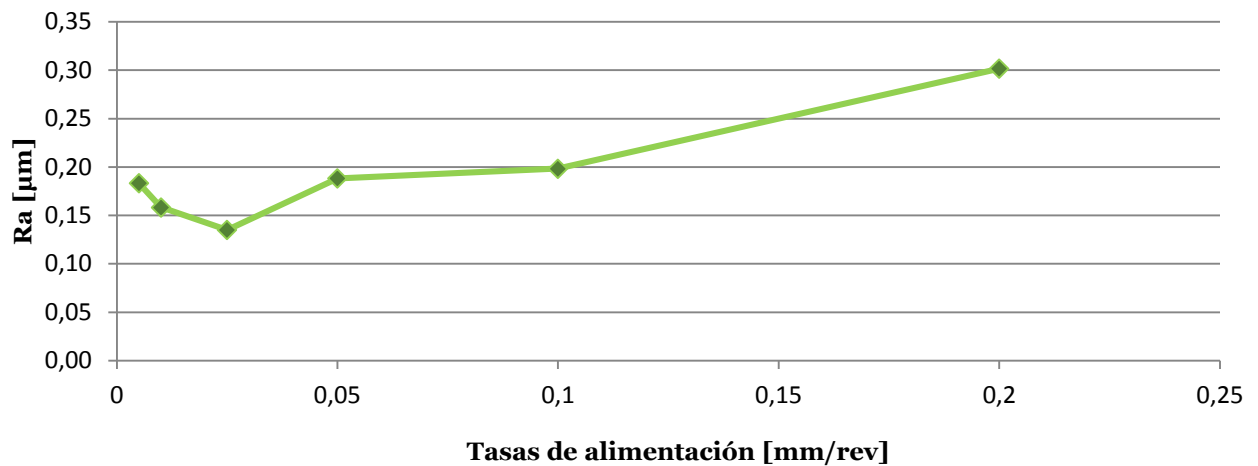


Figura 5.8: Relación de la rugosidad con la tasa de alimentación.

Análisis

Tasa de alimentación y rugosidad

Como se mostró a lo largo de estos resultados, la tasa de alimentación es un factor clave para obtener un buen acabado superficial. Existe una relación directa, pero no lineal, entre la rugosidad y la tasa de alimentación. Sin embargo hay límites, en un punto esta relación deja de cumplirse y se da en el sentido contrario, aumentando la rugosidad al disminuir la tasa de alimentación, es decir se alcanza un mínimo de rugosidad. Tasas de alimentación muy bajas, tienen poca energía, rasguñan el material en lugar de cortarlo.

5.3 Pruebas con distintos parámetros de corte

En esta sección se muestran los mapas de contornos obtenidos en base a los puntajes obtenidos. En estos gráficos es posible ver la combinación de los parámetros de corte con su respectiva puntuación, de acuerdo a lo explicado en la sección 4.3. El eje horizontal muestra la velocidad de corte en m/min y el vertical la tasa de alimentación en mm/rev, en escala de colores y con los respectivos valores, se muestran los puntajes.

A continuación se presentan los mapas de contorno de la calidad de corte —con los puntajes totales—, más información se encuentra en los anexos A, B y C con los mapas de contorno de las rugosidades, fuerzas, morfología de la viruta, productividad y condición del inserto (estos dos últimos mapas se construyeron sólo para el material PH13-8Mo). En los anexos A, B y C también se presentan las tablas con los valores específicos medidos de la rugosidad, fuerza y productividad, así como también la asignación de puntaje para el desgaste y la morfología de la viruta.

5.3.1 Acero PH13-8Mo

La Figura 5.9 muestra el mapa de contorno de corte del acero PH13-8Mo.

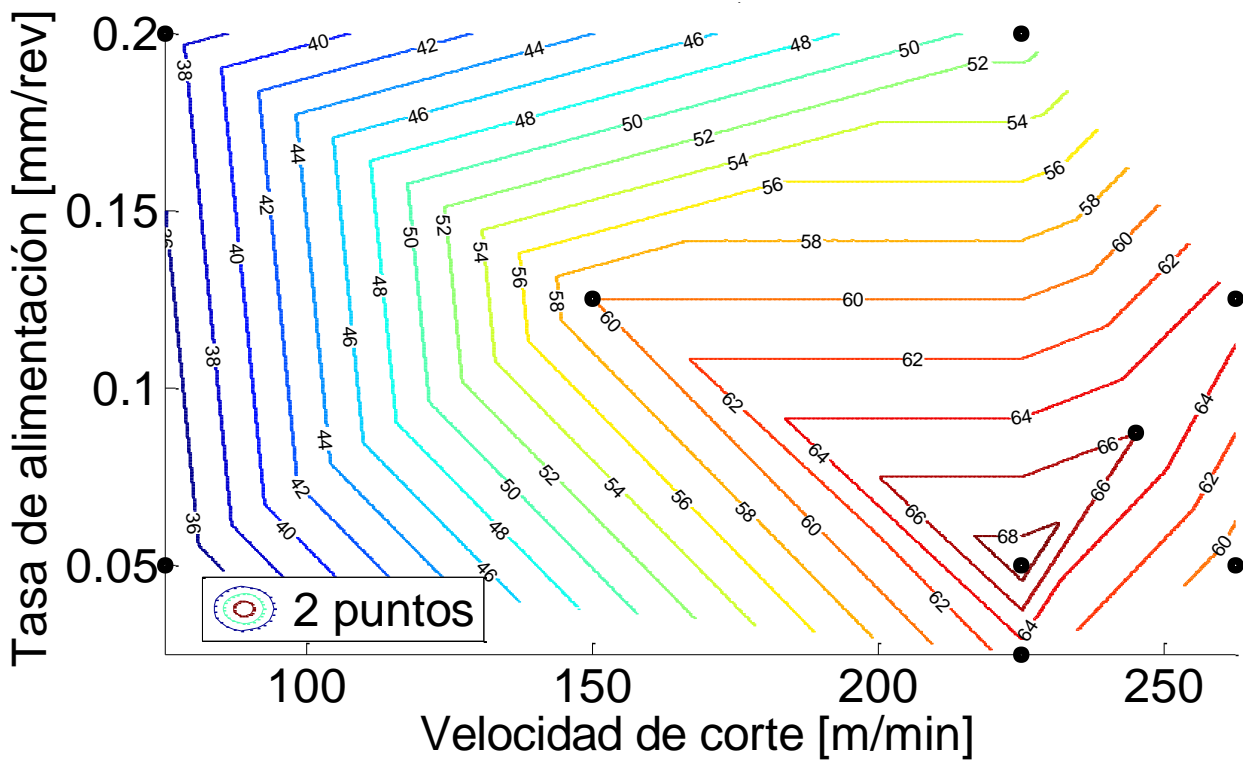


Figura 5.9: Mapa de contorno de la calidad del corte en el material PH13-8Mo. Escala del 1-100.

Es posible diferenciar un máximo puntaje, el punto con velocidad de corte de 225 m/min y una tasa de alimentación de 0,05 mm/rev, el cual corresponde a uno de los 5 puntos iniciales probados. Al hacer el análisis de los 5 puntos bases, se decidió probar a mayores velocidades de corte mayores y tasas de alimentación, con el fin de acotar los puntajes. Fue así como se probó el punto (262,5 m/min, 0,125 mm/rev). Se advirtió que los resultados no seguían mejorando a una velocidad de corte mayor.

Por otro lado, la tasa de alimentación óptima era menor o cercana a 0,1 mm/rev. Basándose en la relación entre la tasa de alimentación y la rugosidad encontrada en los experimentos anteriores, se probó la misma velocidad de corte pero a una tasa de alimentación de 0,05 mm/rev. La superficie mejoró sutilmente de 0,14 a 0,13 μm , las fuerzas y la calidad del inserto también mejoraron, sin embargo la productividad se vio mermada.

Sin obtener mayores mejoras en la rugosidad a muy elevadas velocidades de corte, se intentó con la velocidad de corte original, pero a una tasa de alimentación muy baja, de 0,025 mm/rev, como resultado decayó la calidad superficial de 0,11 (mejor resultado) a 0,13 μm , sin embargo con estos parámetros se consiguió la mejor puntuación para las fuerzas, con un valor de 179,5 N.

Como observación general, se aprecia que la tendencia es obtener mejores resultados a elevadas velocidades de corte y bajas tasas de alimentación.

Adicionalmente para este acero se muestran a continuación en las Figura 5.10 y Figura 5.11 los mapas de la rugosidad y fuerza respectivamente.

El mapa de contorno de la rugosidad es muy similar al de la calidad del corte, pues es el parámetro con mayor ponderación.

Por su parte la Figura 5.11 de las fuerzas, sugiere una tendencia clara a decrecer con menores tasas de alimentación, no lo hace de forma lineal, varía según la velocidad de corte. Al comparar los 4 puntos iniciales —excluyendo el central del mapa—, se tiene que las fuerzas aumentan levemente con la velocidad de corte a una tasa de alimentación de 0,2 mm/rev. La misma tendencia se ve al comparar a la tasa de 0,125 mm/rev con velocidades de 150 y 262,5 . Contrariamente, disminuye al compararlas a la tasa de 0,05 mm/rev. Por tanto la relación de las fuerzas con la velocidad de corte, no es del todo clara.

En la Figura 5.12 se muestran las virutas obtenidas en las pruebas, con sus respectivos puntajes, parámetros de corte y escalas. En general, para este acero, se obtuvieron virutas de buena calidad —cortas y con curvaturas pequeñas—, sólo en el caso de menor velocidad de corte y mayor tasa de alimentación, se enredó en la barra. Los casos con puntaje 5 consiguieron una longitud cercana a los 9 metros, pero no se enredaron en la barra, además tienen curvas pequeñas que se relaciona a una buena calidad.

Virutas como las observadas en los primeros cuatro resultados —puntajes 7, 6,5 y 6— son deseables, pues son más cortas, lo que significa que cuando se corta el material, abandonan la barra sin alterar la superficie obtenida.

No hay una tendencia clara que permita relacionar los parámetros de corte con la morfología de la viruta.

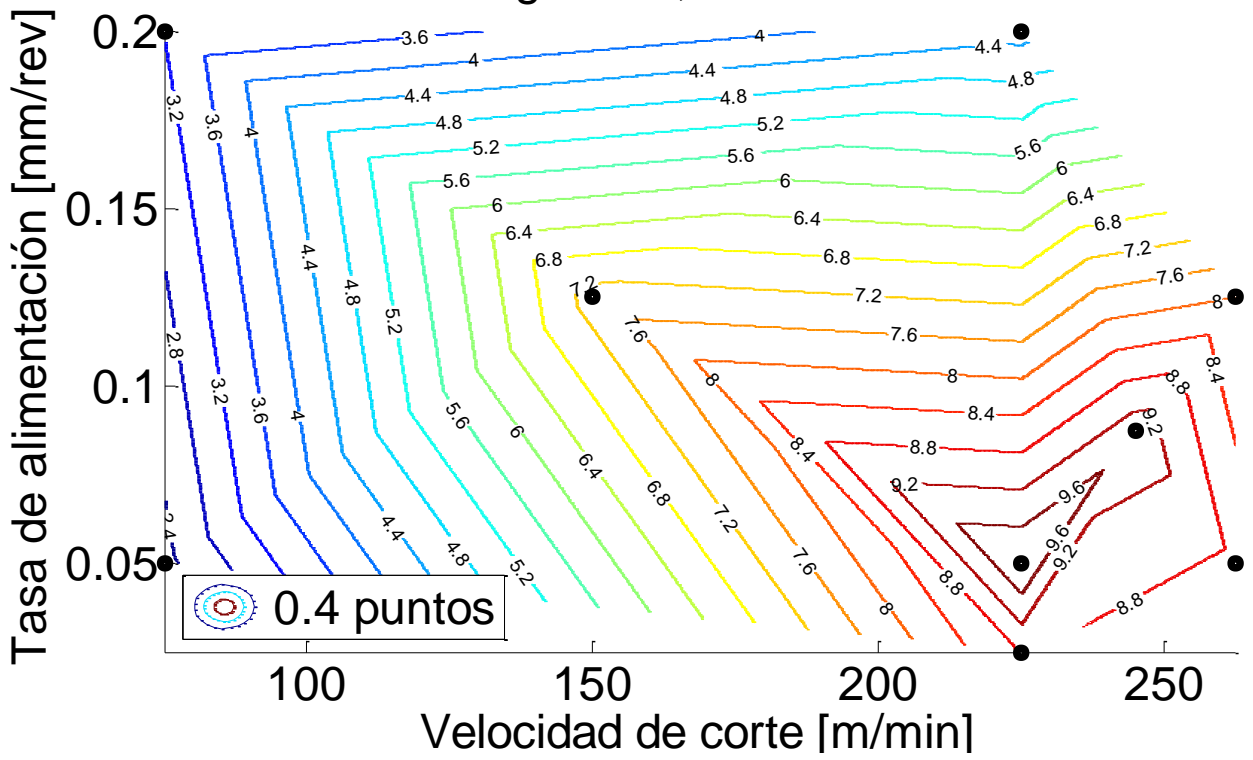


Figura 5.10: Mapa de contorno de la rugosidad en el material PH13-8Mo. Escala del 1-10.

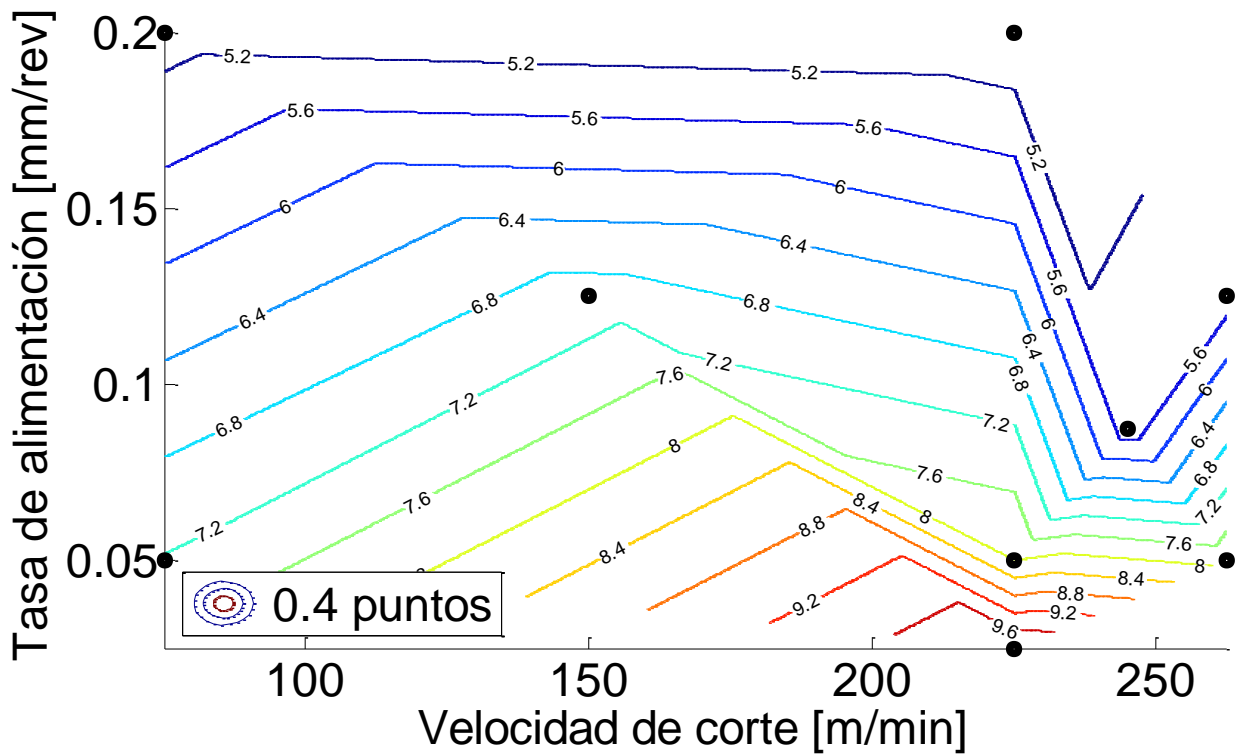


Figura 5.11: Mapa de contorno de las fuerzas de corte en el material PH13-8Mo. Escala del 1-10.

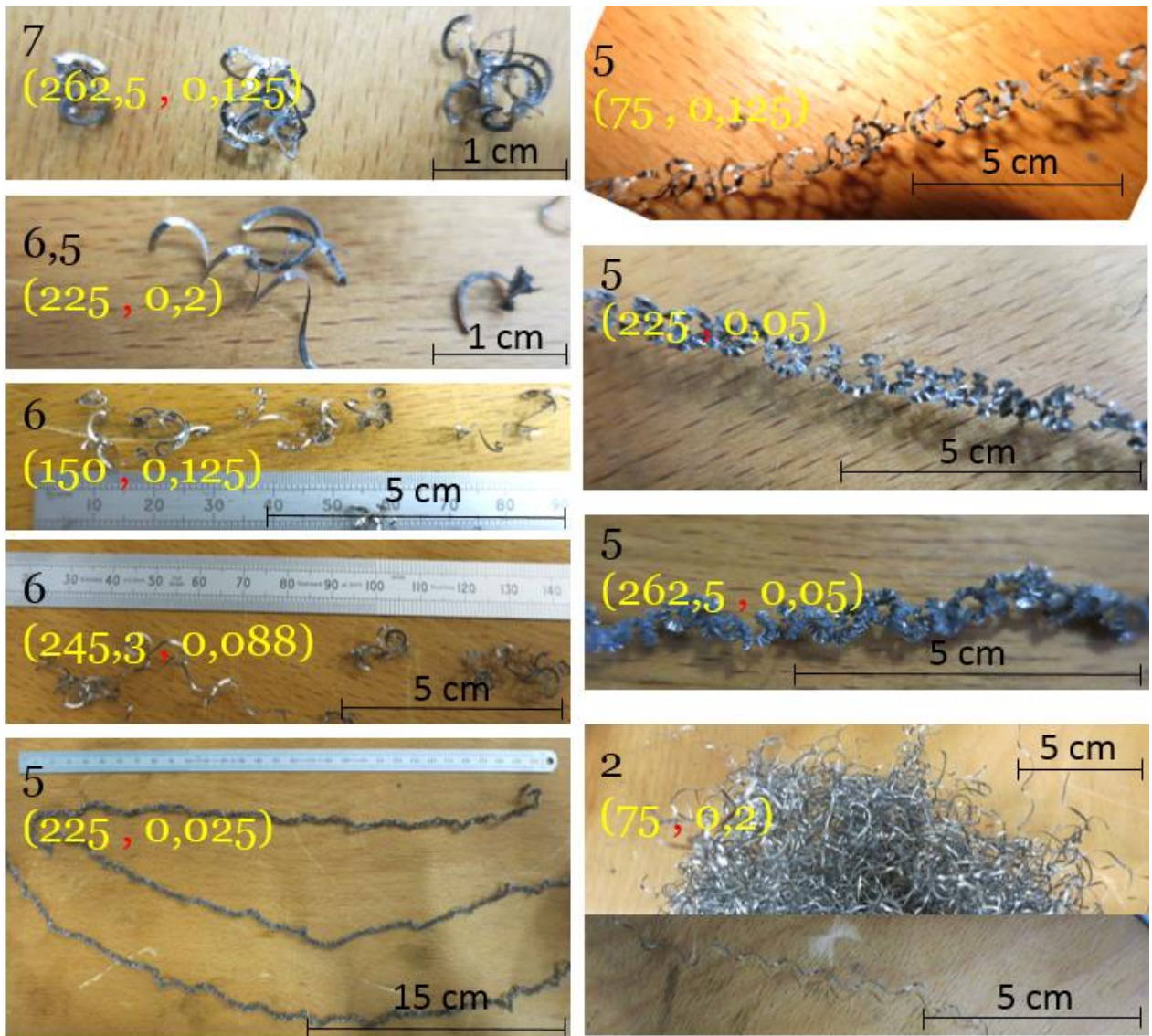


Figura 5.12: Imágenes de las virutas en material PH13-8Mo.

Análisis

Tasa alimentación límite cambia según los otros parámetros.

En estas pruebas, al usar una tasa de alimentación de 0,025 mm/rev la rugosidad aumentó. En el grupo anterior, con este mismo material, se encontró un mínimo global de rugosidad a esta tasa de alimentación. Se deduce que el mínimo no se encuentra siempre en el mismo punto. La única diferencia entre estas dos pruebas, es la velocidad de corte, siendo en la primera de 180 y en esta de 225 m/min. Es posible que a mayor velocidad de corte, el mínimo sean valores más altos, es decir sea más sensible a las tasas de alimentación.

Límite en velocidad de corte

En el mapa de contorno se evidencia que elevadas velocidades de corte mejoran la calidad de corte, pero en cuanto a la rugosidad la tendencia sugiere un límite. Esto se explica en el tiempo de permanencia del inserto, pues hacer el arranque tan rápido, no permite que el inserto remueva todo el material de forma óptima.

5.3.2 Acero 410

En este material (ver Figura 5.13) también se consiguió un máximo, pero fue a tasas de alimentación mayores.

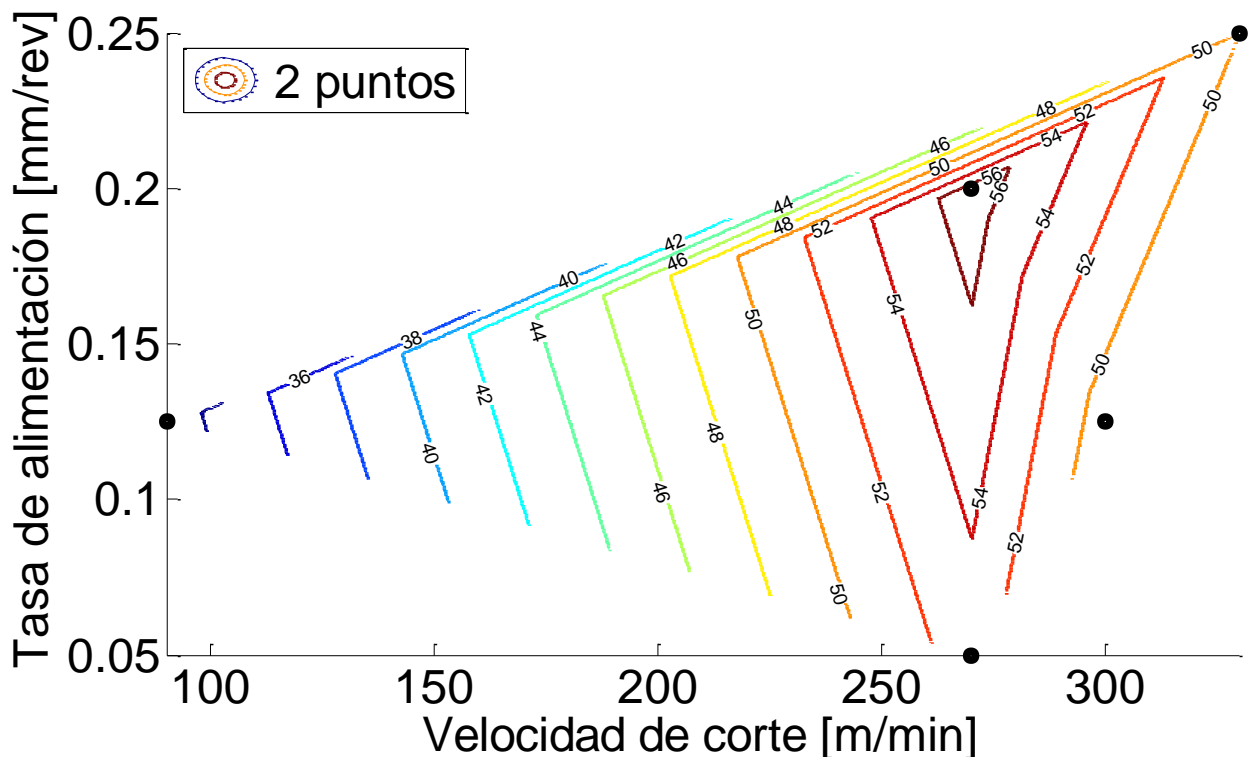


Figura 5.13: Mapa de contorno de la calidad del corte en el material 410. Escala del 1-100.

Este máximo no obtiene los mejores resultados al evaluar los parámetros de forma separada, sino que es el segundo mejor en rugosidad, productividad y fuerzas, sólo es el mejor en la condición del inserto y en cuanto a la viruta esta se enredó alrededor de la barra. En este experimento se encontraron mayores contrastes, como por ejemplo tener una elevada productividad pero con una superficie muy pobre, o tener bajas fuerzas pero a una productividad baja también.

Comparando con el material anterior, en este acero se obtuvieron puntajes más bajos, sólo la productividad llegó a su punto máximo.

En particular en este acero, llamó la atención la mala calidad de la viruta obtenida en la mayoría de las pruebas. En tres ocasiones la viruta se enredó en la barra, arruinando la superficie de las barras. En la Figura 5.14 se observan las fotografías tomadas de las virutas

obtenidas. En el caso de los puntajes 2, corresponden a virutas enredadas en la barra, como se aprecia esta queda tocando la barra, lo cual afecta la calidad superficial, ya que produce rasguños en el material mecanizado.

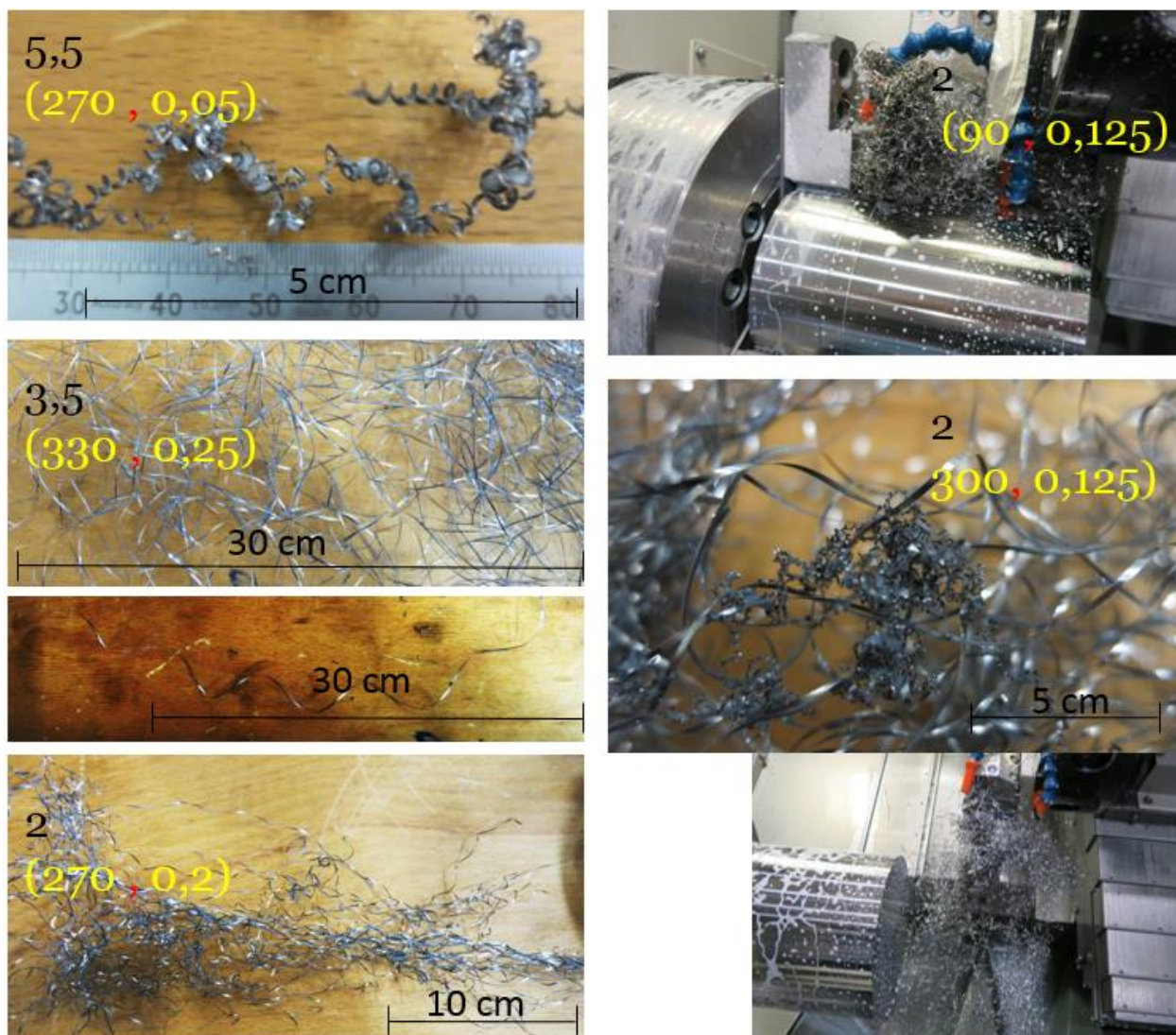


Figura 5.14: Imágenes de las virutas en material 410.

En cuanto a la rugosidad, la tendencia fue la misma mostrada en el acero PH13-8Mo: menor rugosidad a menores tasas de alimentación y mayores velocidades de corte, con sus respectivos límites. En este caso la velocidad de corte óptima se presentó a los 262,5 m/min. Los valores obtenidos de la rugosidad fluctúan entre 0,18 – 0,5 μm , el primero obtenido en las coordenadas (270 m/min, 0,05 mm/rev) y el segundo valor, que sobrepasa lo esperado, a parámetros de corte elevados (330 m/min, 0,25 mm/rev).

Las fuerzas mostraron la misma tendencia, disminuyen principalmente con la tasa de alimentación, su relación con la velocidad de corte tampoco se presenta de forma obvia.

Análisis

Viruta enredada en la barra

Dado que este material presenta la mayor ductilidad, con las fuerzas tiende a deformarse y no a cortarse, eso produce que se enrede en la barra. En estos casos se recomienda usar el refrigerante a un mayor flujo volumétrico, esto inyecta más energía, la cual permite el corte de esta viruta.

5.3.3 Acero 300M

No se encontró un máximo, no obstante, como lo muestra la Figura 5.15, se identifica una tendencia a bajas tasas de alimentación y elevadas velocidades de corte. Los puntajes obtenidos son los más bajos entre los tres aceros. Particularmente, las fuerzas fueron muy elevadas, por lo que este material necesita más energía para ser mecanizado.

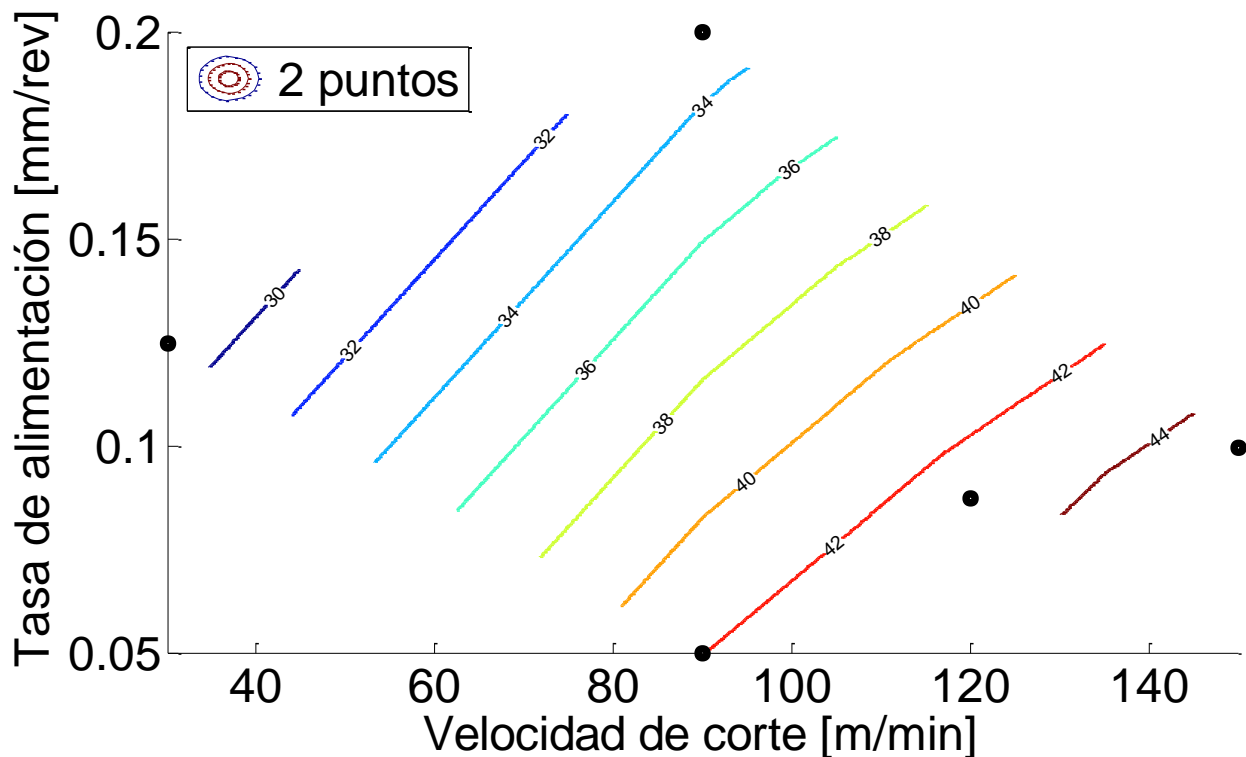


Figura 5.15: Mapa de contorno de la calidad del corte en el material 300M. Escala del 1-100.

La morfología de la viruta fue diversa, desde virutas largas a cortas y curvas. Figura 5.16 exhibe las fotografías obtenidas de las virutas. Los puntajes 8,5 y 7 son ejemplos de morfología deseada para la automatización del torneado, son cortas y con curvas. Para este acero, no se observó una viruta enredada en la barra.



Figura 5.16: Imágenes de las virutas en material 300M.

Análisis

Fuerzas con la dureza

Este material, el con mayor dureza, tuvo las fuerzas más altas al mecanizar, incluso al usar parámetros de corte tres veces menores. De esto se desprende que la dureza influye significativamente en las fuerzas, seguido de la tasa de alimentación.

Mejor rugosidad con bajas tasas de alimentación

Se concluye, al igual que en el grupo anterior, que la tasa de alimentación influye bastante en la calidad superficial. Bajas tasas de alimentación producen mejor calidad superficial.

Influencia de la velocidad de corte en la rugosidad

En general la tendencia es a mejorar la calidad superficial a elevadas velocidades de corte, pero la mejora está acotada a un valor de la velocidad de corte (el cual depende de cada material y sus otros parametros de corte).

Elección de tasa de alimentación siguiente prueba

La tasa de alimentación que se escoge para ser usada en las siguientes pruebas es de 0,0875 mm/rev. Pues es un valor intermedio entre el buen rendimiento, respecto de la rugosidad, de la tasa 0,05 mm/rev y la elevada productividad que se alcanza a valores de 0,1 – 0,2 mm/rev. Dado que a 0,2 mm/rev la rugosidad mostró puntajes bajos, se opta por un valor más cercano a 0,1.

Morfología de la viruta y materiales

Este acero, el más duro, consiguió en promedio, una viruta de mejor calidad. En contraste, el material más blando y ductil, 410 obtuvo largas virutas, enredadas en la barra. Cab señalar que no se apreciaron tendencias claras de la viruta con los parámetros de corte. Por tanto el factor que más influye en la morfología de la viruta, es el material a mecanizar.

5.4 Búsqueda de V15 con insertos idóneos para cada material

En esta sección se muestran los resultados obtenidos en las pruebas realizadas en este grupo.

5.4.1 Inserto Carburo probado en aceros 410, PH13-8Mo y 300M

Los gráficos de las primeras pruebas de V15 se muestran en la Figura 5.17. Los marcadores delineados con bordes negros representan las velocidades V15, las cuales también se encuentran resumidas en la Tabla 5.1.

Lo primero a notar son los emplazamientos de las curvas, a mayor dureza, menor es la V15, siendo el acero 410 el que obtuvo un mayor V15 y el 300M una menor. Adicionalmente respecto a las curvas, es interesante notar la forma que estas siguen. En un principio tienen un comportamiento casi lineal, pero cuando van a fallar el desgaste aumenta rápidamente con leves variaciones, tal como se presentó en los resultados del desgaste progresivo en el caso del acero 300M.

En la Tabla 5.1 también se encuentran las rugosidades medidas después de la primera y la última pasada. En este punto es necesario hacer una aclaración, como no se podía saber en la primera pasada cuál era la V15 se tomó las rugosidades en varias pruebas luego de la primera pasada. Luego con la práctica fue más fácil reconocer si se trataba de la V15.

Las rugosidades obtenidas en este grupo de ensayos son más representativas, pues el inserto fue usado en condiciones industriales, vale decir, cortando por 15 minutos. Si se compara la rugosidad inicial —cuando el inserto cortaba cerca de 1 minuto, como en los otros grupos— con la final, se distingue que tiende a aumentar la rugosidad con el tiempo, superando incluso el valor objetivo de 0,4 μm . Sin embargo en el caso del material 410 la rugosidad inicial y final es prácticamente la misma (0,32 y 0,323 μm respectivamente). A raíz de esto se decidió repetir la prueba y medir la rugosidad nuevamente. Se obtuvo una disminución en la rugosidad inicial, pero la final se mantuvo casi invariante.

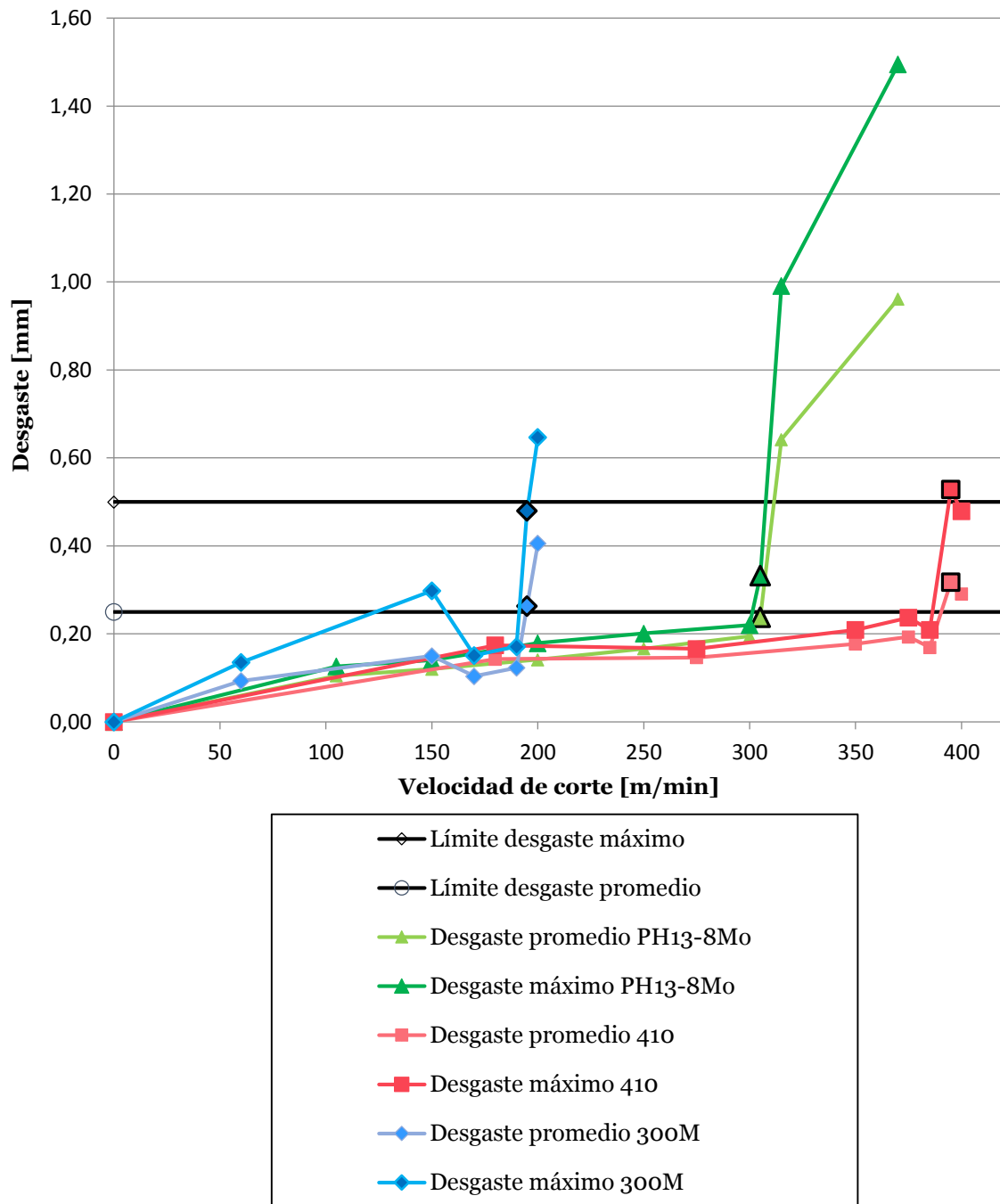


Figura 5.17: Desgaste en función de la velocidad de corte. Ensayo V15 usando inserto carburo para los tres aceros.

Tabla 5.1: Resumen del ensayo V15 en tres aceros con inserto carburo.

Material	V15 con Carburo	Ra primera pasada [μm]	Ra última pasada [μm]
410	395	0,320	0,323
PH13-8Mo	305	0,132	0,562
300M	195	0,262	0,508

5.4.2 Inserto Cermet probado en acero 300M

Al evaluar la rugosidad obtenida, luego de los 15 minutos, con el inserto carburo en el acero de alta resistencia 300M, se decidió hacer la misma prueba pero haciendo uso del inserto cermet, debido a que este consiguió superficies aceptables en el grupo 2.

La Figura 5.18 muestra el desgaste alcanzado a las distintas velocidades de corte probadas.

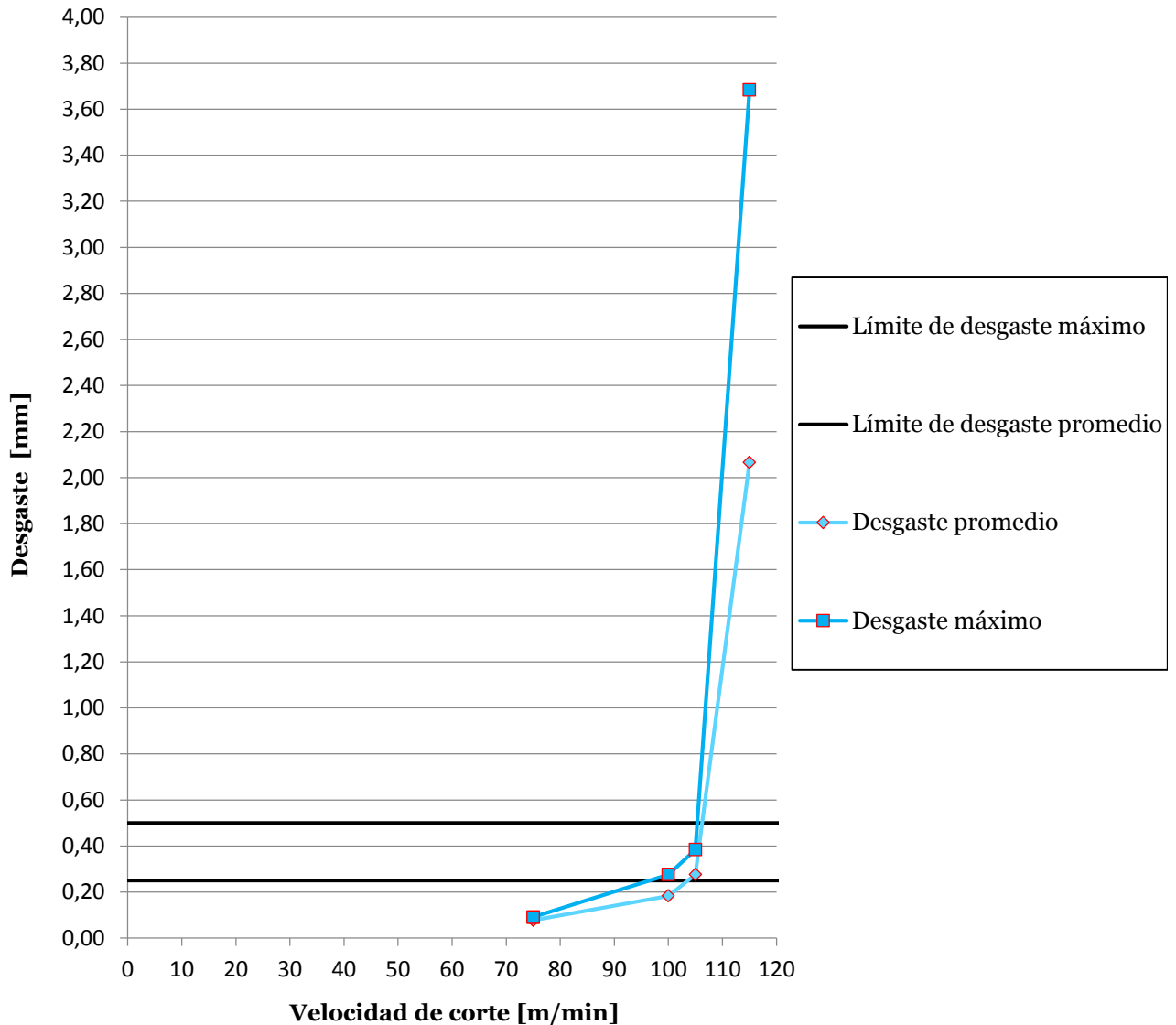


Figura 5.18: Desgaste en función de la velocidad de corte. Ensayo V15 usando inserto cermet para 300M.

Al comparar con el V15 alcanzado por el inserto carburo anterior, este valor es menor, casi la mitad: 105 m/min. En cuanto a la calidad superficial, los valores obtenidos fueron 0,215 y 0,418 μm para la primera y última pasada respectivamente. Esto significa una mejora en el acabado superficial, no obstante se encuentra levemente sobre el valor deseado.

Esta curva crece de forma más rápida que en el caso de carburo, es decir se desgasta más rápido el inserto en el tiempo.

5.4.3 Inserto CBN probado en acero 300M

Considerando que el acero 300M supera los 45 HRC se decidió probar los insertos CBN en torneado en duro. Específicamente se quiso comparar el mecanizado en seco y con refrigerante haciendo uso de estos insertos.

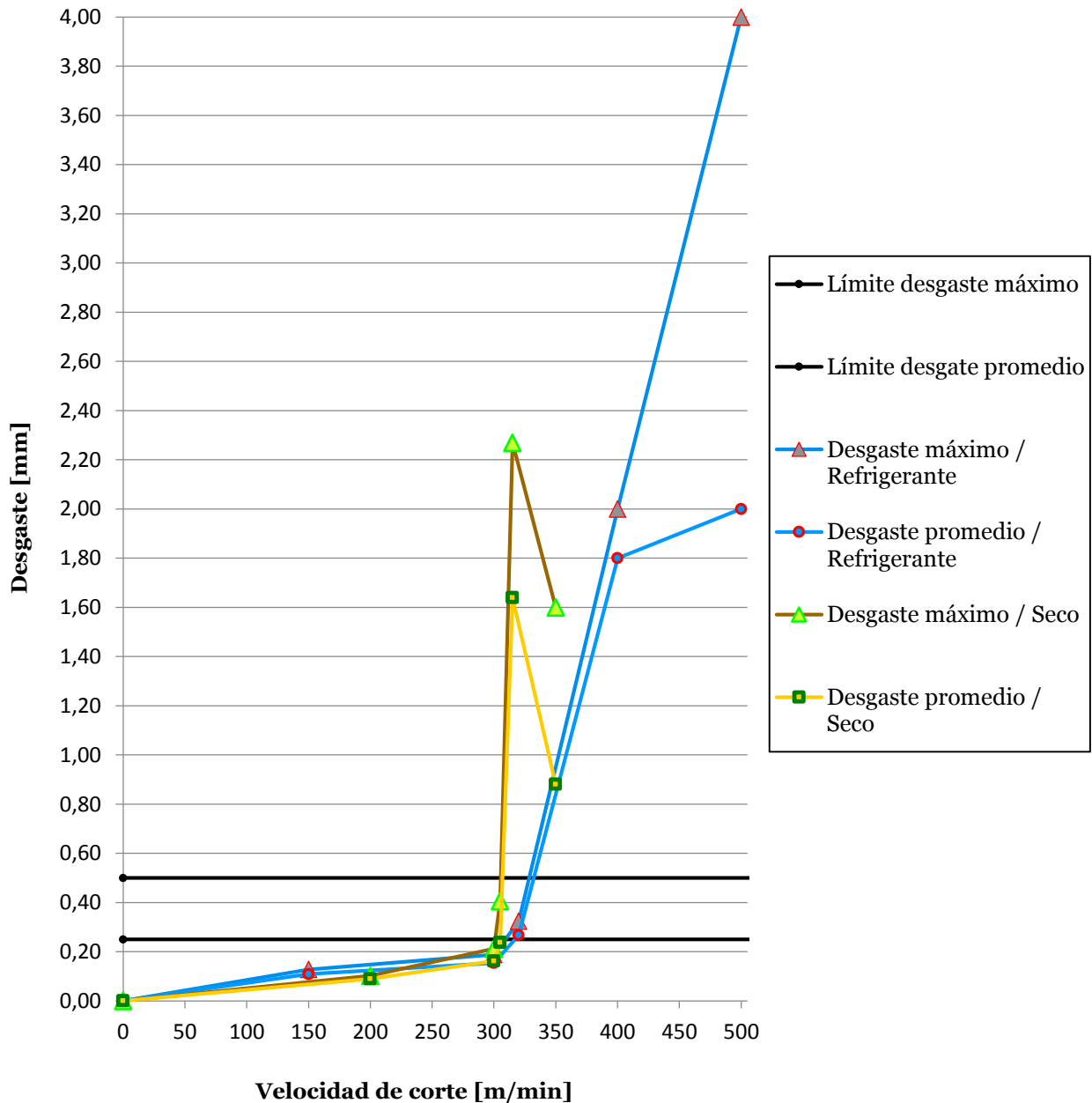


Figura 5.19: Desgaste en función de la velocidad de corte. Ensayo V15 usando inserto CBN en seco y con refrigerante para 300M.

Los resultados fueron muy parecidos (ver Figura 5.19). El V15 fue levemente mayor al usar refrigerante: 320 m/min versus los 305 m/min obtenidos en el mecanizado sin refrigerante.

En cuanto al acabo superficial, al mecanizar en seco se obtuvieron valores levemente menores después de 15 minutos: 0,293 y 0,262 μm para el caso con refrigerante y en seco respectivamente. Mayor diferencia se generó luego de la primera pasada, donde nuevamente el caso sin refrigerante obtuvo menores rugosidades: 0,163 versus 0,26 μm .

En relación al proceso de mecanizar, el caso en seco fue a ratos preocupante, pues las elevadas temperaturas generaban chispas en la barra, ver Figura 5.20. Luego de 3 pasadas, la barra se encontraba muy caliente, siendo peligroso tocarla, es por esto que en las últimas tres pasadas se refrigeraba antes de comenzar a cortar en seco. Pese a esto el inserto siempre estaba más frío que la barra, sin sobrecaentarse.

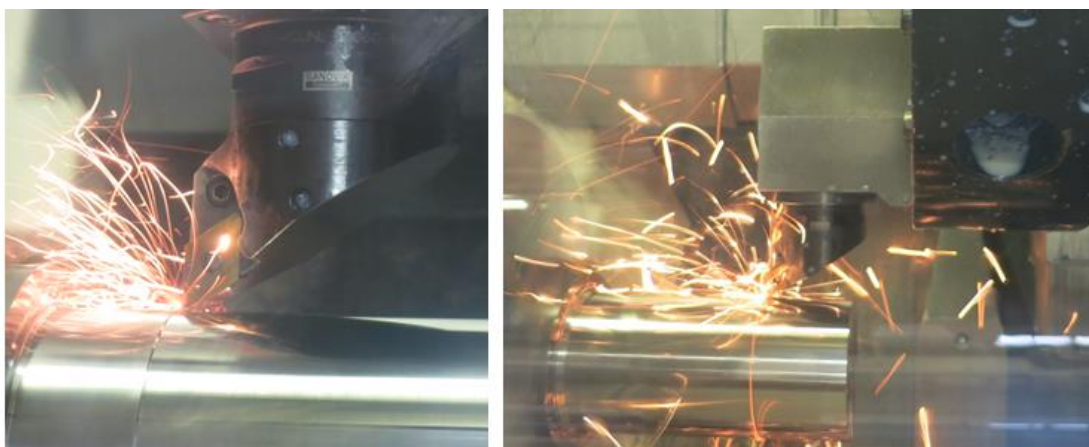


Figura 5.20: Chispas generadas al cortar en seco con inserto CBN.

La viruta producida en seco era particular, muy delgada y con pequeñas curvas, además el efecto del calor la manchaba de colores azules, morados e incluso negro. En casi todas las velocidades, exceptuando la menor de 220 m/min, la viruta se enredaba alrededor de la barra, debido a que la viruta nunca se cortaba, era una sola continua. En la Figura 5.21 se ve un ejemplo de esto, con la viruta delgada de un color azulado. En el caso con refrigerante sólo se enredó en la mayor velocidad de 350 m/min.

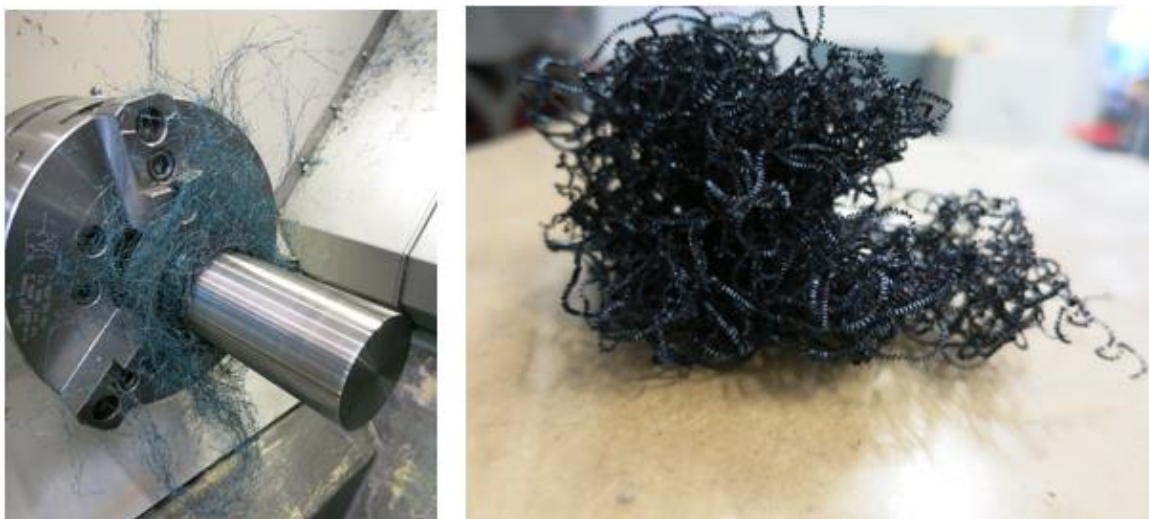


Figura 5.21: Viruta generada al cortar en seco.

Cuando las velocidades de corte probadas fueron mayores al V15, los insertos fueron completamente destruidos. Cabe señalar que las velocidades fueron muy por sobre el valor V15, probando valores incluso de 500 m/min que tuvieron un desgaste máximo de 4 mm. Esto se hizo para probar los límites en velocidades de corte usando insertos CBN.

5.4.4 Inserto Carburo probado en acero PH13-8Mo en estado duro y blando

Al comparar la V15 para un mismo material en distinta condición de dureza, con los mismos parámetros de corte, se comprobó que no existe una gran diferencia en el valor V15 obtenido. El valor mayor es en estado blando, a 280 m/min versus los 236 m/min en estado duro.

Como se ve en la Figura 5.22, en el caso blando no se superó el límite, pero considerando la cercanía a la meta, se tomó este como el valor V15. Cabe agregar que en esta prueba no se tomó la rugosidad antes y después en estado blando, pues no es el objetivo conseguir buena calidad superficial en estado blando.

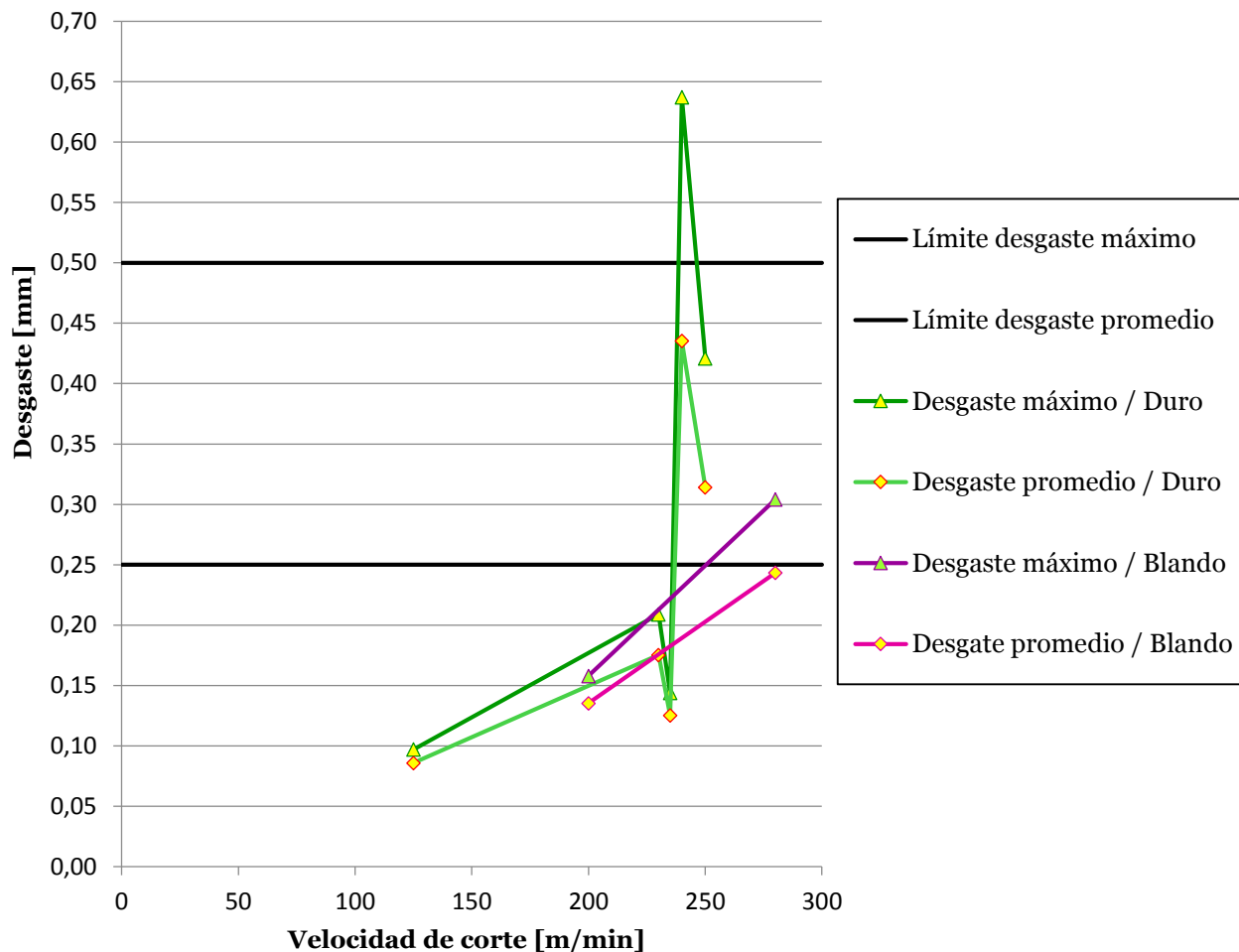


Figura 5.22: Desgaste en función de la velocidad de corte. Ensayo V15 usando inserto carburo para PH13-8Mo en estado blando y duro.

5.4.5 Resumen del grupo 4

En vista de la gran cantidad de datos generados, se presenta un resumen en la Figura 5.22 con las Velocidades 15 encontradas y las rugosidades medidas luego de las primeras pasadas y de 15 minutos.

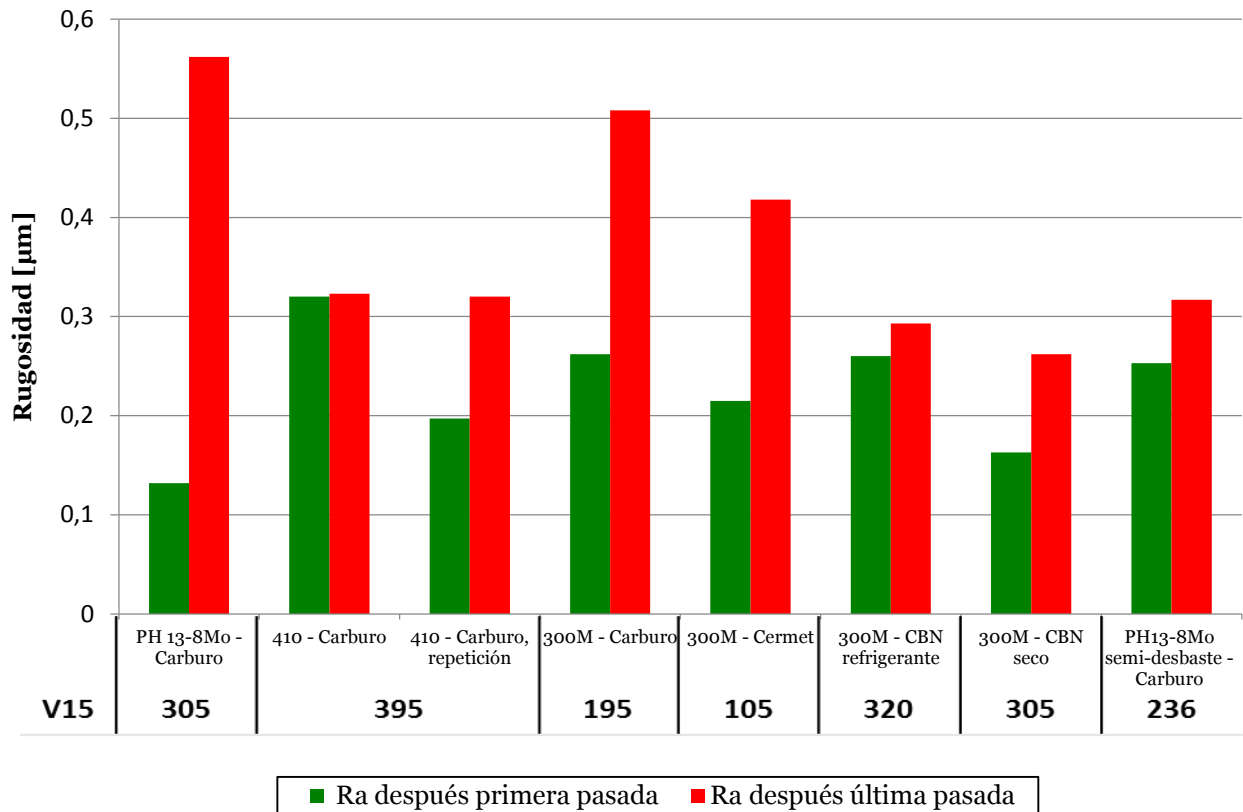


Figura 5.23: Resumen de rugosidades en ensayos V15. Valores después de la primera pasada y después de los 15 minutos.

5.4.6 Examinación en microscopio óptico

Las imágenes tomadas en el microscopio de alta definición, entregadas por Tata Steel, se muestran a continuación.

Sólo en la Figura 5.24, correspondiente al acero 410, se ve un cambio estructural, con una profundidad de 10 a 15 μm. De acuerdo a lo revisado en [22], esto corresponde a un endurecimiento por deformación. Si fuera capa blanca, tal como lo indica su nombre, se vería en blanco frente al microscopio.

Los otros materiales, no mostraron ninguna evidencia de capa blanca o deformación. Véase Figura 5.25 para revisar el acero PH13-8Mo y la Figura 5.26 para constatar el estado del acero 300M.

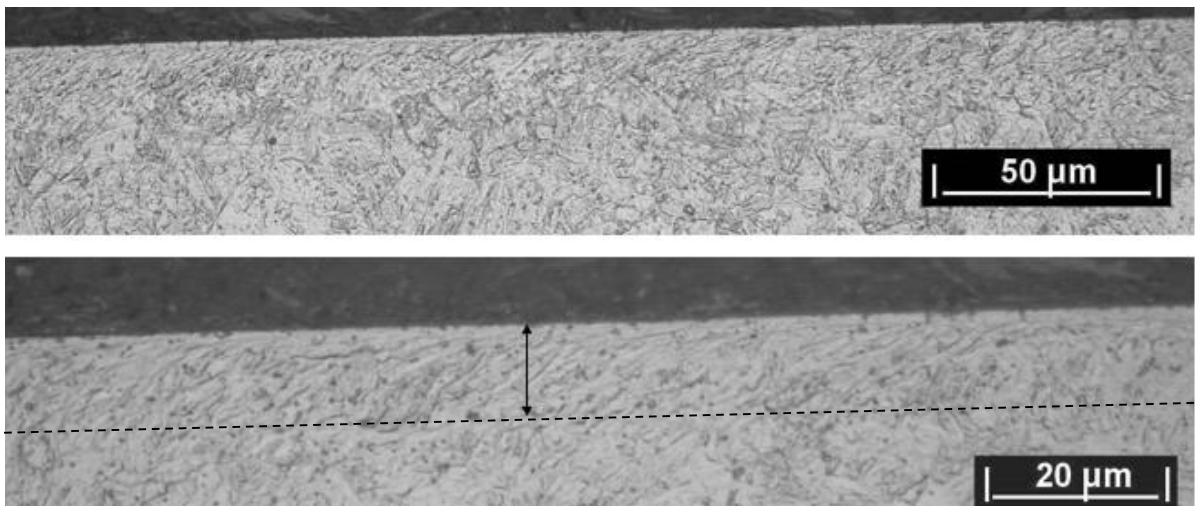


Figura 5.24: Imagen metalográfica del 410.

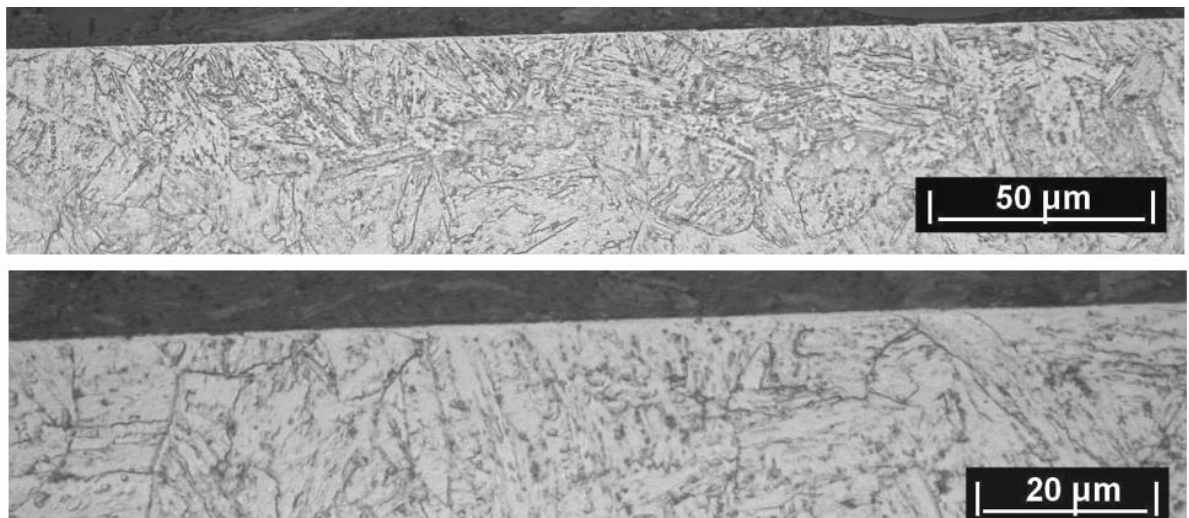


Figura 5.25: Imagen metalográfica del PH13-8Mo.

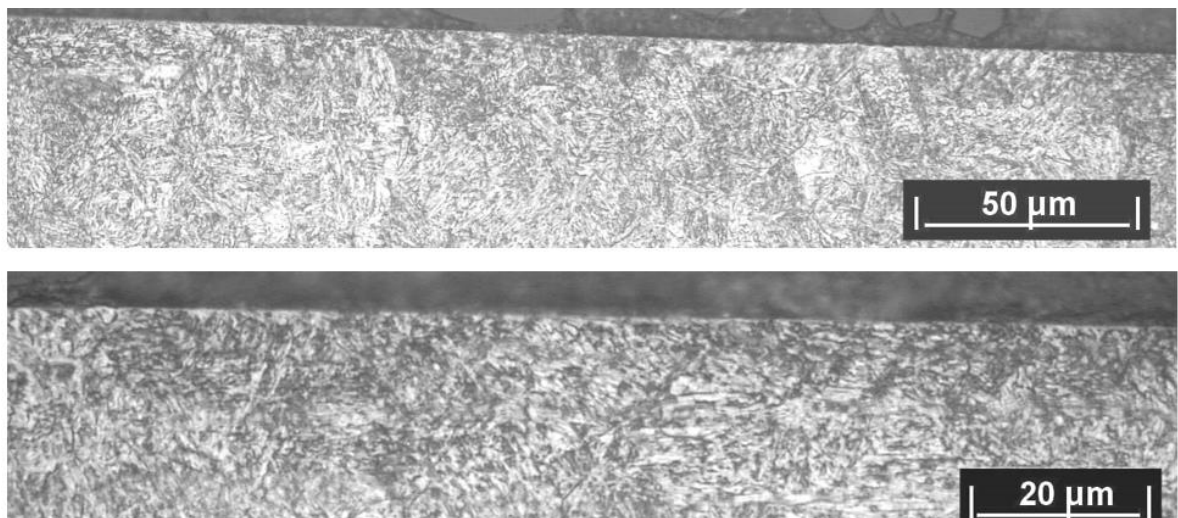


Figura 5.26: Imagen metalográfica del 300M.

Análisis

Relación de la dureza y V15

Como se observa de forma inmediata, la relación entre la dureza y el V15 es inversamente proporcional, materiales más duros se deben usar a menores velocidades de corte. Esto es por la abrasión que se produce en los insertos con materiales más duros, si a esto se le suma una mayor energía de corte —conforme a los resultados obtenido en el grupo 3— el desgaste se acelera y el inserto tiene una vida útil menor.

Poca linealidad en los valores cercanos al V15

Cercanos al V15 los valores crecían de forma más apresurada y no lineal. Esto hizo que en un principio la prueba fue confusa, pues se creía encontrar la V15 siguiendo la línea casi recta formada con los primeros valores, pero no, se descubrió que al estar en un desgaste cercano a los 20 mm los valores probados se deben ajustar y tomar la rugosidad pues es probable encontrar la V15. A esta variación se le suma la poca continuidad en este sector, los valores caen cuando están cercanos a fallar, esto agrega una dificultad, pues engaña la tendencia y hace parecer que se está lejos de la velocidad buscada.

Análisis para el acero 410

Para este material resulta evidente la conveniencia de usar el carburo de 1,6 mm de radio con geometría wiper a una velocidad de corte de 395 m/min, pues los valores de rugosidades, incluso después de 15 minutos se encuentran dentro del rango 0,3 μm . Además el hecho de que este inserto sea barato y común, facilita el mecanizado de este material. La productividad que se alcanza es muy atractiva, 8,64 cm^3/min .

Análisis para el acero PH13-8Mo

Al probar con el carburo de 1,6 mm de radio se obtuvo una V15 de 305 m/min, la cual puede conseguir elevadas productividades. El problema es la rugosidad obtenida, que sobrepasa el límite impuesto, alcanzando valores de 0,562 μm luego de 15 minutos. Cuando se cambiaron los parámetros de corte a condiciones de semi-desbaste —con el fin de comparar la conveniencia de mecanizar aceros duros a mayores parámetros de corte— se encontró una rugosidad bastante menor, dentro del rango de 0,3 μm , con una V15 de 236 m/min. Si bien este valor es menor, debe tenerse en consideración que la tasa de alimentación y la profundidad de corte son mayores, por tanto se alcanza una elevada productividad, es así como esta es la configuración óptima para este material.

Análisis para el acero 300M

El carburo resultó sobrepasar la rugosidad deseada, por tanto no se recomienda, a menos que se esté dispuesto a obtener rugosidades cercanas a 0,6 μm . El cermet —radio de la nariz de 0,8 mm y geometría wiper— estuvo más cercano al valor límite, alcanzando un valor de 0,418 μm , el problema es que la productividad se ve mermada con este inserto, pues su V15 de 105 m/min es casi la mitad de la obtenida con el carburo. La razón del

pobre rendimiento en el cermet se relaciona a la dureza de este material, en la revisión de los antecedentes se encontró que la dureza idónea para este inserto es cercana a los 45 HRC, valor superado por la dureza de 56 HRC de este acero.

El inserto CBN—de geometría wiper y radio de nariz de 1,2 mm— superó las expectativas, pues su rugosidad, en caso seco y con refrigerante fue menor a $0,3 \mu\text{m}$ y la productividad es 3 veces mayor a la del cermet. Pese a sus excelentes resultados, esta opción debe ser considerada por la empresa manufacturera, pues el costo de cada inserto supera los 120.000 CLP.

Cortar sin refrigerante

Sorprendentemente los valores de V15 conseguidos con y sin refrigerante fueron muy similares. Incluso, al cortar sin refrigerante la superficie obtenida es mejor.

La gran ventaja que tiene cortar en seco, es el impacto ambiental positivo, pues no se generan desechos irre recuperables, como sucede en el caso de los refrigerantes. Esto se extiende a la viruta que se forma, al tener refrigerante se contamina y frente a esto existen dos opciones: desecharla o limpiarla, lo que significa un gasto de energía humana y de equipos.

La principal desventaja que se observó en el proceso, está involucrada con la seguridad de los operarios, pues las barras alcanzan temperaturas muy elevadas, que pueden quemar la piel al contacto, asimismo las chispas producidas pueden dañar la visión si no se supervisa con las gafas adecuadas.

Considerando las altas temperaturas que alcanzaba la barra a la mitad de los ensayos, se decidió enfriar antes de comenzar un nuevo corte, pues considerando que este proceso es de acabado superficial, difícilmente se dará el caso de mecanizar de forma repetida sobre la misma superficie en más de una oportunidad.

Otra desventaja que presenta cortar sin refrigerante es la calidad de la viruta, al no tener refrigerante esta era muy larga, enredándose a lo largo de la barra y acumulándose en ella a una temperatura elevada.

Como solución se propone entregar pequeñas cantidades de refrigerante, a un flujo elevado, que permita cortar la viruta y enfriar la barra. Esto se puede hacer cada 1 ó 2 minutos de forma focalizada. Para concentrar esto es necesario diseñar nuevos equipos de mecanizado, que tengan las opciones de refrigerante regulables. De implementarse este sistema, la contaminación se vería sustancialmente reducida, así como también todos los gastos que esta genera.

Realizar el tratamiento térmico antes o después de desbastar

Considerando los resultados obtenidos en el acero PH13-8Mo en estado duro y blando, se sugiere fuertemente realizar el tratamiento térmico antes de hacer el semi-desbaste, ya que la productividad no se ve muy afectaba al ejecutar el mecanizado en estado duro. A esto se debe agregar el ahorro un procedimiento y toda la demora que esto significa. Si bien a lo largo de este estudio se ha demostrado que la dureza afecta el desgaste del inserto, disminuyendo su vida útil, este proceso se puede llevar a cabo con insertos económicos, como en el caso de la prueba, con un carburo.

Presencia de deformación en acero 410

Considerando la leve deformación presentada, queda a criterio del cliente si aplicar esa velocidad de corte. Se recomienda disminuir levemente, bajando a 380 m/min, para no afectar la productividad.

Presencia de martensita revenida

En la Figura 5.24 se ven granos más oscuros; considerando que se trata de un acero inoxidable martensítico, el cual recibió un tratamiento térmico de endurecimiento, estos posiblemente corresponden a martensita revenida.

5.5 Estudio de la rugosidad y el desgaste en el tiempo

En la Figura 5.27 se observa cómo la rugosidad y el desgaste evolucionan en el tiempo. El primer aspecto a considerar es la nula continuidad que presenta la rugosidad, esta motivó la repetición esta prueba en tres oportunidades, como se muestra en la figura con distintos colores.

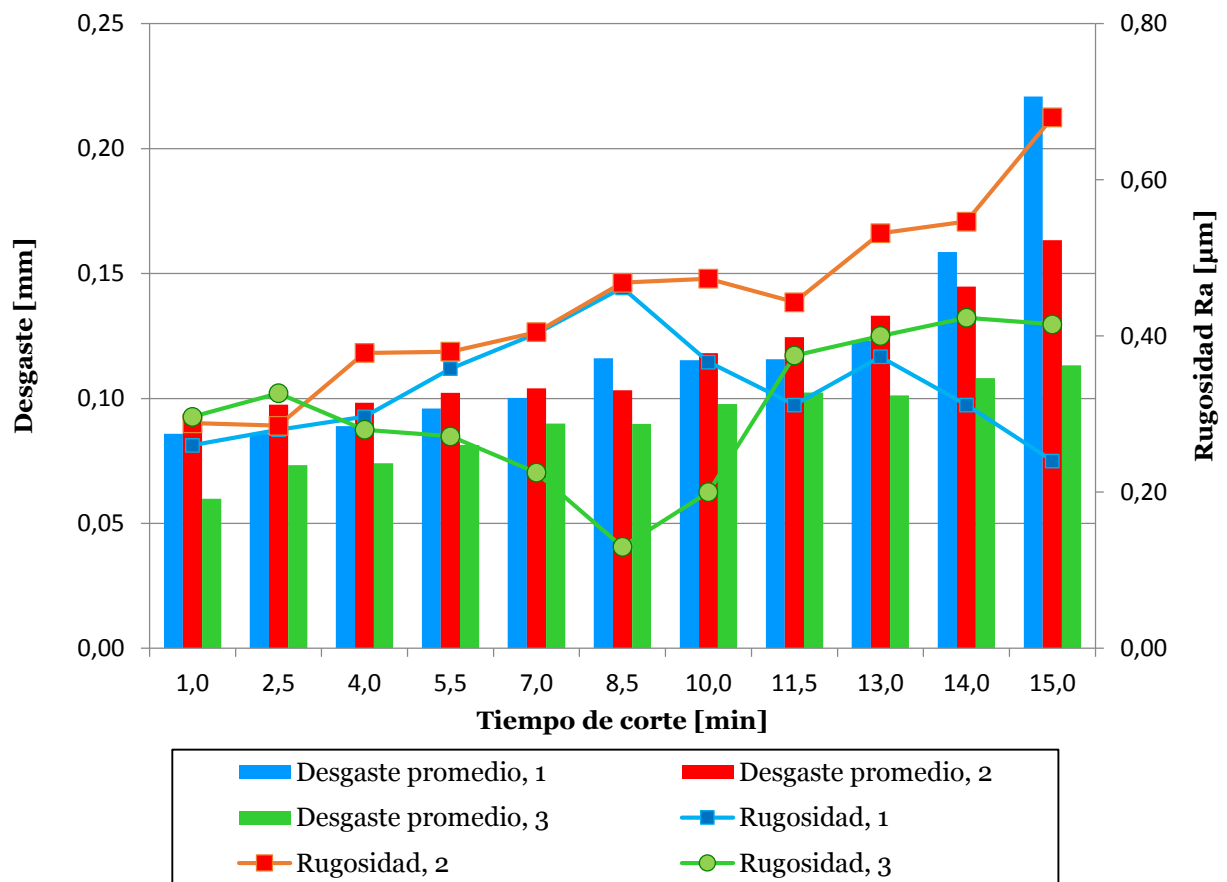


Figura 5.27: Desgaste y rugosidad de forma progresiva en el tiempo, para tres ensayos en el material 300M en las mismas condiciones.

En el primer ensayo —con líneas azules— la rugosidad aumenta con el desgaste y el tiempo, pasado más de la mitad de la prueba disminuye bruscamente, y comienza a disminuir con el tiempo y el desgaste, consiguiendo la menor rugosidad a los 15 minutos.

En vista del resultado descrito previamente, menor rugosidad a mayor desgaste y tiempo, se realizó un segundo ensayo, en rojo. La tendencia es la esperada, la calidad superficial se ve afectada por el desgaste del inserto, se invierte sutilmente esta relación en el último tramo. Nótese que de acuerdo a este resultado, el inserto carburo es adecuado para el material 300M, pues luego de 15 minutos alcanza una rugosidad de $0,24 \mu\text{m}$, esto si se obvia que a la mitad del tiempo los valores superan los $0,4 \mu\text{m}$.

Finalmente se hizo un tercer intento —identificado con verde—con este resultado se espera definir la tendencia, pero es una perfecta mezcla de las anteriores: la rugosidad disminuye a medida que aumenta el desgaste en el primer tramo, a partir de la mitad en adelante la rugosidad aumenta con el desgaste y el tiempo.

En lo que respecta al desgaste, la inclinación es clara a aumentar en el tiempo, si bien en algunas zonas se ve estancada nunca disminuye. Empero, no lo hace siempre de la misma forma, pese a que se trata del mismo acero —300M— con los mismos parámetros de corte. El primer intento alcanzó un desgaste de $0,22 \text{ mm}$, menor al esperado, ya que se trata de la V15 anteriormente encontrada. Los otros dos casos son incluso más desconcertantes, el desgaste es de $0,163$ y $0,113 \text{ mm}$ para la segunda y tercera prueba respectivamente.

En vista de los resultados tan particulares, los insertos utilizados se analizaron en el software Alicona. La Figura 5.28 muestra las imágenes obtenidas, ordenadas según el orden de los ensayos realizados.

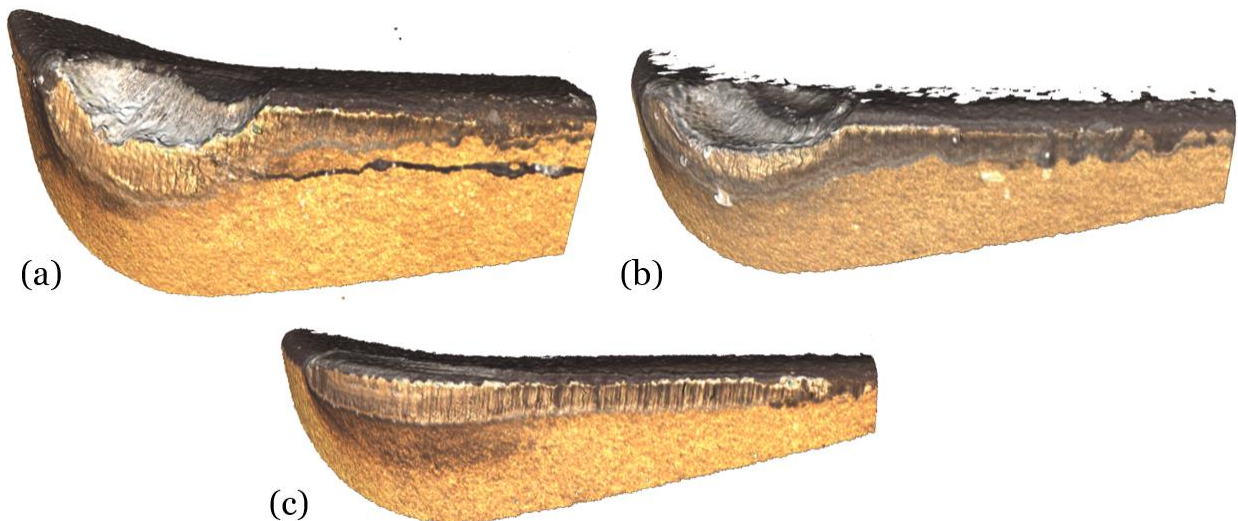


Figura 5.28: Imágenes obtenidas con el software Alicona, para los ensayos de rugosidad y desgaste progresivo; a) inserto del primer ensayo b) inserto del segundo ensayo c) inserto del tercer ensayo.

El mayor desgaste de flanco se produjo en el primer ensayo (a) y el menor en el tercero (c). Se evidencia que en el primer y segundo ensayo (b) se produjo un cráter en los insertos. Nótese que el inserto (a) tiene una línea de fractura.

El inserto del ensayo 3 (c) se encuentra en muy buenas condiciones, tal como lo indica los valores obtenidos en la Figura 5.27.

Como este material trabaja a altas temperaturas, quema el inserto, es por esto que se observan zonas negras en los bordes.

Ningún inserto presenta BUE.

Análisis

Relación entre el desgaste y la rugosidad

No se puede concluir una relación, pues esta fue muy variante en el tiempo.

Diferencia con el V15

Se esperaba obtener valores del desgaste cercanos al del límite de falla, es decir 0,25 mm, porque se probó la V15 encontrada en el material 300M con el inserto carburo. Esto se explica en las condiciones a las que estuvo sometido el inserto: se sacaba cada 1,5 minutos, lo que da un corte interrumpido, además esto cambiaba las condiciones espaciales, en otras palabras, el inserto no quedaba exactamente en el mismo lugar cuando se sacaba para hacer las mediciones de desgaste. A esto se le suma el hecho de que esto permite enfriar el inserto de forma gradual, liberando cualquier tensión superficial que puede quedar en los cambios de temperatura que se producen con el refrigerante.

Se concluye al respecto que el corte interrumpido —dejando al inserto descansar— aumenta la vida útil del inserto.

Forma de desgaste del inserto

Según lo visto con el software Alicona, la forma de desgastarse en todos los casos fue distinta. En los insertos (a) y (b) se ve una falla de cráter, faltando la parte superior de estos. Mientras que el inserto (c) se gasta netamente de flanco. Se observa como en condiciones similares, los insertos no se gastan de la misma forma, ni obtienen los mismos valores.

5.6 Comparación de los insertos, en términos de costo

En la Tabla 5.2 se muestran las V15 encontradas y el MRR. Con estos datos y la Ecuación 4.7 se calcula el costo de remover cada decímetro cúbico de material.

Se aprecia de inmediato que el inserto más costoso —considerando los costos presentados en la sección 4.6— es el cermet cuando se usa en el acero 300M en condiciones de acabado superficial. Este valor, casi dos veces mayor que la mayoría de los otros insertos, lo hace poco competitivo a la hora de decidir qué inserto usar en el acero 300M.

Los insertos CBN, pese a ser los de mayor valor —casi 10 veces mayor al precio el carburo, alrededor de 120.000 CLP por inserto CBN— se vuelven competitivos, pues sus elevadas productividades permiten ahorrar tiempo de la máquina y del operador. En condiciones de mecanizado en seco, estos se vuelven aún más eficientes económicamente, ahorrándose un 2% extra.

Tabla 5.2: Insertos con sus costos y productividad, según los distintos estados de corte.

Material del inserto	Código inserto	Material y estado de dureza	V15 [m/min]	MRR [cm ³ /min]	Costo* /dm ³
Carburo	CNMG 12 04 12 -PM 4235	410 desbaste en blando	250	156,25	0,72
	DNMX 15 06 16 - WF 4215	PH13-8Mo semi-desbaste en blando	280	43,75	2,56
		PH13-8Mo semi-desbaste en duro	236	36,72	3,04
		PH13-8Mo acabado en duro	305	6,67	16,81
		410 acabado en duro	395	8,64	12,98
		300M acabado en duro	195	4,27	26,29
Cermet	DNMX 15 06 08 -WF 1525	300M acabado en duro	100	2,19	50,55
CBN (refrig.)	DNGA 15 04 125 01030 AWH 7015	300M acabado en duro	320	7,00	32,92
CBN (seco)		300M acabado en duro	305	6,67	32,25

Teniendo en cuenta que las condiciones de salario no son las mismas en cada país, se hizo una comparación —para el material 300M— considerando que el precio por hora de la máquina puede variar; pues es sabido que en algunos países es más barato mecanizar que en otros. La Figura 5.29 muestra esta relación, donde todos los precios están normalizados al valor del inserto carburo de radio 1,6 mm y geometría wiper; por tanto, 1 en el gráfico significa 1 vez el precio de este inserto, cerca de 16.000 CLP.

Se observa que a bajos precios de la máquina, el inserto más apropiado —en términos netamente económicos— es el carburo, seguido del CBN en estado seco, luego el con refrigerante y finalmente el cermet.

Cuando la hora de trabajo se encarece, entonces el inserto CBN se vuelve una mejor opción. Para el caso en seco, el precio por hora de la máquina debe ser aproximadamente 3 veces el valor del carburo y con refrigerante, esta relación debe ser cercana a 5. Por su parte, el inserto cermet se mantiene como el inserto de mayor costo.

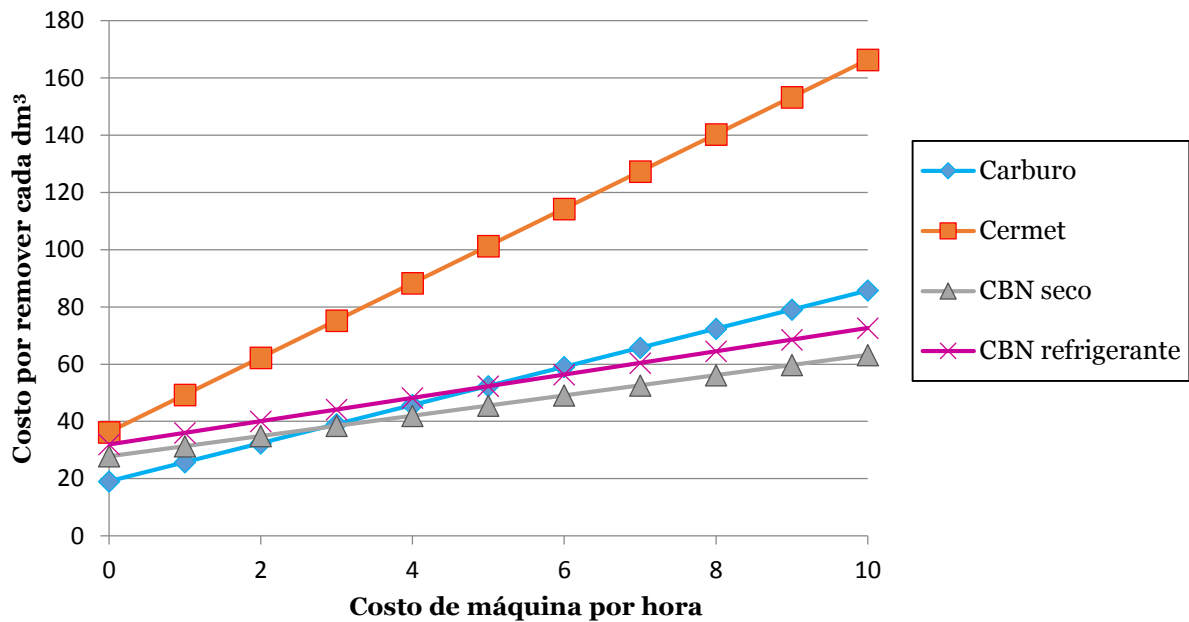


Figura 5.29: Costos de remover cada decímetro cubico, en función del costo de la máquina por hora. Comparación de los 3 tipos de insertos.

Análisis

Criterio de comparación de los precios.

El valor de los insertos depende de la productividad que estos consigan. La conveniencia económica depende de distintos factores, tales como el precio de la máquina por hora y de los salarios de sus empleados. Entonces, comparar los insertos sólo por el valor comercial es muy limitado.

Los insertos CBN se vuelve la mejor opción si el precio por mecanizar es muy elevado, pues logran ahorrar tiempo con su elevada productividad.

Costos en materiales más duros

Dado que la dureza influye en los parámetros de corte —mayor dureza implica menores parámetros de corte— resulta más caro mecanizar materiales duros. Esto se ve al comparar el desempeño del inserto carburo en los tres materiales: mecanizar el material 410 resulta 50% más económico, respecto del acero 300M. Esta relación también se aprecia al comparar el material PH13-8Mo en estado duro y blando.

6 Conclusiones

En base a los experimentos realizados en esta investigación, es posible establecer cómo se relacionan los parámetros de corte —velocidad de corte y tasa de alimentación—, la geometría y el material del inserto, con la rugosidad superficial. A partir de estas relaciones, es posible determinar la configuración óptima de mecanizado que, conforme a los alcances de este estudio permitan obtener una rugosidad menor a $0,4 \mu\text{m}$ en los aceros analizados.

Cabe mencionar que las recomendaciones entregadas de la configuración deben ser consideradas dentro de un margen, pues las pruebas se realizaron en una sola oportunidad, y los resultados pueden variar bajo otras condiciones.

Al realizar el análisis de la influencia de los parámetros de corte, la tasa de alimentación resultó ser el que más afecta en el acabado superficial. Se corrobora que menores tasas de alimentación generan superficies con menor rugosidad. Se sugiere usar valores entre $0,05 - 0,1 \text{ mm/rev}$ y no sobrepasar los $0,2 \text{ mm/rev}$, pues en la mayoría de las pruebas se obtuvo elevadas rugosidades a dicha tasa. Además, valores muy bajos de la tasa de alimentación elevan la rugosidad, por lo que existe un óptimo en cuanto a la rugosidad.

Por su parte, mayores velocidades de corte consiguen superficies más pulidas. No obstante, los resultados sugieren la existencia de un óptimo, dado que al aumentar la velocidad de corte, la rugosidad aumentó.

Respecto al inserto, se observó que tanto el material como la geometría influyen en la rugosidad. El material debe ser escogido según el acero a mecanizar, dado que el comportamiento difiere en cada caso. Por su parte la geometría, influye a través del radio de la nariz, donde mayores radios consiguen mejor calidad superficial y se ven menos afectados por los cambios en las tasas de alimentación, no así los insertos de radios pequeños, que muestran gran dispersión a distintas tasas de alimentación. La geometría wiper, que considera múltiples radios en lugar de uno, constituye una gran mejora, pues consigue bajas rugosidades, incluso a altas tasas de alimentación.

Por su parte, se constató que la dureza del material afecta el mecanizado. En efecto, mecanizar un material más duro conlleva: V15 menores, por tanto mayores tiempos de producción; insertos de elevada dureza, los cuales son más caros; y fuerzas mayores, que aumentan la energía consumida. Todo lo anterior se traduce en costos más elevados. Pese a esto, la opción de efectuar un desbaste en estado duro es preferible a realizar un desbaste en estado blando, debido a que este último implica un tratamiento térmico entre los procesos de mecanizado, lo que corresponde a un mayor tiempo de manufactura.

En cuanto al comportamiento progresivo del desgaste, se observa que sigue una tendencia lineal en los primeros minutos; sin embargo cuando el inserto se encuentra cercano a fallar, el desgaste aumenta de forma rápida, cambiando su tendencia inicial en los valores cercanos a los límites de desgaste.

En función de los puntos presentados anteriormente se tiene que cada acero posee un inserto más adecuado, con sus respectivos parámetros de corte. Fijando una tasa de alimentación de $0,0875 \text{ mm/rev}$ y una profundidad de corte de $0,25 \text{ mm}$, las recomendaciones son las siguientes: en el caso del material 410, el carburo de geometría wiper y radio $1,6 \text{ mm}$ es la mejor opción. La velocidad de corte a usar debe ser de 380

m/min, ya que así se previene la deformación estructural sufrida a 395 m/min. La rugosidad obtenida fue cercana a $0,3 \mu\text{m}$, cumpliendo con lo deseado. Para el material 300M se probaron distintos insertos, siendo el CBN de geometría wiper y radio 1,2 mm el que tuvo el mejor rendimiento, consiguiendo una V15 de 320 m/min con refrigerante y 305 m/min en seco, ambos con rugosidades menores a los $0,3 \mu\text{m}$. Si bien este inserto tiene un elevado costo, su alta productividad lo vuelve competitivo, siendo la mejor opción cuando el precio por hora de mecanizado es elevado. En cuanto al acero PH13-8Mo se recomienda usar parámetros de corte de semi-desbaste: 1,25 mm de profundidad de corte, 0,125 mm/rev en tasa de alimentación y una velocidad de corte 236 m/min, usando el carburo de geometría wiper y radio 1,6 mm. Con esta configuración se obtiene una rugosidad cercana a $0,3 \mu\text{m}$.

La conclusión global es que se puede prescindir del proceso de rectificado, si el torneado se hace con la combinación adecuada de parámetros de corte y escogiendo los insertos más idóneos para cada material, pues estos tienen distintos desempeños según las características del material.

7 Glosario

BUE	: Abreviación de las siglas en inglés Built Up Edge, traducido a borde recrecido. Es un tipo de falla en los insertos, que consiste en acumular sobre el borde inserto material semi fundido de la pieza a mecanizar.
Ángulo de barrido	: Describe la posición del inserto respecto de la barra a mecanizar. Su término en inglés es rake angle.
Capa Blanca	: Es un cambio metalográfico que puede sufrir la superficie del material, causada por los cambios de temperatura rápidos. En inglés se denomina White Layer
Carburo	: Material de inserto. Son principalmente carburos de TiC unidos por medio de cementos, además cuentan con una fase enriquecida en Cobalto que les da la tenacidad necesaria.
CBN	: Defino por sus siglas en inglés Cubic Boron Nitride, es decir es un Nitruro de Boro Cúbico. Material de inserto de elevada resistencia a la temperatura y desgaste.
Cermet	: Material de inserto. Similares a los carburos en composición, la diferencia es que además de poseer carbonitruros de titanio, tienen una segunda fase dura compuesta de Titanio, Tungsteno, Niobio, Nitratos, todos en forma de carburos.
Condiciones de Acabado	: Proceso de mecanizado que se caracteriza por ser lento, pues se utilizan parámetros de corte bajos comparados con los de procesos de desbaste. El foco está en la calidad superficial.
Condiciones de desbaste	: Proceso de mecanizado rápido, en que se pretende remover la mayor cantidad de material por minuto.
MRR:	: Definido por sus siglas en inglés Material Removal Rate, traducido a Tasa de Remoción del Material. Corresponde a la cantidad de cm ³ removidos en un minuto.
Profundidad de corte	: Identificada por la letra d. Es la distancia entre la superficie no cortada y la que ya fue mecanizada. Se mide perpendicular a la dirección de la tasa de alimentación. Depth of cut, en inglés.
Tasa de alimentación	: Identificada por fr. Corresponde a la distancia que avanza la herramienta, linealmente en dirección de la línea de centro de la pieza a cortar, por cada revolución que da la pieza. Feed rate, en inglés.
Torno CNC	: Torno de Control Numérico. Mecaniza las piezas mediante el uso de un software incorporado al torno. La intervención humana en estos tornos se limita a la definición de los parámetros, y el montaje y desmontaje de la pieza con sus insertos.
Velocidad de corte	: Identificada por Vc. Corresponde a la longitud que recorre la herramienta, a través del material a tornearse, por unidad de tiempo. Cutting speed en inglés
Wiper	: Geometría del inserto que posee radios múltiples de la nariz del inserto, típicamente 3, en lugar de 1.

8 Bibliografía

1. Edmund Isakov, *Engineering Formulas for Metalcutting*. Nueva York, Industrial Press, 2003. Capítulo 3.
2. Efundu, engineering fundamentals, Processes, Machining, Turning [en línea] : <<http://www.efunda.com/processes/machining/turn.cfm>> [Consultado 27/03/15]
3. Mitsubishi Materials, Technical information, mmc-permanent.learnways.com, Advanced turning, < <http://mmc-permanent.learnways.com/courses/75/tool-geometry.html>> [Consultado 27/03/15]
4. Metal suppliers, Material property data, Alloy Steel, 300M [en línea]: <<http://www.supplieronline.com/propertypages/300m.asp>> [Consultado 12/02/14]
5. Globalmetals, Metagurgicall overview, Effect of alloying elements [en línea] : <http://www.globalmetals.com.au/_pdf/Metallurgical_Overview/section_4.pdf> [Consultado: 12/02/2014]
6. Azo materials, Artículos [en línea]: <<http://www.azom.com/article.aspx?rticleID=5736>> [Consultado 10/02/14]
7. J. Paro, H. Hänninen, and V. Kauppinen, “Tool wear and machinability of X5 CrMnN 18 18 stainless steels,” *Materials Processing Technology*, vol. 119, pp. 14–20, 2001.
8. Z. Tekiner and S. Yeşilyurt, “Investigation of the cutting parameters depending on process sound during turning of AISI 304 austenitic stainless steel,” *Materials & Design*, vol. 25, no. 6, pp. 507–513, 2004.
9. I. Korkut, M. Kasap, I. Ciftci, and U. Seker, “Determination of optimum cutting parameters during machining of AISI 304 austenitic stainless steel,” *Materials and Design*, vol. 25, pp. 303–305, 2004.
10. Sandvik Coromant, Knowledge, General turning, Troubleshooting, Tool wear [en línea]<http://www.sandvik.coromant.com/engb/knowledge/general_turning/troubleshooting-/tool-wear/pages/default.aspx> [Consultado 24/02/15]
11. Mitsubishi Materials, Technical information, mmc-permanent.learnways.com, Advanced turning [en línea] <<http://mmc-permanent.learnways.com/courses/75/surface-roughness.html>> [Consultado 02/04/15]

12. D. Y. Jang, Y. G. Choi, H. G. Kim, and A. Hsiao, "Study of the correlation between surface roughness and cutting vibrations to develop an on-line roughness measuring technique in hard turning," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 36, no. 4, pp. 453–464, 1996.
13. Sata, M. Li, S. Takata, H. Hiraoka, C.Q. Li, X.Z. Xing, X.G. Xiao, "Analysis of Surface Roughness Generation in Turning Operation and its Applications," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 34, pp. 473-476, 1985.
14. Sandvik Coromant, Knowledge, Materials, Measuring surfaces [en línea] <http://www.sandvik.coromant.com/engb/knowledge/materials/measuring_surfaces/pages/default.aspx> [Consultado 24/02/15]
15. Universidad de mar del Plata, Facultad de Ingeniería, Tecnología, [en línea] <http://www.avinent.com/public/adjunts/documentacion_15_Propiedades_superficiales-Characterizaci%C3%B3n.pdf> [Consultado 18/04/15]
16. CORE-Materials, 937 images, Grinding Process [en línea] <<http://core.materials.ac.uk/search/detail.php?id=3279>> [Consultado 04/04/15]
17. H. Shao, L. Liu, and H. L. Qu, "Machinability study on 3%Co–12%Cr stainless steel in milling," *Wear*, vol. 263, no. 1–6, pp. 736–744, 2007.
18. Y. Matsumoto, C.R. Liu, M.M. Barash, "Residual stress in the machined surface of hardened steel," *High Speed Machining*, pp. 193–204, 1984
19. S. S. Bosheh and P. T. Mativenga, "White layer formation in hard turning of H13 tool steel at high cutting speeds using CBN tooling," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 46, pp. 225–233, 2006.
20. R. Liu and S. Mittal, "Optimal pre-stressing the surface of a component by superfinish hard turning for maximum fatigue life in rolling contact," *Wear*, vol. 219, pp. 128 – 140, 1998.
21. Y. Matsumoto, F. Hashimoto, G. Lahoti, and T. T. Company, "Surface Integrity Generated by Precision Hard Turning," *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, vol. 48, no. 1, pp. 59–62, 1999.
22. J.P Davim, *Surface Integrity in Machining*. Londres, Springer, 2010. Capítulo 1.
23. I.S Harrison, T.R Kurfess, E.J Oles, P.M Singh, "Inspection of White Layer in Hard Turned Components Using Electrochemical Methods," *Journal Manufacturing Science and Engineering*, vol. 129, no.2, pp. 447-452.

24. A.E Diniz, J.R Ferreira, F.T Filho, "Influence of refrigeration/lubrication condition on SAE 52100 hardened steel turning at several cutting speeds," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 43, pp 317-326, 2003
25. A.J de Oliveira, A.E Diniz, D.J Ursolino, "Hard turning in continuous and interrupted cut with PCBN and whisker-reinforced cutting tools," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 209, pp. 5262-5270, 2009.
26. S. R. Das, A. Kumar, and D. Dhupal, "Effect of Machining Parameters on Surface Roughness in Machining of Hardened AISI 4340 Steel Using Coated Carbide Inserts," *International Journal of Innovation and Applied Studies*, vol. 2, no. 4, pp. 445-453, 2013.
27. M. H. A. Seireg and R. A. Lindberg, "Surface roughness model for turning," *Tribology international*, vol.9, no.6, pp. 285-289, 1976
28. Sandvik Coromant, Knowledge, General turning, How to achieve good component quality by turning, Insert information [en línea] <http://www.sandvik.coromant.com/en-us/knowledge/general_turning/how-to-achieve-good-component-quality/insert-information/insert-nose-radius/pages/default.aspx> [Consultado 20/02/15]
29. P. Petropoulos, "The effect of feed rate and of tool nose radius on the roughness of oblique finish turned surfaces," *Wear*, vol. 23, pp. 299-310, 1973.
30. T. Özel and Y. Karpat, "Predictive modeling of surface roughness and tool wear in hard turning using regression and neural networks," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 45, no. 4-5, pp. 467-479, 2005.
31. T. G. Dawson and T. R. Kurfess, "Tool life , wear rates , and surface quality in hard turning Georgia Institute of Technology," *Transactions-north American Manufacturing Research Institution of SME*, pp. 175-182, 2001.
32. W. Chen, "Cutting forces and surface finish when machining medium hardness steel using CBN tools," *International journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 40, pp. 455-466, 2000.
33. Q. Anq, C. Wang, J. Xu, P. Liu, and M. Chen, "Experimental investigation on hard milling of high strength steel using PVD-ALTiN coated cemented carbide tool," *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, vol. 43, pp. 94-101, 2014.

34. R. Suresh, S. Basavarajappa, V. N. Gaitonde, and G. L. Samuel, "Machinability investigations on hardened AISI 4340 steel using coated carbide insert," *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, vol. 33, pp. 75–86, 2012.
35. I. Korkut, M. Kasap, I. Ciftci, and U. Seker, "Determination of optimum cutting parameters during machining of AISI 304 austenitic stainless steel," *Materials and Design*, vol. 25, pp. 303–305, 2004.
36. D. Philip Selvaraj, P. Chandramohan, and M. Mohanraj, "Optimization of surface roughness, cutting force and tool wear of nitrogen alloyed duplex stainless steel in a dry turning process using Taguchi method," *Measurement*, vol. 49, pp. 205–215, 2014.
37. Y. K. Chou and H. Song, "Tool nose radius effects on finish hard turning," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 148, no. 2, pp. 259–268, 2004.
38. Y. K. Chou and C. J. Evans, "White layers and thermal modeling of hard turned surfaces," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 39, pp. 1863–1881, 1999.
39. F. Gunnberg, M. Escursell, and M. Jacobson, "The influence of cutting parameters on residual stresses and surface topography during hard turning of 18MnCr5 case carburised steel," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 174, no. 1–3, pp. 82–90, 2006.
40. H. Saglam, F. Unsacar, and S. Yaldiz, "Investigation of the effect of rake angle and approaching angle on main cutting force and tool tip temperature," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 46, pp. 132–141, 2006.
41. Mitsubishi Materials, Technical information, function of tool features for turning, rake angle [en línea] < http://www.mitsubishicarbide.net/contents/mhg/enuk/html/product/technical_information/information/turning_function_rake.html> [Consultado 15/04/15].
42. W. Grzesik and T. Wanat, "Surface finish generated in hard turning of quenched alloy steel parts using conventional and wiper ceramic inserts," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 46, no. 15, pp. 1988–1995, 2006.
43. T. Özel, Y. Karpat, L. Figueira, and J. P. Davim, "Modelling of surface finish and tool flank wear in turning of AISI D2 steel with ceramic wiper inserts," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 189, pp. 192–198, 2007.

44. Sandvik Coromant, Downloads, Turning Handbook [en línea] http://sandvik.ecbook.se/SE/en/Turning_handbook/ [Consultado 26/02/15]
45. Izaro, Manufacturing technology, Tecnologías, Metal, Herramientas de la nueva década [en línea] < <http://www.izaro.com/contenidos/ver.php?id=es&se=3&su=32&co=1297186966> > [Consultado 10/02/15]
46. Sandvik Coromant, Knowledge, Materials [en línea] <<http://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge/materials/introduction/pages/default.aspx>> [Consultado 19/04/15]
47. E. Brinksmeier, a. Walter, R. Janssen, and P. Diersen, “Aspects of cooling lubrication reduction in machining advanced materials,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 213, pp. 769–778, 1999.
48. R. Pavel, I. Marinescu, M. Deis, and J. Pillar, “Effect of tool wear on surface finish for a case of continuous and interrupted hard turning,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 170, pp. 341–349, 2005.

Anexos

Anexo A: PH13-8Mo, resultados del grupo 3

Tabla A. 1: Parámetros medidos con sus respectivos valores y puntajes. PH13-8Mo.

Corte 1	P1.1		Corte 2	P1.2		Corte 3	P1.3	
Vc [m/min]		75	Vc [m/min]		150	Vc [m/min]		225
Tasa [mm/rev]		0,05	Tasa [mm/rev]		0,125	Tasa [mm/rev]		0,2
	Resultado	Ptje.		Resultado	Ptje.		Resultado	Ptje.
Surface:	0,50	2,29	Rugosidad:	0,15	7,39	Rugosidad:	0,27	4,25
MRR :	0,94	0,45	MRR :	4,69	2,27	MRR :	11,25	5,45
Inserto:		6	Inserto:		6,5	Inserto:		5,8
Fuerzas:	248,35	7,23	Fuerzas:	257,39	6,98	Fuerzas:	369,62	4,86
Viruta:		5	Viruta:		6	Viruta:		6,5
Puntaje ponderado:		34	Puntaje ponderado:		60	Puntaje ponderado:		51
Corte 4	P1,4		Corte 5	P1.5		Corte 6	P1.6	
Vc [m/min]		225	Vc [m/min]		75	Vc [m/min]		262,5
Tasa [mm/rev]		0,05	Tasa [mm/rev]		0,2	Tasa [mm/rev]		0,125
	Resultado	Ptje,		Resultado	Ptje,		Resultado	Ptje,
Rugosidad:	0,11	10,00	Rugosidad:	0,35	3,22	Rugosidad:	0,14	8,00
MRR :	2,81	1,36	MRR :	3,75	1,82	MRR :	8,20	3,98
Inserto:		6,5	Inserto:		6,7	Inserto:		6,2
Fuerzas:	224,06	8,01	Fuerzas:	356,19	5,04	Fuerzas:	331,29	5,42
Viruta:		5	Viruta:		2	Viruta:		7
Puntaje ponderado:		69	Puntaje ponderado:		37	Puntaje ponderado:		65
Corte 7	P1.7		Corte 8	P1.8		Corte 9	P1.9	
Vc [m/min]		262,5	Vc [m/min]		225	Vc [m/min]		245,3
Tasa [mm/rev]		0,05	Tasa [mm/rev]		0,025	Tasa [mm/rev]		0,088
	Resultado	Ptje.		Resultado	Ptje.		Resultado	Ptje.
Rugosidad:	0,13	8,72	Rugosidad:	0,13	8,83	Rugosidad:	0,12	9,44
MRR :	3,28	1,59	MRR :	1,41	0,68	MRR :	5,36	2,60
Inserto:		4	Inserto:		5,5	Inserto:		6
Fuerzas:	227,97	7,88	Fuerzas:	179,54	10,00	Fuerzas:	333,78	5,38
Viruta:		5	Viruta:		5	Viruta:		6
Puntaje ponderado:		59	Puntaje ponderado:		63	Puntaje ponderado:		66

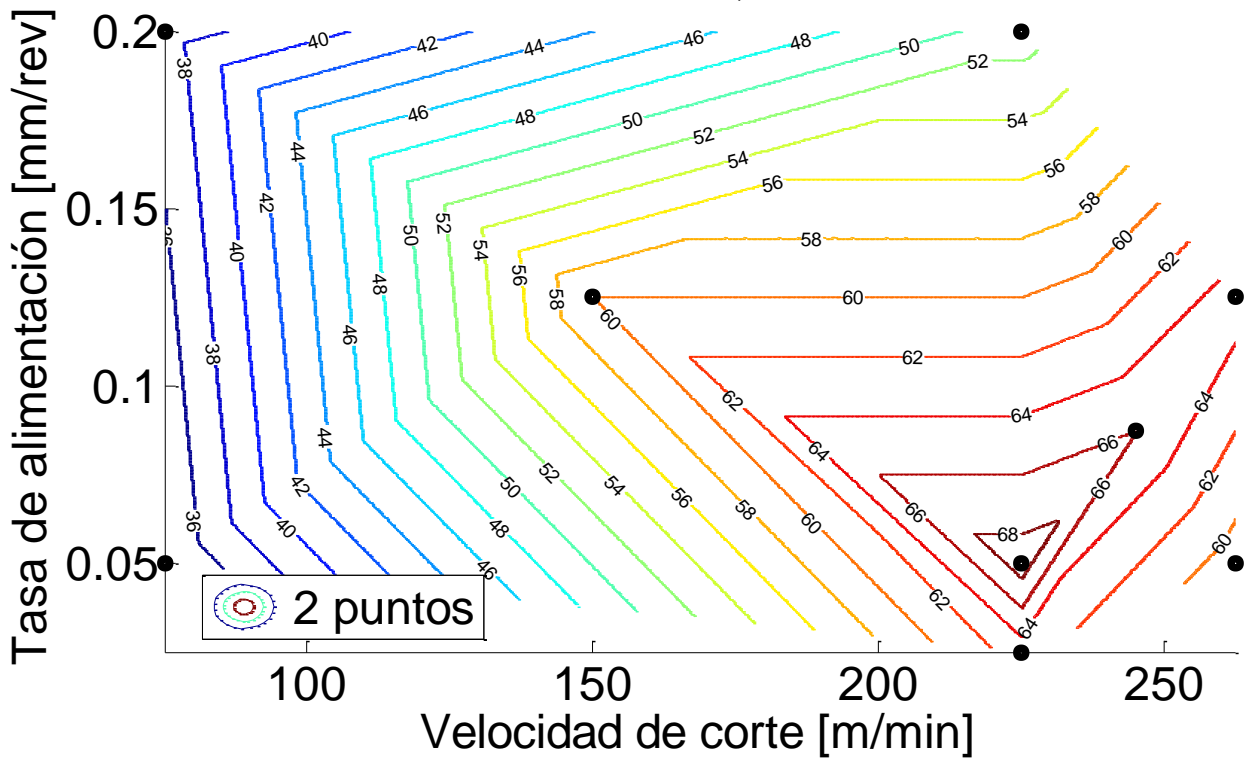


Figura A. 1: Mapa de contorno de la calidad del corte en el material PH13-8Mo. Escala del 1-100.

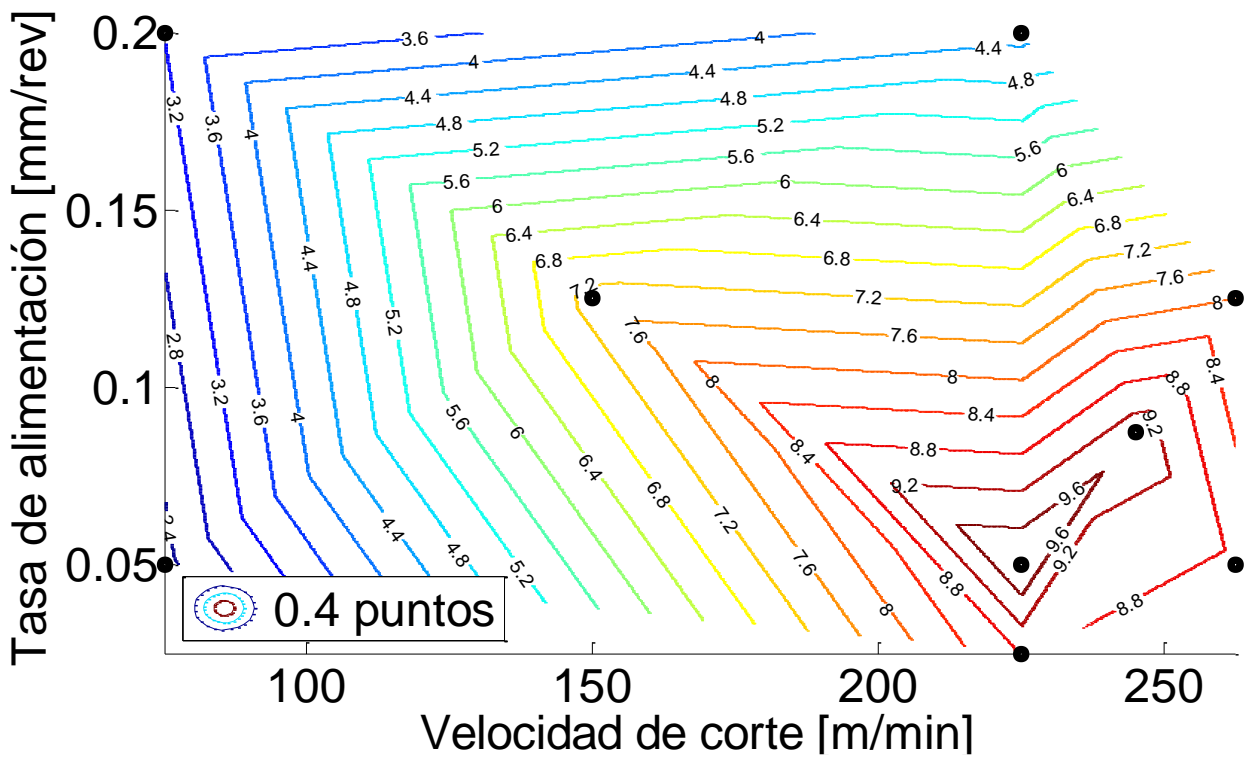


Figura A. 2: Mapa de contorno de la rugosidad en el material PH13-8Mo. Escala del 1-10.

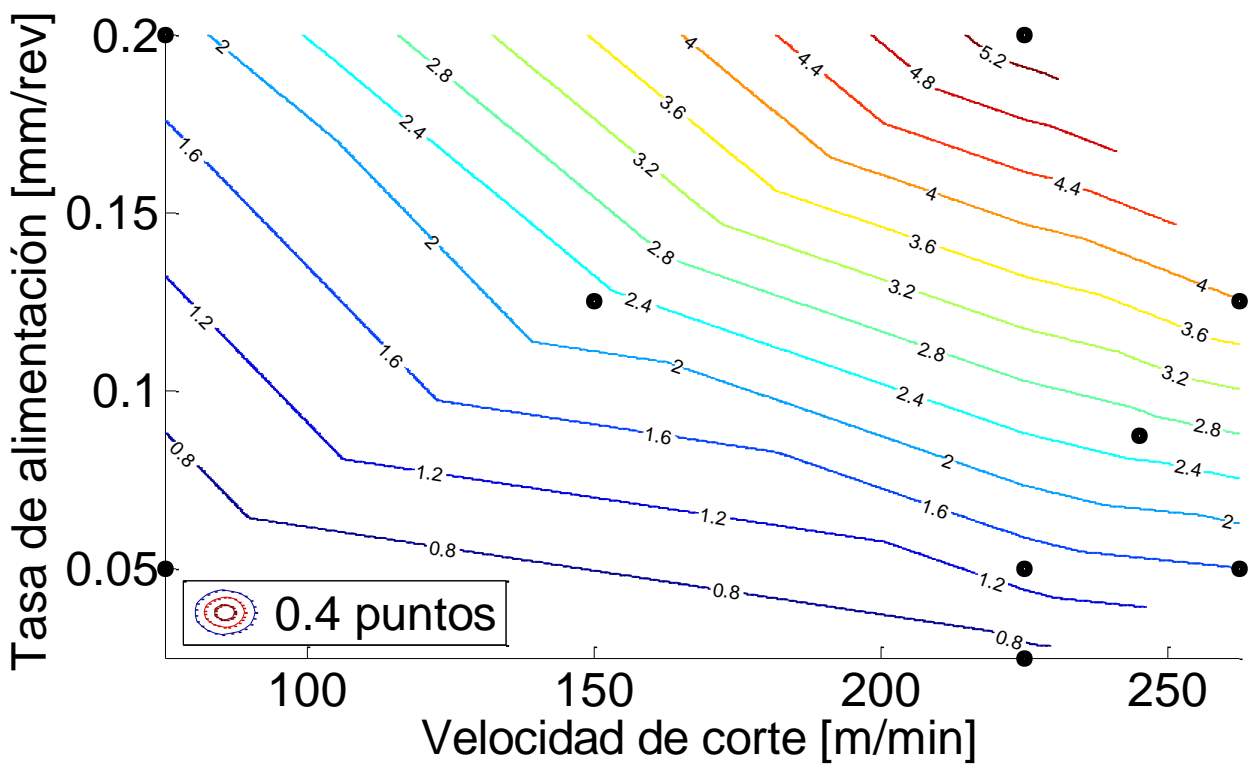


Figura A. 3: Mapa de contorno de la productividad (evaluando el MRR) en el material PH13-8Mo. Escala del 1-10.

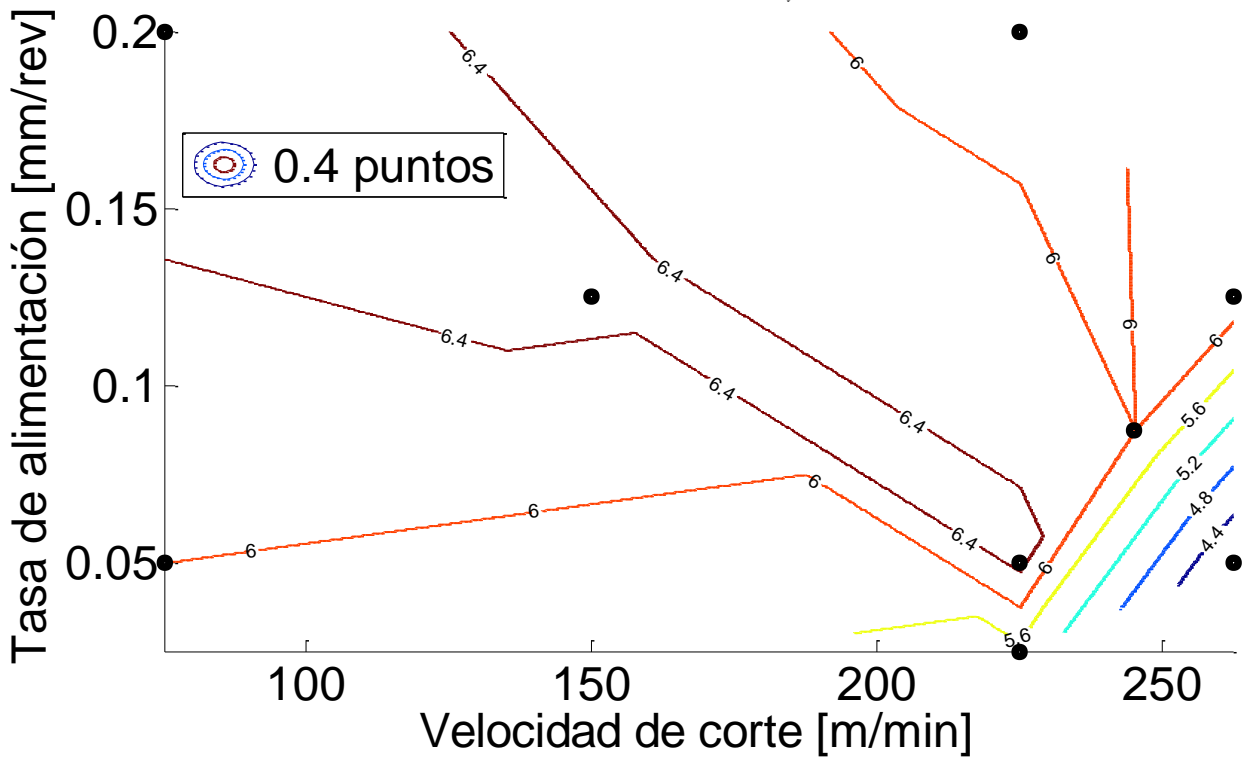


Figura A. 4: Mapa de contorno de la condición del inserto en el material PH13-8Mo. Escala del 1-10.

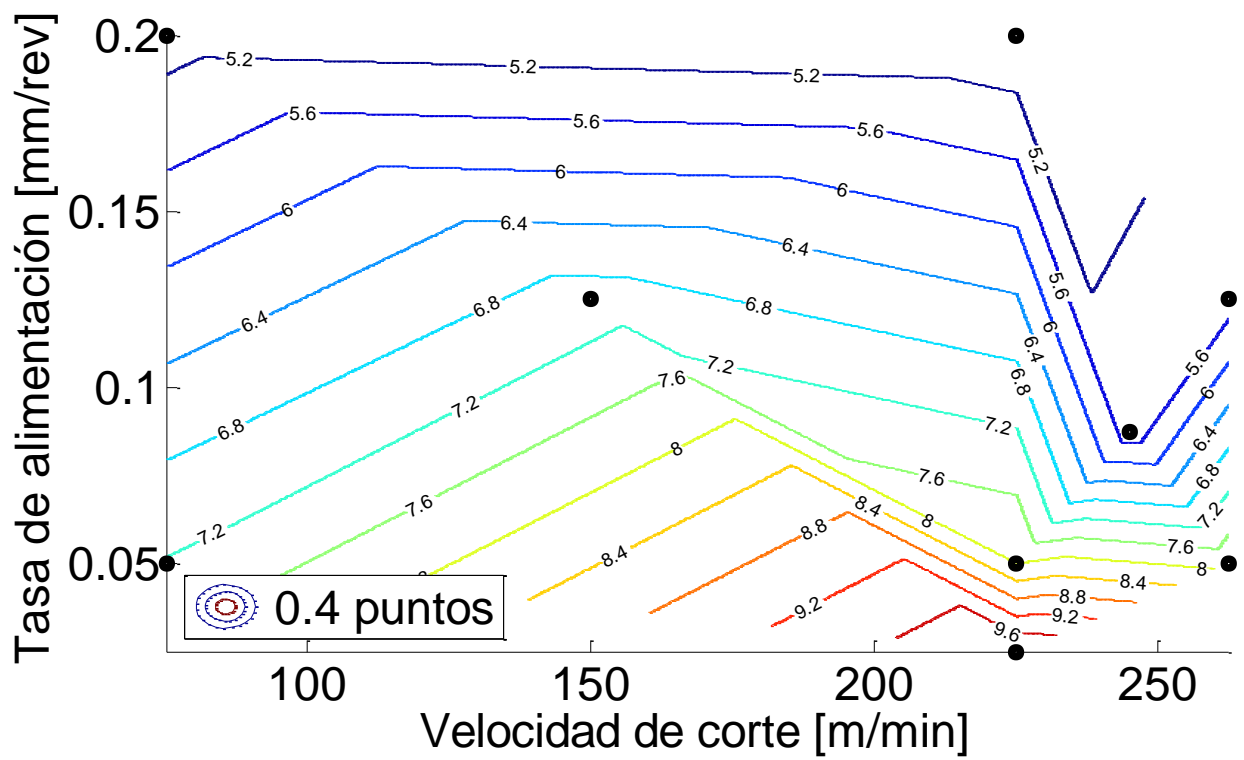


Figura A. 5: Mapa de contorno de las fuerzas en el material PH13-8Mo. Escala del 1-10.

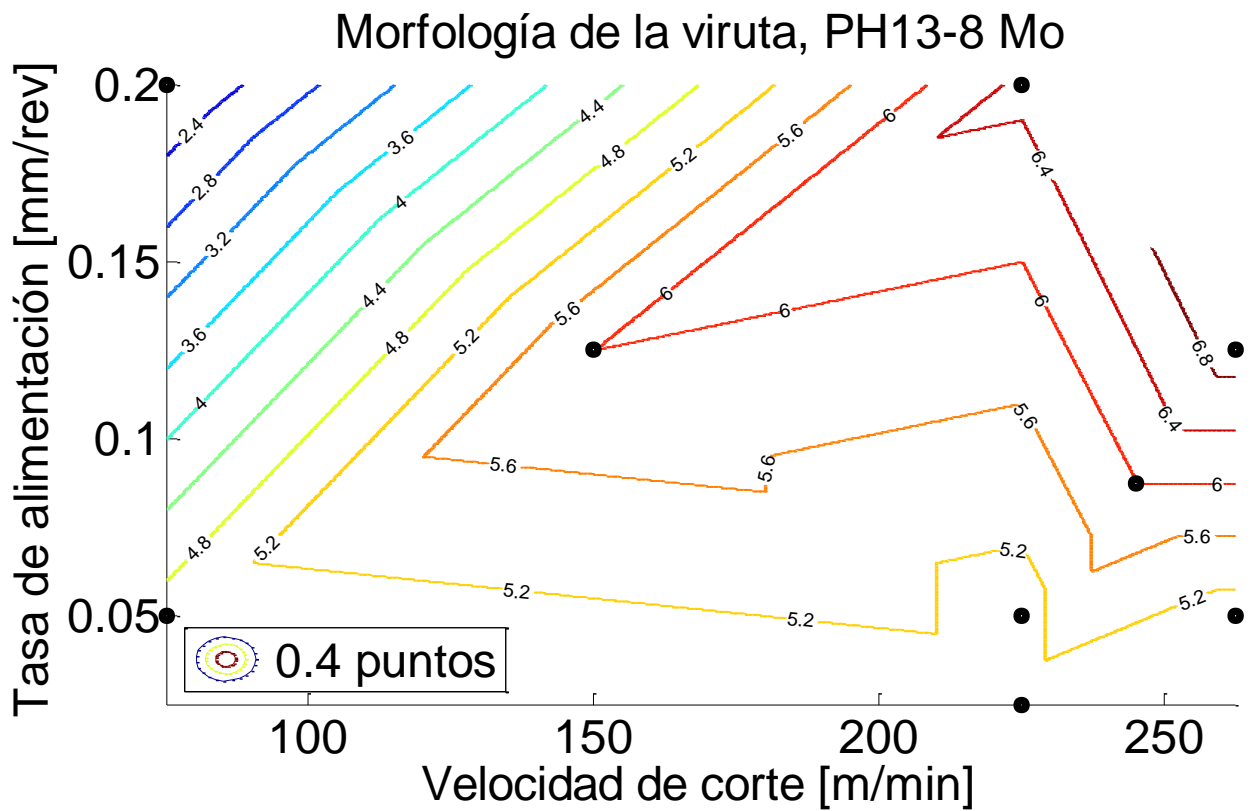


Figura A. 6: Mapa de contorno de la morfología de la viruta en el material PH13-8Mo. Escala del 1-10.

Anexo B: 410, resultados del grupo 3

Tabla B. 1: Parámetros medidos con sus respectivos valores y puntajes. Material 410.

Corte 1	P2.1		Corte 2	P2.2		Corte 3	P2.3	
Vc [m/min]	90		Vc [m/min]	270		Vc [m/min]	270	
Tasa [mm/rev]	0,125		Tasa [mm/rev]	0,05		Tasa [mm/rev]	0,2	
	Resultado	Ptje.		Resultado	Ptje.		Resultado	Ptje.
Rugosidad:	0,38	3,02	Rugosidad:	0,18	6,18	Rugosidad:	0,21	5,48
MRR :	2,81	1,36	MRR :	3,38	1,64	MRR :	13,50	6,55
Inserto:		5	Inserto:		5,3	Inserto:		6,7
Fuerzas:	315,74	5,69	Fuerzas:	193,79	9,26	Fuerzas:	289,09	6,21
Viruta:		2	Viruta:		5,5	Viruta:		2
Puntaje ponderado:		33	Puntaje ponderado:		53	Puntaje ponderado:		57
Corte 4	P2.4		Corte 5	P2.5				
Vc [m/min]	300		Vc [m/min]	330				
Tasa [mm/rev]	0,125		Tasa [mm/rev]	0,25				
	Resultado	Ptje.		Resultado	Ptje.			
Rugosidad:	0,22	5,27	Rugosidad:	0,50	2,27			
MRR :	9,38	4,55	MRR :	20,63	10,00			
Inserto:		5,5	Inserto:		5,7			
Fuerzas:	314,15	5,72	Fuerzas:	308,87	5,81			
Viruta:		2	Viruta:		3,5			
Puntaje ponderado:		49	Puntaje ponderado:		50			

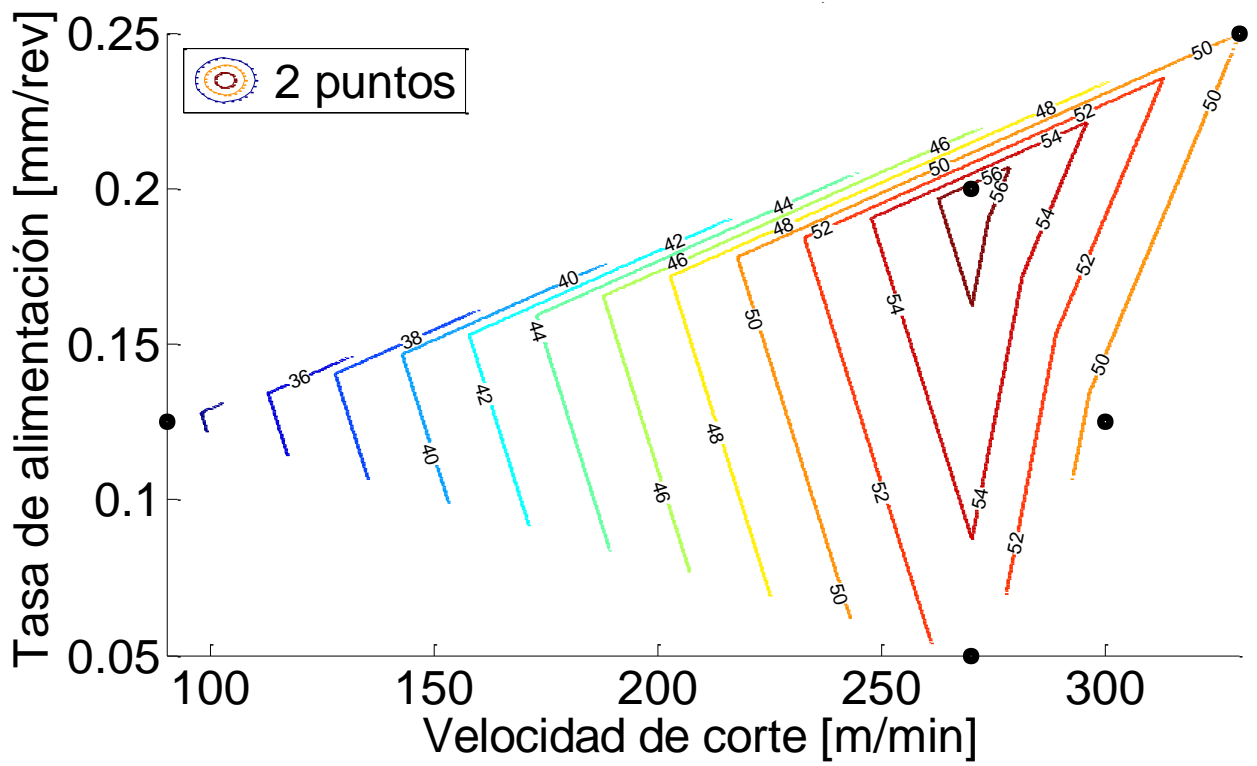


Figura B. 1: Mapa de contorno de la calidad del corte en el material 410. Escala del 1-100.

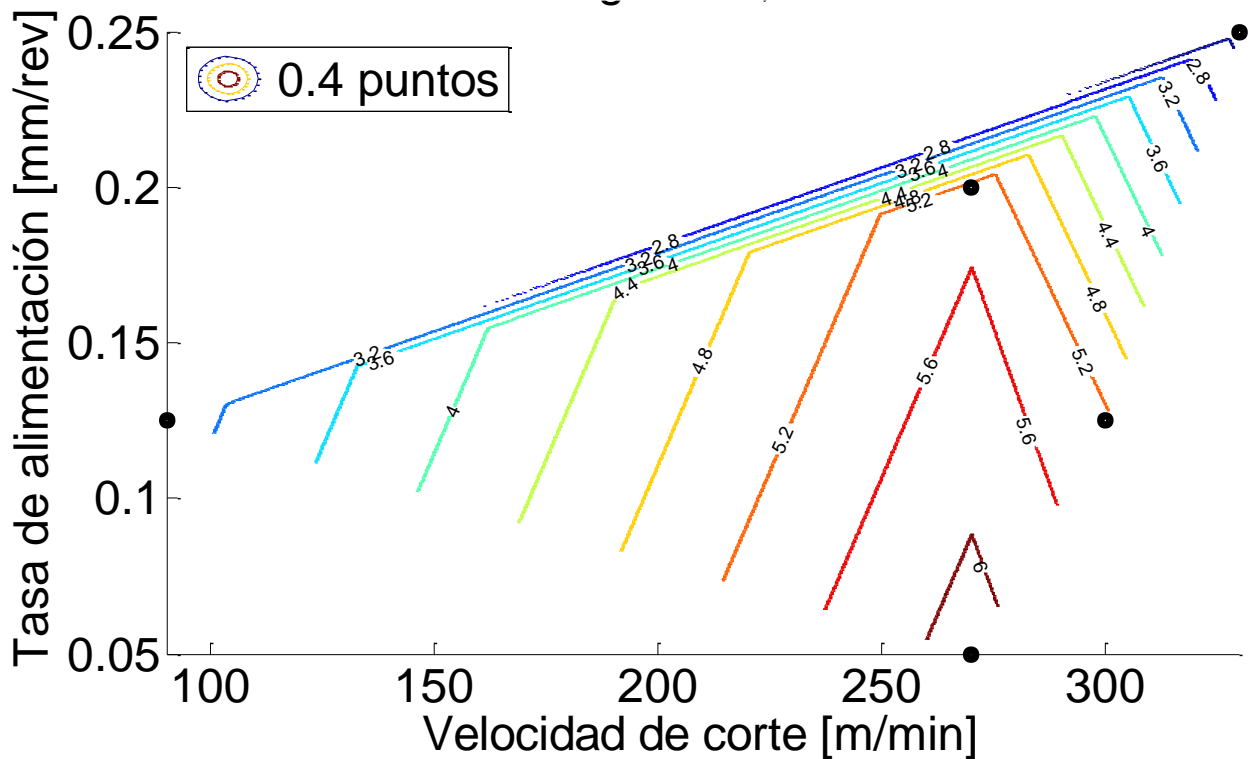


Figura B. 2: Mapa de contorno de la rugosidad en el material 410. Escala del 1-10.

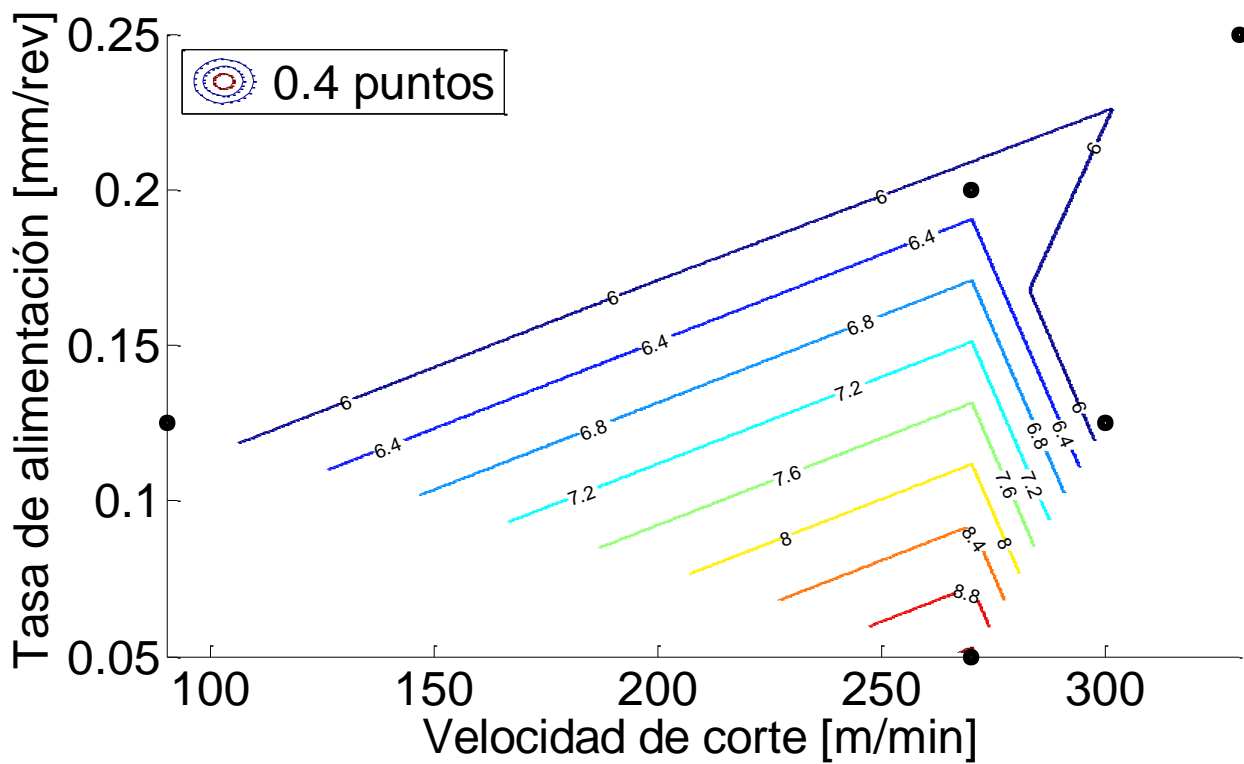


Figura B. 3: Mapa de contorno de las fuerzas en el material 410. Escala del 1-10.

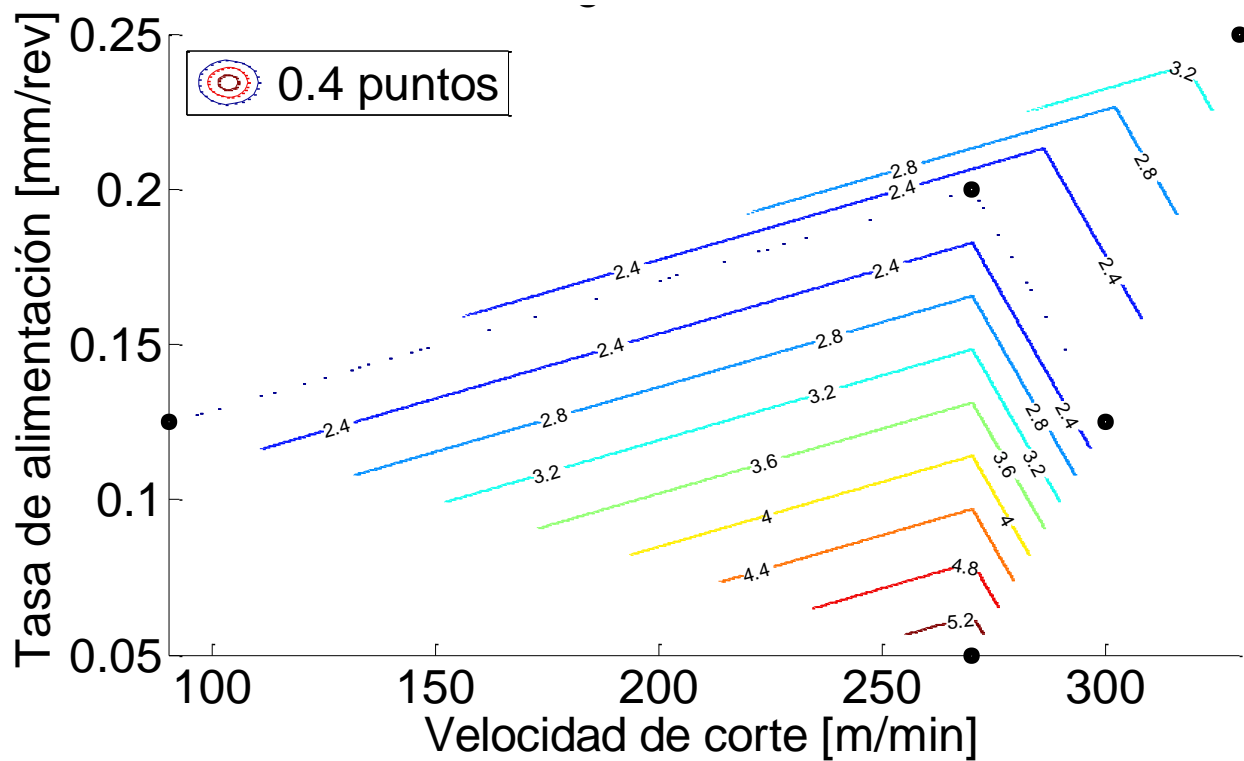


Figura B. 4: Mapa de contorno de la morfología de la viruta en el material 410. Escala del 1-10.

Anexo C: 300M, resultados del grupo 3

Tabla C. 1: Parámetros medidos con sus respectivos valores y puntajes. Material 300M.

Corte 1	P3.1		Corte 2	P3.2		Corte 3	P3.3	
Vc [m/min]	30		Vc [m/min]	90		Vc [m/min]	90	
Tasa [mm/rev]	0,125		Tasa [mm/rev]	0,05		Tasa [mm/rev]	0,2	
	Resultado	Ptje.		Resultado	Ptje.		Resultado	Ptje.
Rugosidad:	0,49	2,31	Rugosidad:	0,18	6,18	Rugosidad:	0,21	5,48
MRR :	0,94	0,45	MRR :	3,38	1,64	MRR :	13,50	6,55
Inserto:		5	Inserto:		5,3	Inserto:		6,7
Fuerzas:	413,98	4,34	Fuerzas:	193,79	9,26	Fuerzas:	289,09	6,21
Viruta:		4,5	Viruta:		7	Viruta:		3
Puntaje ponderado:	29		Puntaje ponderado:	42		Puntaje ponderado:	33	
Corte 4	P3.4		Corte 5	P3.5				
Vc [m/min]	120		Vc [m/min]	150				
Tasa [mm/rev]	0,0875		Tasa [mm/rev]	0,1				
	Resultado	Ptje.		Resultado	Ptje.			
Rugosidad:	0,22	5,27	Rugosidad:	0,50	2,27			
MRR :	9,38	4,55	MRR :	20,63	10,00			
Inserto:		5,5	Inserto:		5,7			
Fuerzas:	314,15	5,72	Fuerzas:	308,87	5,81			
Viruta:		8,5	Viruta:		5,5			
Puntaje ponderado:	43		Puntaje ponderado:	45				

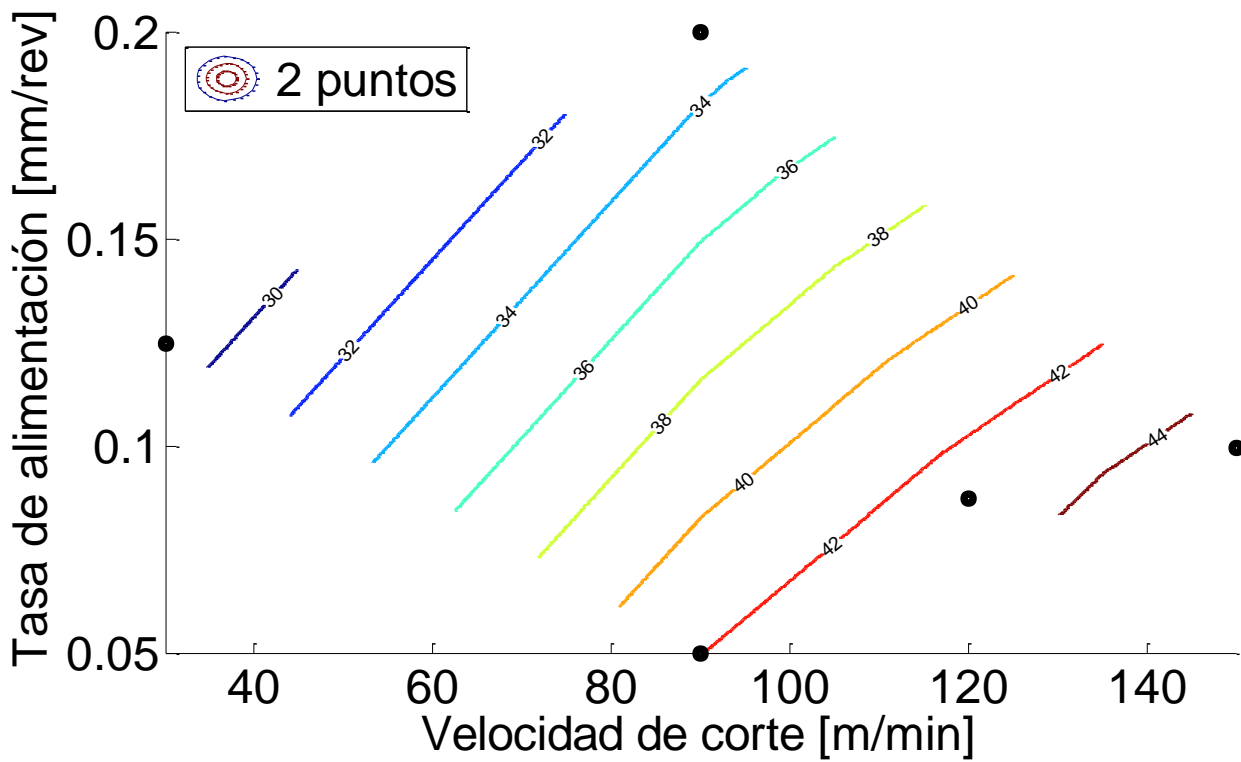


Figura C. 1: Mapa de contorno de la calidad del corte en el material 300M. Escala del 1-100.

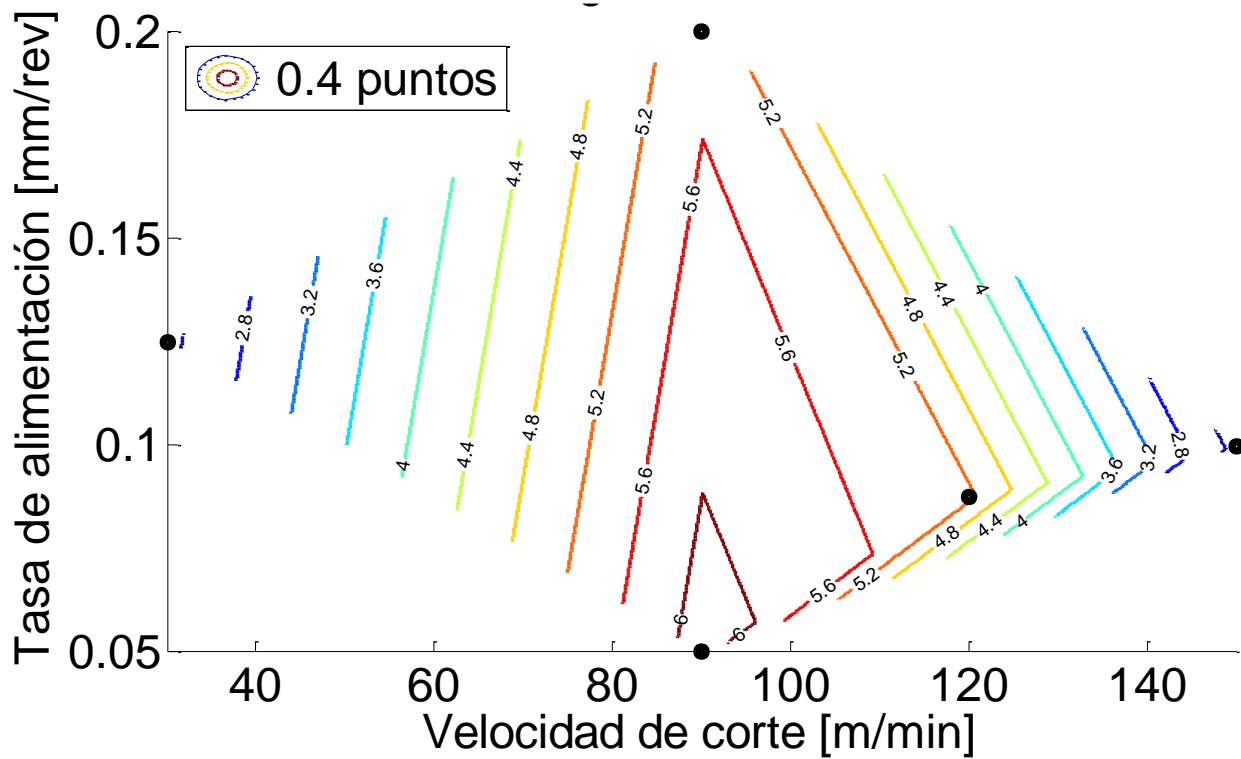


Figura C. 2: Mapa de contorno de la rugosidad en el material 300M. Escala del 1-10.

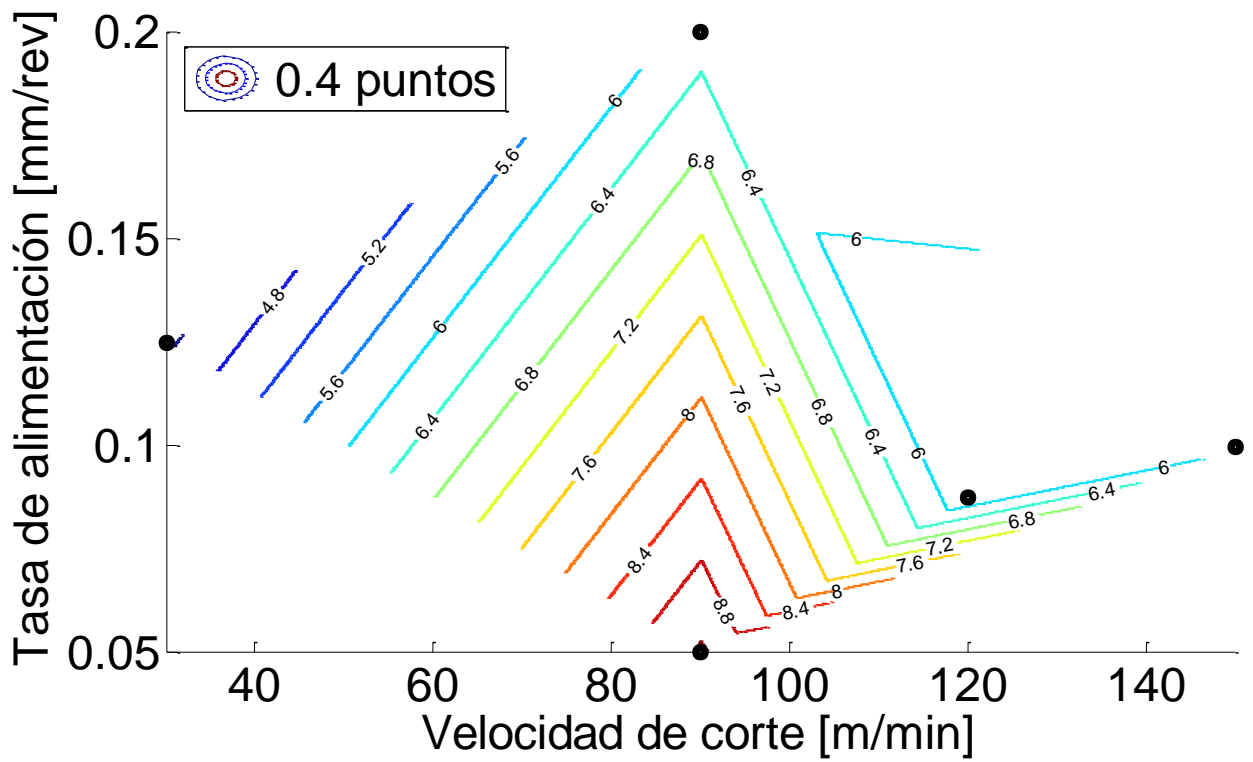


Figura C. 3: Mapa de contorno de las fuerzas en el material 300M. Escala del 1-10.

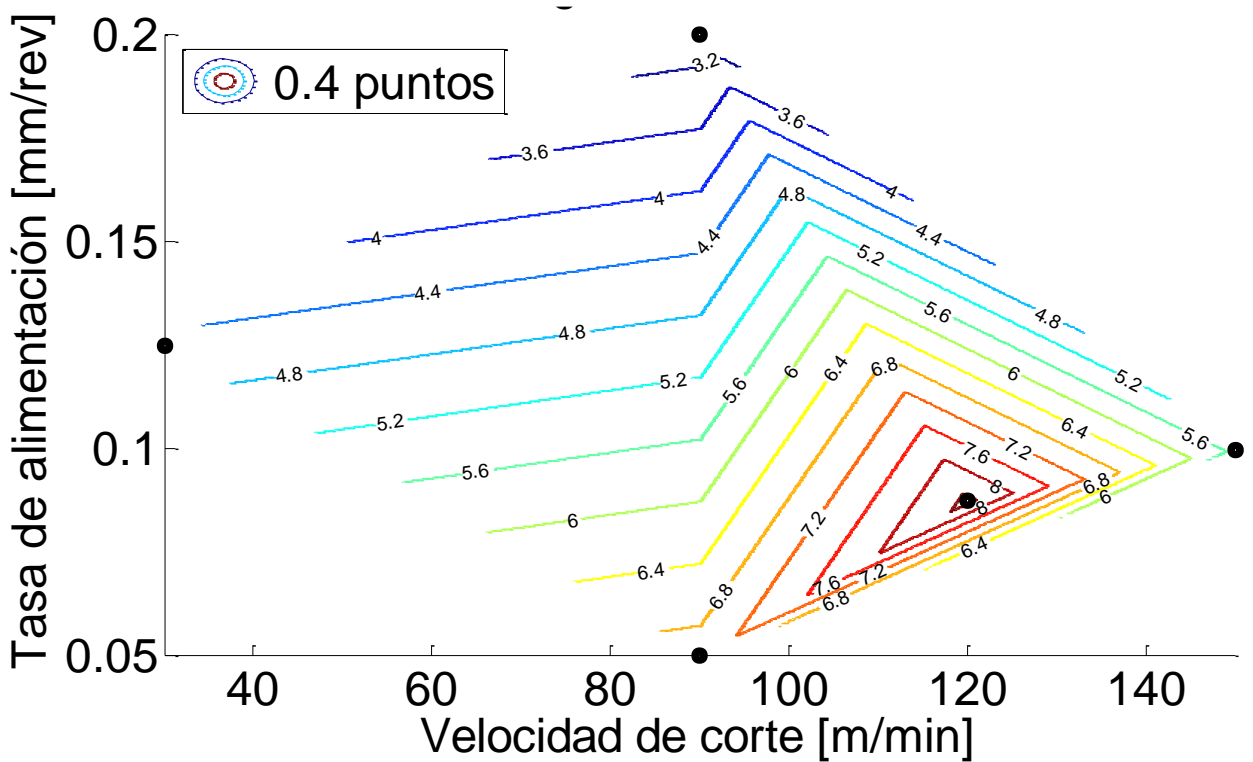


Figura C. 4: Mapa de contorno de la morfología de la viruta en el material 300M. Escala del 1-10.

Anexo D: Valores usados en el modelo de costos

Tabla D. 1: Valores usados en el modelo de costos de insertos.

	300M duro				PH13-8Mo duro		PH13-8Mo blando	410 duro	410 blando
	Acabado				Acabado	Semi-Desbaste	Semi-Desbaste	Acabado	Desbaste
	Carburo	Cermet	CBN seco	CBN refrigerante	Carburo	Carburo	Carburo	Carburo	Carburo
V15 [m/min]	195	100	305	320	305	236	280	395	250
Tasa de alimentación, fr [mm/rev]	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,13	0,13	0,09	0,25
Profundidad de corte d [mm]	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	1,25	1,25	0,25	2,50
MRR [cm ³ /min]	4,27	2,19	6,67	7,00	6,67	36,88	43,75	8,64	156,25
Material removido, V [cm ³]	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Tiempo de corte, T=V/MRR [min]	0,23	0,46	0,15	0,14	0,15	0,03	0,02	0,12	0,01
Vida de la herramienta, TL [min]	15	15	15	15	15	15	15	15	15
Costo de la máquina por hora CPH [£/hr]	2	2	1,50	2	2	2	2	2	2
Costo de mecanizar por minuto MCM [£/minute]	0,04	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
Tiempo de cambio herramienta, TCT [min]	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Porcentaje de tiempo en set-up [%]	25	25	25	25	25	25	25	25	25
Costo básico máquina CBM [£/dm ³]	11,90	23,21	5,32	7,25	7,61	1,38	1,16	5,88	0,32
Costo inserto, CI [£]	1,00	0,91	8,10	8,10	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Número de bordes disponibles NB	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Costo por borde, CB= [£]	0,25	0,23	2,03	2,03	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Costo total herramienta CH [£/dm ³]	3,91	6,91	20,24	19,29	2,50	0,45	0,38	1,93	0,11
Costo operador por hora COH [£/hr]	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Costo operador por min COM [£/min]	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Porcentaje de trabajo efectivo en mecanizar [%]	66	66	66	66	66	66	66	66	66
Costo básico operador CO [£/dm ³]	10,48	20,43	6,70	6,38	6,70	1,21	1,02	5,17	0,29
Costo total de mecanizar, CTM [£/dm ³]	26,29	50,55	32,25	32,92	16,81	3,04	2,56	12,98	0,72

