



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



EVALUACIÓN DE LA RUGOSIDAD SUPERFICIAL EN EL FRESADO CNC DE MOLDES EN ACERO AISI H13

Aldana O. Luis A.

Naguanagua, Mayo de 2011



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



EVALUACIÓN DE LA RUGOSIDAD SUPERFICIAL EN EL FRESADO CNC DE MOLDES EN ACERO AISI H13

*Trabajo especial de grado presentado ante la Ilustre Universidad de Carabobo
para optar al título de Ingeniero Mecánico*

Tutor académico:
MSc. Ing. Juan C. Pereira

Autor:
Aldana O. Luis A.

Naguanagua, Mayo de 2011



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



EVALUACIÓN DE LA RUGOSIDAD SUPERFICIAL EN EL FRESADO CNC DE MOLDES EN ACERO AISI H13

*Trabajo especial de grado presentado ante la Ilustre Universidad de Carabobo
para optar al título de Ingeniero Mecánico*

Aldana O. Luis A.

Naguanagua, Mayo de 2011



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



CERTIFICADO DE APROBACIÓN

Quienes suscriben, Miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica para examinar la Tesis de Pregrado titulada ***“EVALUACIÓN DE LA RUGOSIDAD SUPERFICIAL EN EL FRESADO CNC DE MOLDES EN ACERO AISI H13”***, presentada por el bachiller: **Luis Alejandro Aldana Ochoa**, portador de la Cédula de Identidad N°: **17.398.413**; hacemos constar que hemos revisado y aprobado el mencionado trabajo.

Prof. Tutor, *MSc. Ing. Juan C. Pereira*
Presidente del jurado

Prof. Ing. Franklin Camejo
Miembro del jurado

Prof. Ing. Argel Porrelo
Miembro del jurado

En Naguanagua a los 18 días del mes de Mayo de 2011

Agradecimientos

A Dios, quien me ayudó siempre en la realización de este trabajo de grado.

A la Universidad de Carabobo, por haberme recibido como uno de sus estudiantes.

A los profesores de la Escuela de Ingeniería Mecánica, por haberme impartido sus conocimientos, y haberme formado como profesional.

A mi tutor, profesor Juan Carlos Pereira, quien me guió en la realización de este trabajo de grado.

Dedicatoria

A Dios, quien me permitió lograr esta meta tan importante, y por todos los regalos maravillosos que me ha dado en la vida.

A mis padres, por todos sus importantes consejos de vida, y quienes sin su valiosa ayuda y sacrificio, no hubiese realizado este trabajo.

A mis hermanos, por su amistad, su comprensión y por la prioridad que siempre le han otorgado a mis metas.

A mi novia, Alix Castro, por todo su amor, su cariño, su apoyo incondicional, su comprensión y todo su ánimo especialmente en los momentos difíciles.

Luis Alejandro Aldana Ochoa

Resumen

El presente trabajo trata sobre el estudio de la influencia de los parámetros de corte, sobre la rugosidad superficial, en el proceso de fresado CNC de moldes en acero AISI H13, sin la utilización de fluido refrigerante para corte; partiendo de mediciones experimentales de la rugosidad superficial obtenida en las caras de los moldes, que fueron tomadas mediante el uso de un rugosímetro digital. También se trabajó con un software de adquisición de datos, que permitió obtener el perfil de la rugosidad en la longitud medida. Las herramientas utilizadas fueron insertos de carburo de tungsteno revestidos de punta esférica, las cuales llevaron a cabo el proceso de mecanizado de los moldes en un centro de mecanizado CNC vertical, de tres ejes. Para el análisis de los resultados obtenidos de rugosidad, se realizó un estudio de análisis de varianza multifactorial (ANOVA) que permitió obtener la influencia que tiene cada variable de estudio (avance, profundidad, y velocidad de corte) en la rugosidad, así como la influencia de la interacción de dichas variables. También se analizaron los parámetros gráficos de los perfiles de rugosidad obtenidos para cada molde. Se determinó que la rugosidad superficial obtenida para el mecanizado de moldes está influenciada notoriamente por el avance, y en menor medida por el avance y la velocidad de corte. También se pudieron observar fallas como inclusiones, así como las ondulaciones, a través de los perfiles obtenidos.

Palabras clave: AISI H13, rugosidad superficial, moldes, fresado, CNC.

Índice general

Índice general	viii	
Índice de figuras	xi	
Índice de tablas	xiii	
Simbología	xv	
CAPÍTULO 1	Introducción	1
1.1	Introducción	1
1.2	Situación problemática	2
1.3	Objetivos	2
1.3.1	<i>Objetivo General</i>	2
1.3.2	<i>Objetivos Específicos</i>	3
1.4	Justificación	3
1.5	Alcance	4
1.6	Limitaciones	4
1.7	Antecedentes	4
CAPÍTULO 2	Marco Teórico	7
2.1	Fresado	7
2.2	Operaciones de fresado	7
2.3	Fresado de cavidades	8
2.4	Centro de mecanizado CNC	9
2.5	La fresa y su funcionamiento	10
2.6	Acero AISI H13	10
2.7	Rugosidad superficial	11

2.8 Perfil de rugosidad	14
2.9 Cresta (o pico) local de perfil	15
2.10 Valle local de perfil	15
2.11 Cresta o pico de perfil	15
2.12 Valle de perfil	16
2.13 Altura de una cresta (o pico) de perfil	16
2.14 Profundidad de un valle de perfil	17
2.15 Altura de una irregularidad de perfil	17
2.16 Paso de las irregularidades de perfil	18
2.17 Parámetros en la medición de rugosidad	18
CAPÍTULO 3 Metodología	21
3.1 Nivel de la investigación	21
3.2 Material empleado para los moldes	22
3.2.1 Cantidad de material	23
3.2.2 Cantidad de moldes	23
3.3 Máquina utilizada e instrumentos de recolección de datos	24
3.3.1 Centro de mecanizado vertical CNC de tres ejes	24
3.3.2 Rugosímetro	26
3.4 Herramientas y parámetros de corte	28
3.4.1 Herramienta de corte	28
3.4.2 Parámetros de corte	29
3.5 Técnica de recolección de data	29
3.5.1 Diseño de moldes	29
3.5.2 Creación de código CNC para el mecanizado	30
3.5.3 Medición de rugosidad	32
CAPÍTULO 4 Resultados obtenidos y discusión	35
4.1 Resultados de la selección del material	35
4.2 Resultados de la selección de la herramienta	36
4.3 Resultados de la selección de los parámetros de corte	39
4.4 Código CNC de la pasada de acabado de los moldes	40
4.5 Resultado del mecanizado del acero AISI H13	42
4.6 Valores de rugosidad obtenidos	45
4.7 Resultados de los valores de rugosidad aritmética Ra (μm) obtenidos por cada molde	48
4.8 Resultados de los perfiles de rugosidad aritmética Ra (μm) obtenidos por cada molde	51
4.9 Resultados del análisis de varianza (ANOVA) a las muestras de rugosidad obtenidas	53
4.10 Influencia del avance de la herramienta en la rugosidad aritmética promedio (Ra)	55
4.11 Influencia de la profundidad de corte de la herramienta en la rugosidad aritmética promedio (Ra)	57
4.12 Influencia de la velocidad de corte de la herramienta en	59

la rugosidad aritmética promedio (Ra)	
4.13 Análisis de los parámetros gráficos de los perfiles de rugosidad obtenidos	60
CAPÍTULO 5 Conclusiones y recomendaciones	63
5.1 Conclusiones	63
5.2 Recomendaciones	64
Referencias bibliográficas	65
Anexos	69
Anexo 1. Propiedades mecánicas del AISI H13	70
Anexo 2. Certificado de calidad del AISI H13	73
Anexo 3. Modelos de códigos CNC del mecanizado de acabado	75
Anexo 4. Perfiles de rugosidades obtenidos	89

Índice de figuras

Figura	Pág.
2.1 a) Fresado cilíndrico b) Fresado Frontal	8
2.2 Inserto para cavidades	8
2.3 Centro de mecanizado vertical CNC	9
2.4 a) Fresa de corte frontal b) Fresa de contornos y cavidades	10
2.5 Ejemplificación de a) ondulación, b) rugosidad y c) combinación de ellas	12
2.6 Rugosidad aritmética Ra, medida en una longitud l, con referencia en la superficie ideal m	13
2.7 Profundidad media de la rugosidad	14
2.8 Perfil de rugosidad	14
2.9 Cresta local de perfil	15
2.10 Valle local de perfil	15
2.11 Cresta de perfil	16
2.12 Valle de perfil	16
2.13 Altura de una cresta de perfil	17
2.14 Profundidad de un valle de perfil	17
2.15 Altura de una irregularidad de perfil	18
2.16 Paso de las irregularidades de perfil	18
3.1 Flujograma de las actividades a realizar	22
3.2 Centro de mecanizado CNC Victor/Taichung modelo Vcenter 102	25
3.3 Tablero de control del centro de mecanizado CNC Victor/Taichung, modelo Vcenter 102	25
3.4 Rugosímetro SJ-201P	27
3.5 Moldes en plancha de acero AISI H13 en solidwork®	30

3.6 Moldes en software Mastercam X4®	31
3.7 Simulación de mecanizado en software Mastercam X4®	31
3.8 Distribución y nomenclatura de las caras del molde	32
3.9 Montaje para la medición de rugosidad	33
3.10 Montaje para la medición de rugosidad	33
3.11 Software de recepción de datos Surftest SJ201®	33
4.1 Variables del inserto EB100A07-4T06	37
4.2 Inserto EB100A07-4T06	38
4.3 Vástago porta-inserto MM S-A-L075-C10-T06	38
4.4 Llave de ajuste inserto-vástago ISCAR 4268745	39
4.5 Material después de la operación de planeado	43
4.6 Molde M2 en proceso de mecanizado	43
4.7 Molde M16 en proceso de mecanizado	44
4.8 Moldes mecanizados	44
4.9 Rugosidad obtenida para un avance de 0,07 mm/dte y combinaciones de Vc y d	49
4.10 Rugosidad obtenida para un avance de 0,09 mm/dte y combinaciones de Vc y d	50
4.11 Rugosidad obtenida para un avance de 0,11 mm/dte y combinaciones de Vc y d	50
4.12 Perfiles obtenidos para una profundidad de 0,3 mm (d1)	51
4.13 Perfiles obtenidos para una profundidad de 0,6 mm (d2)	52
4.14 Perfiles obtenidos para una profundidad de 0,9 mm (d3)	52
4.15 Contribución de las variables de estudio en la rugosidad Ra	55
4.16 Influencia del avance sobre la rugosidad superficial, en el fresado CNC con insertos de punta esférica. a) Avance alto b) Avance bajo	56
4.17 Comportamiento de la rugosidad aritmética promedio en función del avance, profundidad y velocidad de corte	57
4.18 Influencia de la profundidad de corte sobre la rugosidad superficial, en el fresado CNC con insertos de punta esférica. a) Avance alto b) Avance bajo	58

Índice de tablas

Tabla	Pág.
3.1 Combinaciones de parámetros	24
3.2 Especificaciones técnicas del centro de mecanizado CNC Victor/Taichung, modelo Vcenter 102	26
3.3 Especificaciones del rugosímetro SJ-201P	28
3.4 Longitud de muestras estándar y de evaluación para medidas de Ra según norma ISO	28
4.1 Especificaciones mecánicas del AISI H13	36
4.2 Porcentaje de la composición química del AISI H13	36
4.3 Nomenclatura del AISI H13 según las normas de los distintos países	36
4.4 Especificaciones del inserto EB100A07-4T06	37
4.5 Especificaciones del revestimiento IC908 del inserto EB100A07- 4T06	38
4.6 Parámetros de corte (Avances)	39
4.7 Parámetros de corte (Velocidades de corte)	39
4.8 Parámetros de corte (Profundidades de corte)	40
4.9.a Rugosidad obtenida en el los moldes	45
4.9.b Rugosidad obtenida en el los moldes (continuación)	46
4.9.c Rugosidad obtenida en el los moldes (continuación)	47
4.9.d Rugosidad obtenida en el los moldes (continuación)	48
4.10 Rugosidad aritmética promedio Ra (μm) obtenidas para las distintas combinaciones/moldes	49
4.11 Factores inter-sujetos empleados para el análisis de varianza multifactorial	54
4.12 Resultados del análisis de varianza multifactorial	54

Simbología

Variable	Descripción	Unidad
λ	Cutoff	mm
Ap	Profundidad de corte máxima del inserto	mm
d	Profundidad de corte	mm
D	Diámetro del inserto/fresa	mm
Des	Diámetro del inserto	mm
f	Avance (por diente)	mm/dte
E	Módulo de elasticidad	GPa
l	Longitud de evaluación	mm
l_i	Longitud del inserto	mm
m	Superficie ideal o de referencia	-----
l_n	Longitud de ensayo	mm
n	Número de longitudes de muestra	-----
P	Porcentaje de contribución	%
R	Radio del inserto	mm
Ra	Rugosidad aritmética	(μm)
Rq	Rugosidad media cuadrática	(μm)
Rz	Profundidad media de la rugosidad	(μm)
Sy	Esfuerzo de fluencia	MPa
Su	Esfuerzo Último	MPa
Tol	Tolerancia del diámetro del inserto	mm
Ts	Tipo de rosca del inserto	-----
Vc	Velocidad de corte	m/min
$Z_{(x)}$	Expresión de la altura del perfil en función de la longitud de evaluación	mm

CAPÍTULO 1

Introducción

1.1 Introducción

El mecanizado es el proceso de manufactura que determina frecuentemente la geometría final y las dimensiones de la parte, así como la textura de la superficie. (Groover, 1998). Tanto la rugosidad superficial como las tolerancias son los parámetros críticos evaluados en el control de calidad del proceso productivo de muchas de las piezas mecanizadas. (Kalpakjian y Schmidt, 2003). Esto es debido a que la rugosidad superficial afecta varios atributos funcionales, como la fricción de contacto, reflexión de la luz, transferencia de calor, habilidad de distribuir y mantener el lubricante, aislante, o resistencia a la fatiga, entre otros.

En la actualidad, el acero AISI H13 es muy utilizado en la fabricación de moldes. A estos moldes y a su superficie se les exigen un alto grado de acabado. En este trabajo, se presenta el estudio de la rugosidad superficial en el fresado CNC sin refrigerante en el mecanizado de moldes, sometidas a valores moderados de velocidad de rotación, avance y profundidad de corte de la herramienta.

1.2 Situación problemática

El acabado superficial es significativamente importante para la calidad y productividad de las distintas piezas que se mecanizan y los productos que de ellos dependen, tal es el caso de los moldes, y la influencia que tiene la rugosidad superficial de dichos moldes en el acabado superficial de las piezas que en estos serán fabricados. Es por ello que resulta importante conocer qué variables influyen en la rugosidad superficial de los moldes al momento de ser mecanizados, ya que existen muy pocos estudios previos, específicamente en esta área.

Actualmente existe una gran demanda de moldes, (fabricación o mantenimiento) donde la rugosidad superficial que se le da al molde proviene de métodos empíricos, y mayormente del ensayo y error, obteniéndose pérdidas de tiempo, dinero y productividad para hallar los parámetros adecuados necesarios que permitan el buen acabado superficial del molde. Si esto continuase, se seguirán obteniendo pérdidas por la utilización de procesos de mecanizado posteriores para mejorar el acabado, llegando a ser una experiencia tediosa al trabajar en esta área e incrementándose los costos de producción o fabricación de moldes.

Por esto, resulta importante responder a la pregunta: ¿Cuáles son los parámetros que influyen en la rugosidad superficial al fabricar moldes en acero AISI H13, utilizando un centro de mecanizado CNC?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Evaluar la rugosidad superficial en el fresado CNC de moldes en acero AISI H13.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Estudiar la influencia del avance de la herramienta de corte en el molde, mecanizado con velocidad de giro de herramienta y profundidad de corte constante y avance variable.
- Evaluar la influencia de la profundidad de corte de la herramienta en el molde, mecanizado con velocidad de giro de herramienta y avance constante y profundidad de corte de la herramienta variable.
- Evaluar la influencia de la velocidad de corte en el molde, mecanizado con avance y profundidad de corte constante y velocidad de giro de herramienta variable.
- Analizar los parámetros gráficos de comportamiento, en el perfil de rugosidad en la longitud medida.

1.4 Justificación

Con la realización de esta investigación, se espera proporcionar la información necesaria para optimizar la fabricación o mantenimiento de moldes a la industria fabricante o aquella que utilice los moldes para su producción, y que periódicamente necesiten mantenimiento; así como también se espera que esta investigación les sea de ayuda a los próximos investigadores que quieran desarrollarse en esta área.

Con la finalización de esta investigación se aspira evaluar la rugosidad superficial en el fresado CNC de moldes en acero AISI H13; conocer qué parámetros de corte influyen en la rugosidad y saber cuál de ellos resultará el más predominante, para luego proponer la mejor combinación de dichos parámetros a utilizar en el mecanizado.

1.5 Alcance

Sólo se estudiará la influencia de los parámetros de corte del mecanizado en la rugosidad superficial del material a ensayar (molde).

No se estudiará la influencia de la geometría del molde, ni el tipo de éste en la rugosidad.

La rugosidad se medirá de manera lineal mediante un rugosímetro digital con palpador tipo stylus.

1.6 Limitaciones

Disponibilidad del laboratorio de materiales, para realizar las mediciones de rugosidad.

Dificultad de adquirir el software para obtener el comportamiento gráfico del perfil de rugosidad medido.

Disponibilidad por parte de la empresa encargada de mecanizar el molde, de efectuar el mecanizado.

Alto precio de mano de obra para mecanizado de moldes.

1.7 Antecedentes

A través de los años se han realizado varios estudios de la rugosidad superficial, pero la gran mayoría de estos, han sido elaboración de modelos matemáticos, y algunos otros estudios experimentales, en donde la mayoría de estos se realizaron utilizando el torneado como proceso de mecanizado para obtener el acabado superficial a evaluar, sin embargo se han realizados estudios sobre la rugosidad en fresado, que se señalan a continuación:

En 1999, Lou et al. estudiaron la rugosidad superficial, proponiendo primeramente, un modelo matemático el cual denominaron: modelo de regresión múltiple, en donde obtuvieron o estimaron valores de rugosidad teóricos. Para comprobar estos valores utilizaron un centro de mecanizado CNC, para generar una superficie de estudio, y determinaron la rugosidad superficial en aluminio, su material a estudiar, específicamente en fresado frontal. Con esto determinaron de manera analítica y experimental, la rugosidad en dicho mecanizado, variando ciertos parámetros de corte como avance, profundidad de corte y velocidad angular de la herramienta, permitiéndoles comparar el valor de la rugosidad obtenida experimentalmente y la predicha por medio del modelo matemático propuesto, obteniendo aproximadamente un 90% de precisión.

En 2002, Bernardos y Vosniakos, estructuran un modelo para la predicción de la rugosidad superficial en operaciones de fresado empleando redes neuronales y el método Taguchi. Los resultados muestran que la tasa de alimentación por diente del cortador, el fluido para corte, la profundidad y la herramienta de corte son los factores que más afecta la rugosidad superficial de la pieza de trabajo.

En 2006, Kallewaard et al. publicaron un estudio sobre una serie de modelos que permiten la predicción de la rugosidad superficial en procesos de mecanizado con arranque de viruta, presentando modelos analíticos haciendo referencia de que algunos de los modelos desarrollados analíticamente se basan en la geometría de la pieza, geometría de la herramienta de corte y tomando en consideración aspectos al mecanizar como lo son la excentricidad de corte o "Cutter Runout" que es un fenómeno común que afecta el corte en operaciones del fresado y/o algoritmos computacionales que representan la superficie a estudiar. También expusieron modelos que examinan los efectos de varios factores a través de la ejecución de experimentos y análisis de resultados donde se realiza el análisis de factores como la evolución de los

esfuerzos residuales, microestructura, microdureza y la rugosidad, en relación con los diferentes parámetros de corte en el fresado.

En 2008, Saad y Abbas, predijeron la rugosidad superficial en un acero al carbono AISI 1020 utilizando el modelo de regresión múltiple, años atrás propuesto, en el cual, similarmente compararon los valores de rugosidad obtenidos mediante el modelo matemático, con los obtenidos experimentalmente mediante la lectura de un rugosímetro, en muestras mecanizadas en un centro de mecanizado CNC.

En 2009, Rashid et al. presentaron una investigación el cual también desarrollaron un modelo matemático para la predicción de rugosidad superficial para el aluminio antes del proceso de fabricación. Este modelo, determina la correlación entre el criterio de una variable, y una combinación de variables independientes. Para comprobar su modelo, utilizaron 84 muestras, que fueron estudiadas mediante el uso de un centro de mecanizado CNC, y los especímenes establecieron que la rugosidad superficial está más influenciada por la velocidad de avance. Igualmente discutieron sobre los modelos realizados a través de las técnicas de diseño de experimentos (DOE: Desarrollo de experimentos, por sus siglas en inglés) que resultó una poderosa herramienta que permitió analizar la influencia de ciertas variables del proceso sobre otras variables específicas) así como también los modelos desarrollados utilizando la inteligencia artificial.

CAPÍTULO 2

Marco Teórico

2.1 Fresado

El fresado es un proceso de fabricación por arranque de viruta en el cual se desprende material debido a una herramienta giratoria que posee dientes o superficies cortantes. Este tipo de mecanizado puede generar casi cualquier tipo de geometrías, desde superficies planas hasta superficies curvas complejas. La máquina-herramienta utilizada para este tipo de mecanizado se denomina comúnmente fresadora o centro de mecanizado.

2.2 Operaciones de fresado

Existen dos tipos de fresado convencional, según la orientación del eje de rotación de la fresa, **el fresado cilíndrico o tangencial** que es cuando el eje de rotación de la fresa es paralelo a la superficie de trabajo que se está mecanizando y la operación se realiza por los bordes cortantes en la periferia del exterior de la herramienta de corte; y **el fresado frontal** que es cuando el eje de la fresa es perpendicular a la superficie de la pieza y el mecanizado se ejecuta por los filos cortantes del extremo y la periferia de la fresa. Estos tipos de fresado pueden apreciarse en la figura 2.1.

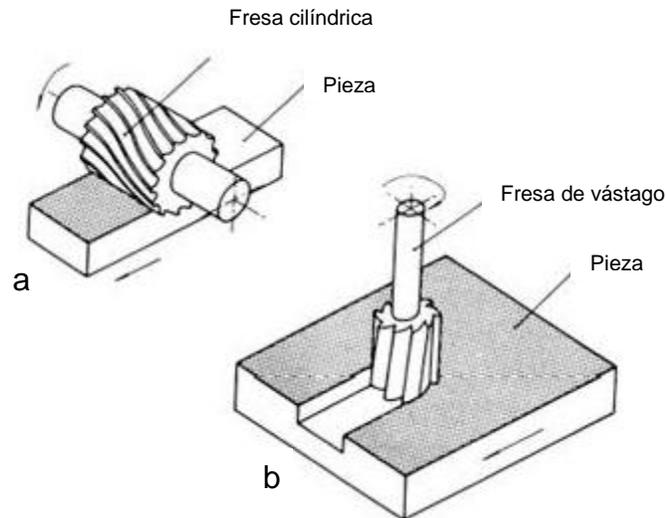


Figura 2.1: a) Fresado Cilíndrico b) Fresado Frontal

Fuente: <http://www.monografías.com> (consultado en línea)

2.3 Fresado de cavidades

Es otro tipo de fresado, en el cual se generan cavidades de distintas geometrías, con la utilización de fresas planas o esféricas, como el mostrado en la figura 2.2; quedando la geometría de la cavidad a disposición de la combinación de la forma de la herramienta, y los movimientos de la misma sobre el material.



Figura 2.2: Inserto para cavidades

Fuente: <http://www.directindustry.es> (consultado en línea)

2.4 Centro de mecanizado CNC

Un centro de mecanizado es una máquina altamente automatizada capaz de realizar múltiples operaciones de maquinado en una instalación bajo CNC (control numérico computarizado) con la mínima intervención humana. Las operaciones típicas son aquellas que usan herramientas de corte rotatorio como fresas y brocas. Comparando este sistema de mecanizado con los sistemas tradicionales, se destacan la velocidad de producción como ventaja y los altos costos como desventaja. Existen centros de mecanizado de una gran variedad de tamaños, tipos, funciones y grados de automatización, como el mostrado en la figura 2.3; sus costos están comprendidos en el rango de 50000 hasta 1 millón de dólares o más. Sus potencias nominales llegan a 75kW y las velocidades de husillo de las máquinas mas usadas tienen límites de 4000-8000 RPM, aunque para aplicaciones especiales pueden llegar a 75000 RPM. Algunas mesas inclinables son capaces de soportar piezas de más de 7000kg de peso.



Figura 2.3: Centro de mecanizado vertical CNC

Fuente: <http://img.directindustry.es> (consultado en línea)

2.5 La fresa y su funcionamiento

La herramienta de corte en fresado se llama fresa o cortador para fresadora y los bordes cortantes de la misma se llaman dientes. La fresa gira dando el movimiento principal de corte, los dientes de fresa entran y salen del material de trabajo durante cada revolución o vuelta, esto interrumpe la acción de corte y sujeta los dientes a un ciclo de fuerzas de impacto y choque térmico en cada rotación. Algunas de las diferentes fresas se muestran en la figura 2.4.

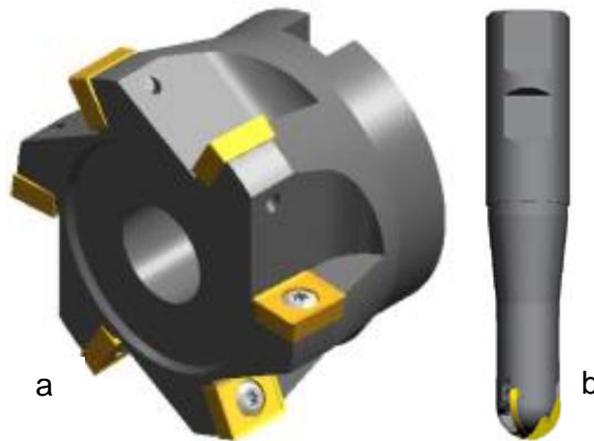


Figura 2.4: a) Fresa de corte frontal b) Fresa de contornos y cavidades

Fuente: Catálogo del fresado Impero Tools (consultado en línea)

2.6 Acero AISI H13

Por ser un acero, es un material que está compuesto básicamente por hierro y carbono, pero específicamente es un acero aleado al Cromo-Molibdeno-Vanadio, probablemente el de mayor aplicación en fabricación de moldes y herramientas para trabajo en caliente. Este acero AISI H13, posee una alta templabilidad, la cual le permite ser templado al aire. Posee además una excelente tenacidad y una alta resistencia en caliente (resistencia al revenido). Este acero posee altas propiedades de pulido.

Sus aplicaciones son:

Moldes.

Herramientas para extrusión de Aluminio, Latón y Magnesio.

Estampas y troqueles de forjado.

Insertos para inyección de plásticos.

Rodillos de laminación.

2.7 Rugosidad superficial

El acabado superficial de una superficie consiste en desviaciones repetitivas y aleatorias con respecto a la superficie nominal de un objeto. Frecuentemente a estas desviaciones se les denominan irregularidades superficiales y están compuestas por cuatro elementos, como lo son la rugosidad, ondulación, orientación y las fallas.

La rugosidad se refiere a pequeñas desviaciones, finamente espaciadas, con respecto a la superficie nominal, que son influenciadas por las características del material, y del proceso de fabricación que formaron la superficie.

La ondulación se define como una desviación más espaciada que ocurre debido a la deflexión del material de trabajo, vibración, tratamiento térmico y factores similares. La rugosidad se sobrepone a la ondulación.

La orientación es la dirección predominante o patrón del acabado superficial y está determinado por los métodos de manufactura usados para crear la superficie, generalmente debido a la acción de las herramientas de corte.

Las fallas son irregularidades que ocurren ocasionalmente en las superficies y comprenden grietas, rayas, inclusiones y defectos similares en la superficie.

La figura 2.5 muestra un ejemplo de lo que son la rugosidad y la ondulación, y su combinación.

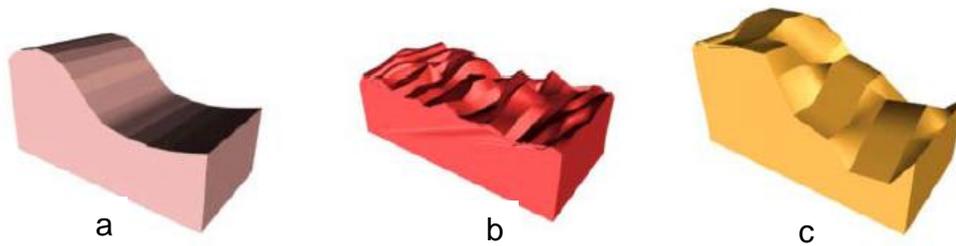


Figura 2.5: Ejemplificación de a) ondulación, b) rugosidad y c) combinación de ellas

Fuente: <http://www.monografias.com> (consultado en línea)

De estos cuatro parámetros, el más representativo de la textura superficial de un material es la rugosidad, específicamente la rugosidad promedio o la media aritmética de la rugosidad (R_a) que representa el promedio de los módulos (valores absolutos) de las alturas o profundidades de crestas y valles respectivamente, presentes en las irregularidades en una superficie, como la que se muestra en la figura 2.6 y cuya expresión matemática se modela a continuación:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)|^2 dx \quad (\text{ec. 2.1})$$

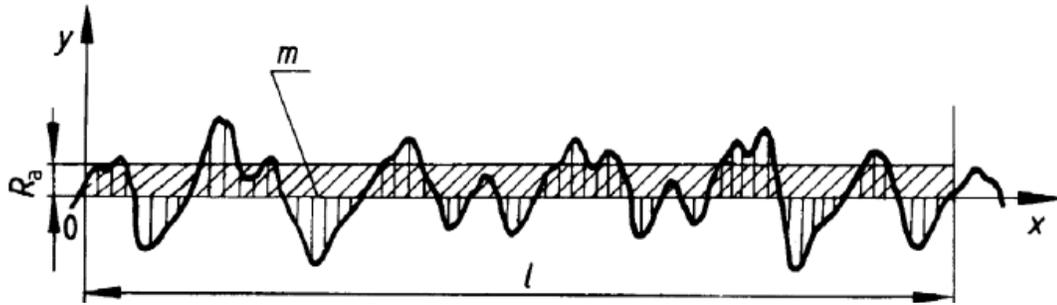


Figura 2.6: Rugosidad aritmética R_a , medida en una longitud l , con referencia en la superficie ideal m
 Fuente: Escuela Universitaria Ingeniería Técnica Industrial Zaragoza. Material de apoyo

Donde l (mm) es la longitud de evaluación, $Z_{(x)}$ (μm) es una expresión matemática que representa a cada una de las alturas del perfil en función de la longitud del mismo, y R_a (μm) como ya se había nombrado anteriormente, representa la rugosidad media aritmética.

También existe otra característica de la rugosidad superficial denominada rugosidad media cuadrática o R_q , (μm) que no es más que el promedio de la raíz cuadrada entre cada una de las alturas o profundidades del perfil, y se determina mediante la siguiente expresión.

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l Z_{(x)}^2 dx} \quad (\text{ec. 2.2})$$

Otra característica de rugosidad superficial es la profundidad media de la rugosidad, o R_z , (μm) que representa el valor aritmético de las profundidades de rugosidad, en la longitud de evaluación; y está representada a través de:

$$R_z = \frac{1}{n} (R_{z1} + R_{z2} + \dots + R_{zn}) \quad (\text{ec. 2.3})$$

Donde R_{zi} (μm) representa el valor de la altura entre la cresta más alta, y el valle más profundo para cada longitud de muestra, y n es la cantidad de longitudes de muestra. La figura 2.7 ejemplifica el significado de la profundidad media de la rugosidad.

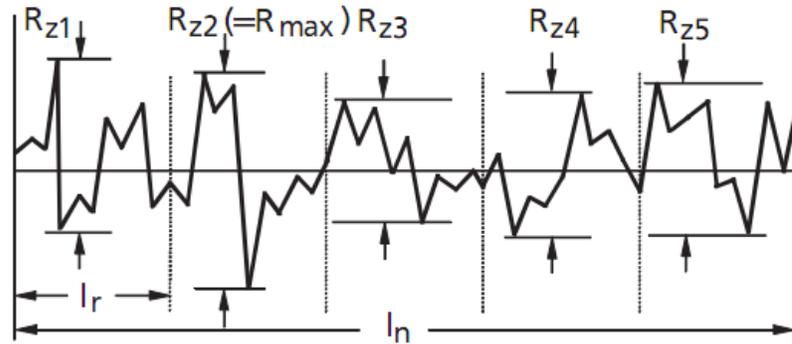


Figura 2.7: Profundidad media de la rugosidad
Fuente: Escuela Universitaria Ingeniería Técnica Industrial Zaragoza. Material de apoyo

2.8 Perfil de rugosidad

Es la intersección de un plano imaginario, con la superficie real, en una longitud dada, como se muestra en la figura 2.8.

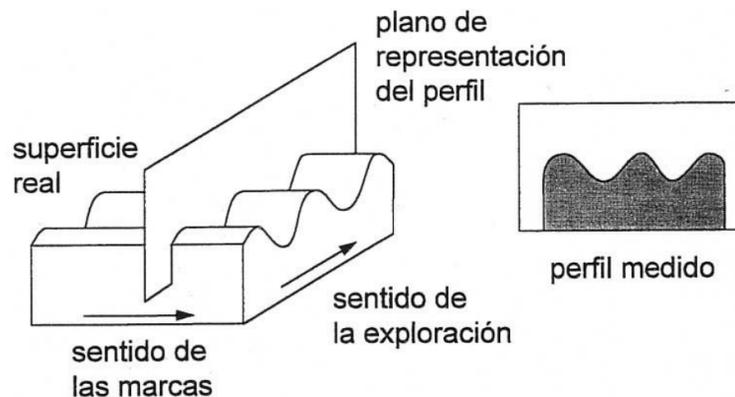


Figura 2.8: Perfil de rugosidad
Fuente: Escuela Tecnológica Superior. Tecnología Mecánica. Material de apoyo

2.9 Cresta (o pico) local de perfil

Parte del perfil comprendida entre dos mínimos adyacentes del perfil.
(Ver figura 2.9).

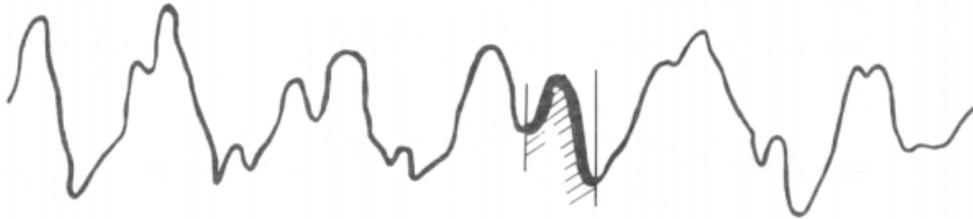


Figura 2.9: Cresta local de perfil
Fuente: Escuela Universitaria Ingeniería Técnica Industrial Zaragoza. Material de apoyo

2.10 Valle local de perfil

Parte del perfil comprendida entre dos máximos adyacentes del perfil.
(Ver figura 2.10).

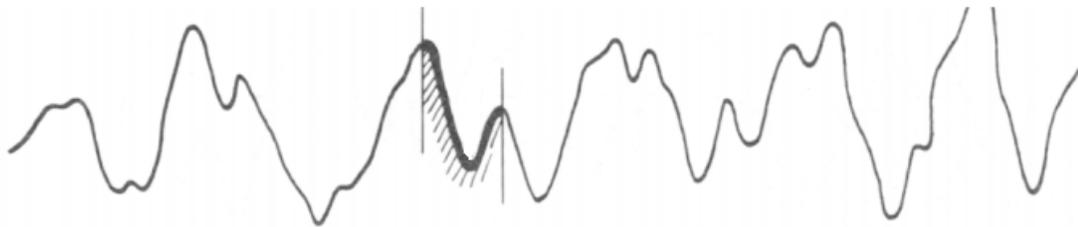


Figura 2.10: Valle local de perfil
Fuente: Escuela Universitaria Ingeniería Técnica Industrial Zaragoza. Material de apoyo

2.11 Cresta (o pico) de perfil

Parte del perfil dirigida hacia el exterior del material, uniendo dos intersecciones consecutivas del perfil con la línea media, la cual es señalada en la figura 2.11.

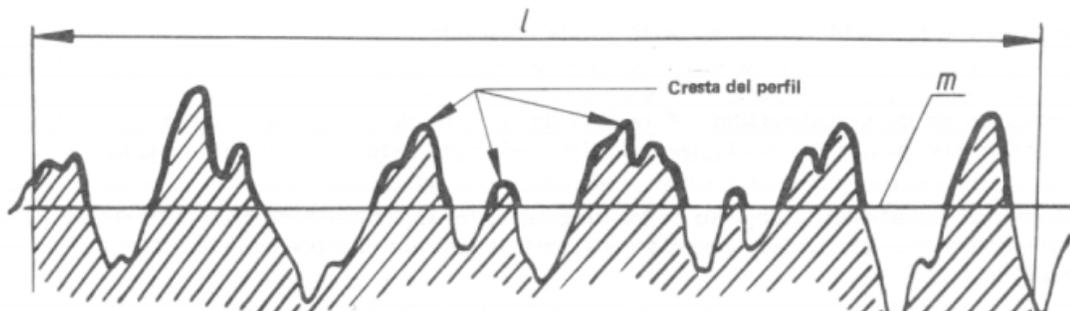


Figura 2.11: Cresta de perfil
 Fuente: Escuela Universitaria Ingeniería Técnica Industrial Zaragoza. Material de apoyo

2.12 Valle de perfil

Parte del perfil dirigida hacia el interior del material, uniendo dos intersecciones consecutivas del perfil con la línea media, cuya representación puede observarse en la figura 2.12.

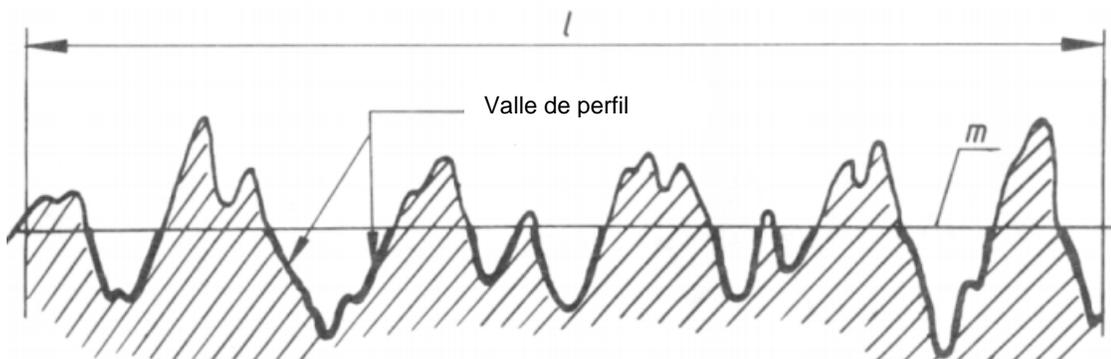


Figura 2.12: Valle de perfil
 Fuente: Escuela Universitaria Ingeniería Técnica Industrial Zaragoza. Material de apoyo

2.13 Altura de una cresta (o pico) de perfil

Distancia entre la línea media y el punto más alto de una cresta. (Ver figura 2.13).

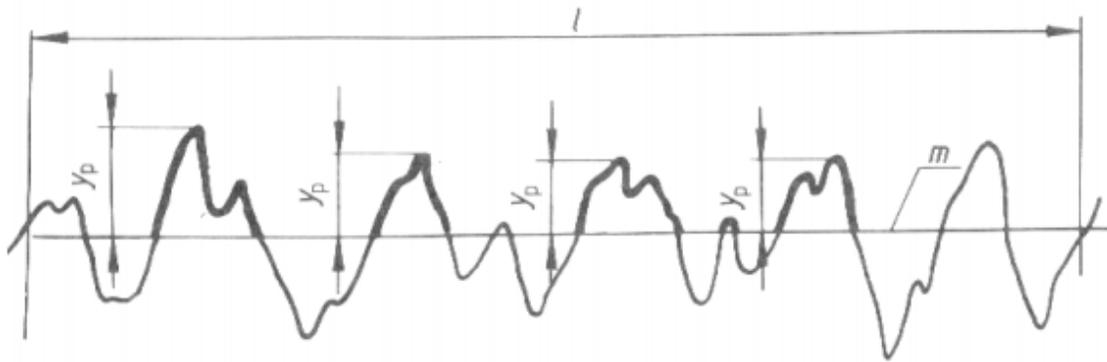


Figura 2.13: Altura de una cresta de perfil
 Fuente: Escuela Universitaria Ingeniería Técnica Industrial Zaragoza. Material de apoyo

2.14 Profundidad de un valle de perfil

Distancia entre la línea media y el punto más bajo de un valle, como se puede observar en la figura 2.14.

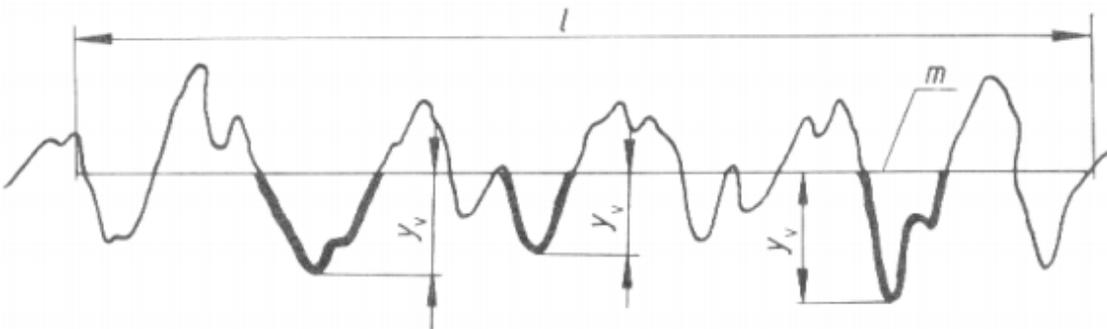


Figura 2.14: Profundidad de un valle de perfil
 Fuente: Escuela Universitaria Ingeniería Técnica Industrial Zaragoza. Material de apoyo

2.15 Altura de una irregularidad de perfil

Suma de la altura de una cresta (o pico) y la profundidad de un valle adyacente. (Ver figura 2.15).

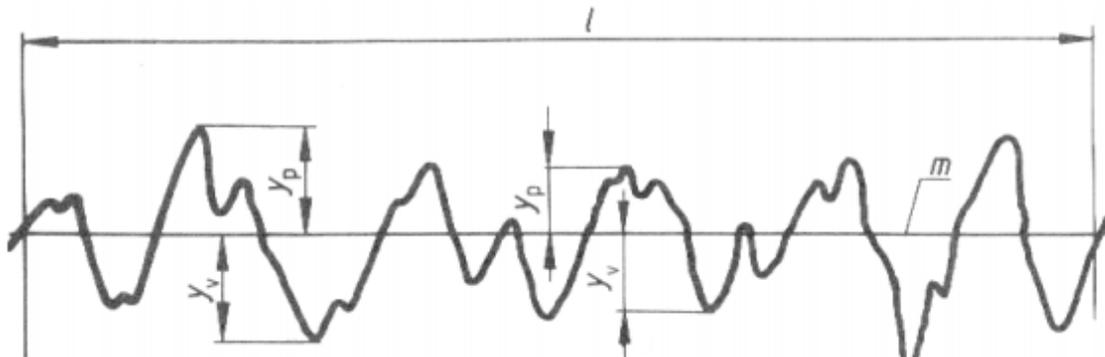


Figura 2.15: Altura de una irregularidad de perfil
 Fuente: Escuela Universitaria Ingeniería Técnica Industrial Zaragoza. Material de apoyo

2.16 Paso de las irregularidades de perfil

Longitud de la línea media que contiene un valle y una cresta consecutiva, como se señala en la figura 2.16.

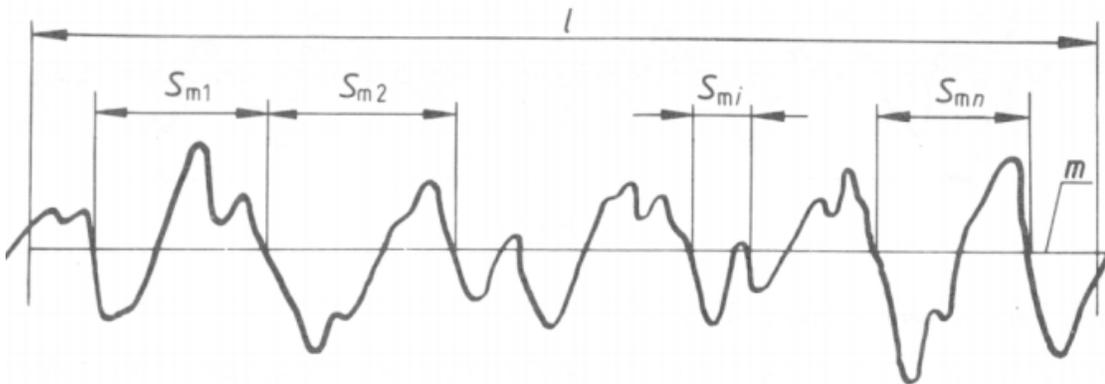


Figura 2.16: Paso de las irregularidades de perfil
 Fuente: Escuela Universitaria Ingeniería Técnica Industrial Zaragoza. Material de apoyo

2.17 Parámetros en la medición de rugosidad

Longitud de evaluación (l): longitud total recorrida por la aguja cuando se está registrando el perfil de la superficie. Es la sumatoria de todas las longitudes de muestra.

Longitud de muestra (l_n): longitud en la cual se determina el valor de rugosidad. La cantidad estándar de longitudes de muestra es cinco (5).

Cutoff (λ): determina las longitudes de onda que pertenecen a rugosidad y las que pertenecen a ondulaciones.

CAPÍTULO 3

Metodología

3.1 Nivel de la investigación

Este trabajo de grado fue una investigación de tipo experimental, debido a que se estudiaron los valores de rugosidad que se obtuvieron mediante el proceso de fresado CNC, para el mecanizado de moldes; en los cuales se les variaron los parámetros de corte, con el objeto de encontrar cuales de éstos parámetros resultó el más influyente en la rugosidad al mecanizar un molde, y de esta manera establecer cuáles fueron las mejores condiciones, parámetros de corte, que permitieron obtener una óptima rugosidad superficial.

Para realizar los estudios de rugosidad, se estudiaron tres variables, velocidad de corte de la herramienta, avance, y profundidad de corte; por lo tanto se utilizaron para el estudio, tres velocidades de corte (V_{c1} , V_{c2} y V_{c3}), así como tres velocidades de avances de la herramienta (f_1 , f_2 y f_3) y tres profundidades de corte (d_1 , d_2 , d_3). De esta manera se obtuvieron distintas zonas en las que se evaluará la rugosidad.

En el flujograma siguiente (figura 3.1) se muestran las etapas necesarias para la metodología planteada en el presente trabajo, desde la fase inicial que fue la selección del material, hasta la fase final que fueron los análisis de resultados.

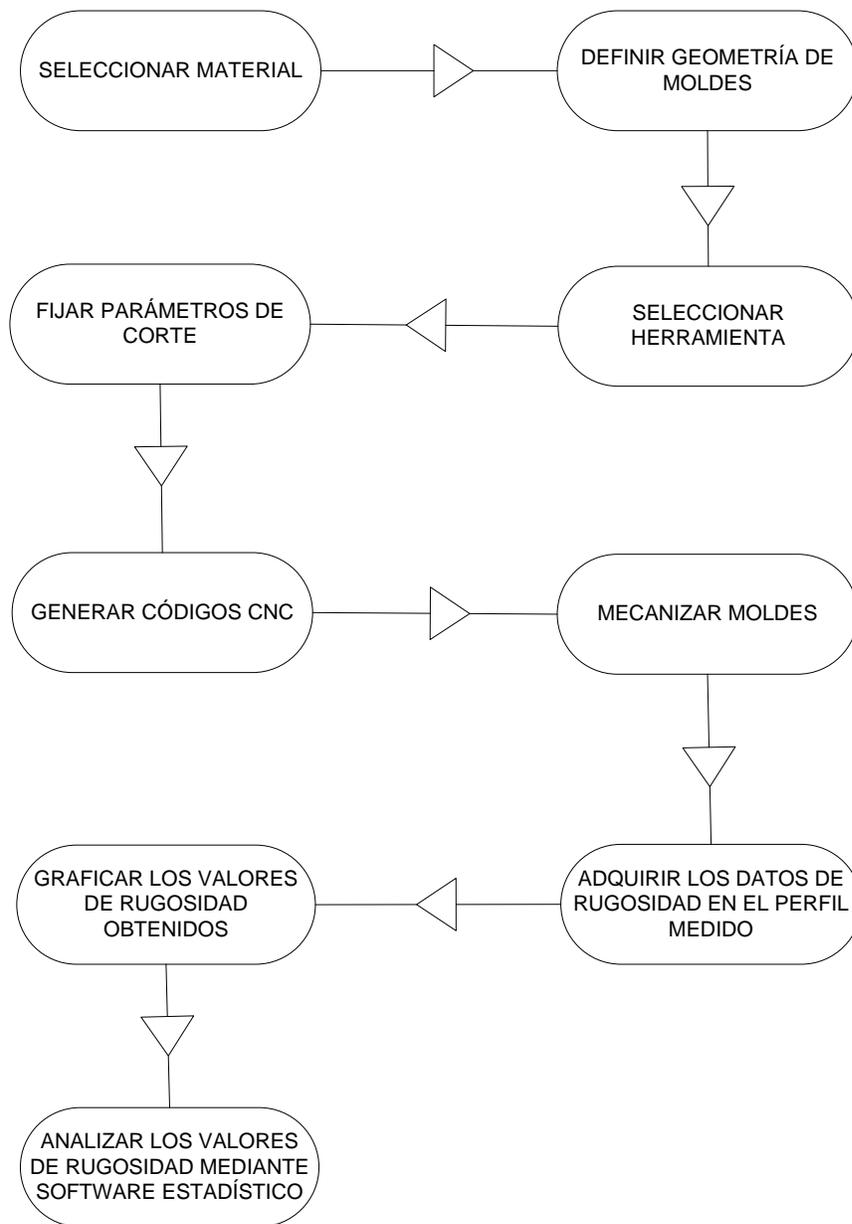


Figura 3.1: Flujograma de las actividades a realizar

3.2 Material empleado para los moldes

El material que se utilizó se trata de acero AISI H13, una acero aleado al Cromo-Molibdeno-Vanadio, altamente utilizado en la fabricación de moldes para fundición y otras aplicaciones, por presentar óptimas propiedades a altas

temperaturas, así como también buenas propiedades de pulido, características que fueron consultadas a empresas como Sumindú (proveedora de aceros en el estado Carabobo) y a los técnicos de la empresa metalmecánica Dalor, empresa que posee experiencia en la fabricación de moldes.

3.2.1 *Cantidad de material*

Se utilizó una sola plancha de acero AISI H13 de 30 mm de espesor, en la cual fueron mecanizadas las cavidades para generar la geometría de cada uno de los moldes.

La cantidad y geometría del material quedó en función del tamaño de los moldes a mecanizar y la disponibilidad en el mercado de dicho material. Por lo tanto fue adquirida una plancha de 30 x 165 x 270 mm; esto también en función de poder fabricar moldes en los que sea posible tomar las medidas o valores de rugosidad con la utilización del rugosímetro.

3.2.2 Cantidad de moldes

Para el desarrollo de este trabajo se realizó un análisis de varianza multifactorial, de 3x3x3, ya que fueron tres las variables que se estudiaron, y a su vez cada una de estas poseía tres niveles. De esta manera se generaron 27 combinaciones de parámetros de corte.

Por lo tanto, se utilizó una cantidad de veintisiete (27) moldes en acero AISI H13, donde cada uno de ellos se mecanizó con una combinación de parámetros de corte en específico, mediante la utilización de un centro de mecanizado vertical de tres ejes. Las diferentes combinaciones de los parámetros, para cada molde se encuentran en la tabla 3.1.

Tabla 3.1: Combinaciones de parámetros

Parámetros	d1	d2	d3
f1	Vc1	M1	M4
	Vc2	M2	M5
	Vc3	M3	M6
f2	Vc1	M10	M13
	Vc2	M11	M14
	Vc3	M12	M15
f3	Vc1	M19	M22
	Vc2	M20	M23
	Vc3	M21	M24

M_i: Molde_i

3.3 Máquina utilizada e instrumentos de recolección de datos

3.3.1 Centro de mecanizado vertical CNC de tres ejes

Las pruebas fueron realizadas en un centro de mecanizado vertical CNC Victor/Taichung modelo Vcenter 102, de tres ejes, se mecanizó utilizando una herramienta de corte para fresado con insertos de carburo revestidos. El mecanizado se efectuó sin la utilización de fluido refrigerante para corte (en seco).

La selección del centro de mecanizado fue hecha, debido a que esta máquina-herramienta posee una gran precisión y exactitud en sus operaciones, así como también presenta una gran gama de velocidades de rotación de herramienta y de avance, lo que permite trabajar casi con cualquier valor de estos. Dicho centro de mecanizado se puede observar en la figura 3.2.

Posee también un control numérico tipo fanuc o iNC, que permite la transmisión de datos, provenientes del diseño computarizado de las piezas, y de códigos de mecanizado CNC, y realizar, casi en su totalidad, las

operaciones de mecanizado desde un ordenador personal, en la misma etapa de diseño, cuyo tablero de control se muestra en la figura 3.3.



Figura 3.2: Centro de mecanizado CNC Victor/Taichung modelo Vcenter 102



Figura 3.3: Tablero de control del centro de mecanizado CNC Victor/Taichung, modelo Vcenter 102

El centro de mecanizado es de marca Victor/Taichung, modelo Vcenter 102, cuyas especificaciones técnicas se muestran en la tabla 3.2:

Tabla 3.2: Especificaciones técnicas del centro de mecanizado CNC Victor/Taichung, modelo Vcenter 102

Especificaciones técnicas	Unidades	Valor
Desplazamiento longitudinal (en x)	mm	1020
Desplazamiento transversal (en y)	mm	520
Altura máxima (en z)	mm	560
Dimensiones de la mesa	mm	1100 x 510
Carga máxima de la mesa	kg	300
Velocidad máxima del husillo	RPM	8000
Potencia del motor del husillo	kW (AC)	9
Cono del husillo	-----	BT-40
Avance rápido en x	m/min	24
Avance rápido en y	m/min	24
Avance rápido en z	m/min	20
Masa total de la máquina	kg	2640
Longitud máxima de herramienta	mm	300
Diámetro máximo de herramientas (sin accesorios)	mm	80(125)
Control numérico estándar		FANUC 20i

Fuente: Catálogo Victor/Taichung, 2005. Pág. 2.

3.3.2 Rugosímetro

El rugosímetro utilizado para la medición de los valores de rugosidad de cada uno de los moldes, fue un instrumento que pertenece al laboratorio de metrología de la Escuela de Ingeniería Mecánica, de la Universidad de Carabobo. El rugosímetro es de marca Mitutoyo, modelo SJ-201P, que puede observarse en la figura 3.4. También se contó con un cable de comunicaciones (a un ordenador) y un software de adquisición de datos, con los cuales se pudo transferir los valores de rugosidad medidos en cada molde a un ordenador, para un posterior análisis de dichos valores y de esa manera se obtuvo el comportamiento gráfico de la rugosidad en la longitud medida (perfil de rugosidad).



Figura 3.4: Rugosímetro SJ-201P

Este instrumento utilizado permitió, entre otras cosas, determinar o medir la rugosidad superficial de una superficie como un promedio aritmético de las alturas del perfil medido. Como el mismo nombre lo indica, este valor de rugosidad resultó de los promedios de los valores absolutos de las longitudes de las crestas más altas y los valles más profundos del perfil de rugosidad, medidos con respecto a una línea de referencia.

El rugosímetro suministra los valores de rugosidad en unidades de micras de metro o micrómetros ($1\mu m = 10^{-6}m$) y posee un alcance de medición de 350 μm distribuidos en un rango de -200 μm hasta +150 μm . La apreciación se encuentra entre los valores de 0,01 μm hasta 0,04 μm , esto en función al rango en que el rugosímetro se encuentre tomando las mediciones. Las demás especificaciones del rugosímetro utilizado se encuentran en la tabla 3.3, así como también las longitudes de evaluación especificadas según la norma ISO 4288, se observan en la tabla 3.4.

Tabla 3.3: Especificaciones del rugosímetro SJ-201P

Marca	Mitutoyo
Modelo	SJ-201P
Rango de medidas	(-200 a +150) μm
Material de la punta	Diamante
Radio de la punta	5 μm
Apreciación	(0,01 a 0,04) μm

Fuente: Manual de usuario Mitutoyo SJ-201P pág. 9.1

Tabla 3.4: Longitud de muestras estándar y de evaluación para medidas de Ra según norma ISO 4288

Ra (μm)	Longitud de ejemplo l (mm)	Longitud de evaluación l_n (mm)
0,006 < Ra < 0,02	0,08	0,4
0,006 < Ra < 0,1	0,25	1,25
0,1 < Ra < 2	0,8	4
2 < Ra < 10	2,5	12,5
10 < Ra < 80	8	40

Fuente: Manual de usuario Mitutoyo SJ-201P, pág. 10.4.

3.4 Herramientas y parámetros de corte

3.4.1 Herramienta de corte

La herramienta seleccionada fue una fresa de punta redonda de cuatro dientes (filos) las cuales fueron recomendadas por Iscar Cutting Tools, proveedor internacional de herramientas de corte, para el fresado de superficies curvas, tales como moldes, cavidades y perfiles.

En el capítulo cuatro (4), se detallará los resultados de la selección específica de la herramienta.

3.4.2 Parámetros de corte

Los parámetros de corte se seleccionaron como recomendación del fabricante de la herramienta seleccionada (Iscar Cutting Tools), para operaciones de acabado, en un material aleado de categoría ISO P(H) 39 (AISI H13).

Para el avance (f), el fabricante recomienda entre un rango de 0,07 mm/dte hasta 0,12 mm/dte, para operaciones de acabado. Esto para el diámetro de la herramienta seleccionado (10 mm).

Los valores de velocidad de corte (V_c), se recomiendan que se encuentren entre 100 m/min y 150 m/min.

La profundidad de corte recomendada se encuentra también en función del diámetro de la herramienta, cuya expresión es

$$d = 0,1 * D \quad \text{ec. (3.1)}$$

3.5 Técnica de recolección de data

3.5.1 Diseño de los moldes

Para diseñar la geometría de los moldes se tomó en cuenta los factores del tamaño de la plancha de material existente en el mercado, las herramientas a utilizar, y las dimensiones (longitudes) que deben tener las superficies de estudio de acuerdo a la norma ISO 4288 para la medición de rugosidad.

En función a todo esto se procedió a diseñar con la utilización del software Solidwork®, cada una de las diferentes cavidades o moldes, mostradas en la figura 3.5.

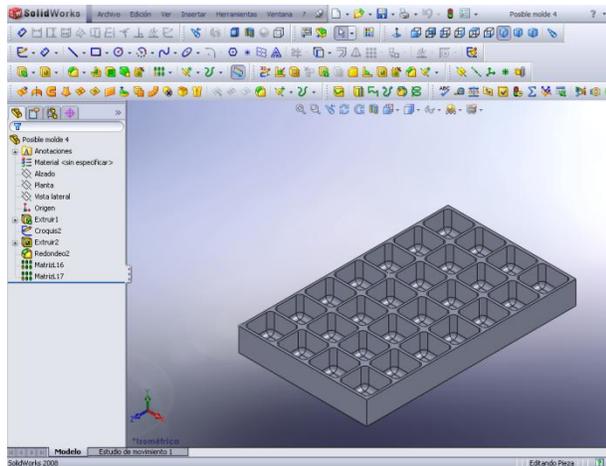


Figura 3.5: Moldes en plancha de acero AISI H13 en solidwork®

3.5.2 Creación del código CNC para el mecanizado.

En función a los parámetros de corte seleccionados, y la geometría de cada molde, se procedió a generar los códigos CNC que permitieran generar el mecanizado final (acabado), sobre el cual se realizaron las mediciones de rugosidad. Para ello, se procedió a exportar el sólido diseñado en solidwork, al software Mastercam®, versión X4; como se muestra en la figura 3.6, para poder generar sobre este sólido, la simulación y generar el código CNC. Mastercam® es un programa tipo CAM (manufactura asistida por computadora) que permite simular el proceso, o mecanizado de máquinas-herramientas de control numérico, y posteriormente generar el código CNC de dicho proceso; tomando en cuenta los parámetros de corte, como avance de herramienta, velocidad de rotación y profundidad de corte de la misma, además del tipo de mecanizado, máquina y tipo de herramienta utilizadas.

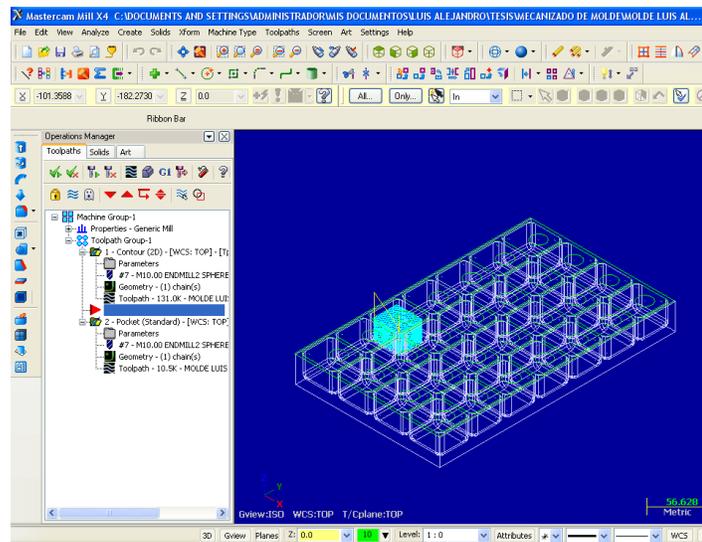


Figura 3.6: Moldes en software Mastercam® X4

Teniendo todas las combinaciones de parámetros definidos, se generó la simulación del mecanizado de cada molde (pasada de acabado, ya que sobre esta fue que se midió la rugosidad), mostrado en la figura 3.7, y de esta manera se obtuvieron los códigos CNC para el mecanizado (de acabado) de cada una de las veintisiete (27) cavidades.

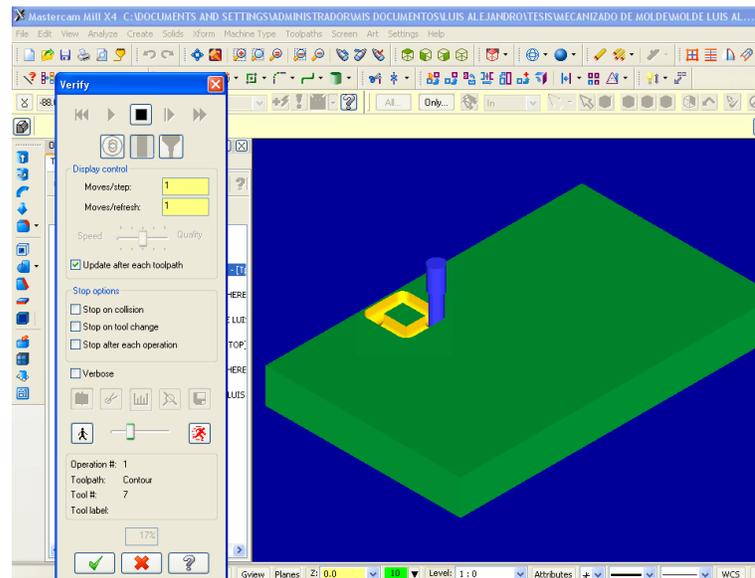


Figura 3.7: Simulación de mecanizado de moldes software Mastercam® X4

Posteriormente a esto, se procedió a mecanizar el molde, con lo anteriormente realizado.

3.5.3 Medición de rugosidad.

La rugosidad se midió en cada una de las caras del molde, mediante la utilización del rugosímetro digital descrito anteriormente, y el software de adquisición de datos.

Número de mediciones = N° moldes * N° caras = $27 * 4 = 108$ mediciones.

Cada una de las caras del molde está identificada de la siguiente manera como se observa en la figura 3.8:

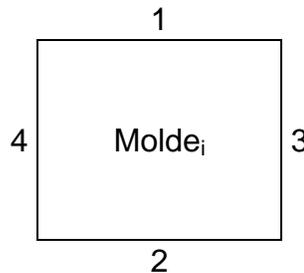


Figura 3.8: Distribución y nomenclatura de las caras del molde

El montaje realizado, consistió en colocar la plancha con los moldes sobre una base metálica, que permitiera fijarse entre si, mediante la utilización de un imán, provisto por una base magnética Mitutoyo, esto con el fin de darle estabilidad y evitar movimientos al momento en que se realizaban las mediciones de rugosidad.

Del mismo modo se fijó el rugosímetro a la base metálica, mediante la estructura de otra base magnética universal Mitutoyo, que permitió la fijación de la unidad conductora del rugosímetro, en una posición tal que permitió la medición en las caras de los moldes. Las figuras 3.9 y 3.10, muestran en varios ángulos, la manera en que se colocó el rugosímetro y los moldes, al momento de realizar la medición de rugosidad.



Figura 3.9: Vista lateral de montaje para medición de rugosidad



Figura 3.10: Vista en isometría del montaje para medición de rugosidad

La obtención del perfil de rugosidad se realizó a través de un software de adquisición de datos, (figura 3.11) compatibles con el rugosímetro digital, del cual se pudo obtener los datos para su análisis en un software gráfico.

También se registró el valor de la rugosidad aritmética mostrada y calculada por el equipo.



Figura 3.11: Software de recepción de datos Surftest SJ201®

CAPÍTULO 4

Resultados obtenidos y discusión

En este capítulo se muestra la selección del material, la selección de la herramienta, la selección de los parámetros de corte, el código CNC de los mecanizados en los cuales se midió la rugosidad superficial (pasada de acabado), el mecanizado de los moldes, los valores obtenidos de rugosidad, tanto Ra, Rz, Rq; así como también el perfil de rugosidad obtenido en cada medición. También se muestran los resultados obtenidos mediante el método de análisis de varianza multifactorial (ANOVA) para determinar la influencia existente entre si, de las variables de estudio (avance, velocidad y profundidad de corte) en la rugosidad superficial. También se muestra el análisis gráfico del perfil de rugosidad en la longitud medida.

4.1 Resultados de la selección del material

Como se explicó en el capítulo tres (3), el acero seleccionado fue el AISI H13. Las propiedades de este acero se muestran en la tabla 4.1, así como la composición química de dicho material se puede observar en la tabla 4.2.

Tabla 4.1: Propiedades mecánicas del AISI H13

Material	Densidad (g/cm ³)	Esfuerzo de Fluencia, Sy (MPa)	Esfuerzo Último, Su (MPa)	Módulo de elasticidad, E (GPa)	Maquinabilidad (%)
AISI H13	7,80	1650	1990	210	50

Fuente: www.matweb.com (consultado en línea) Anexo 1

Tabla 4.2: Porcentaje de la composición química del AISI H13

Carbono (C)	Azufre (S)	Fósforo (P)	Silicio (Si)	Manganeso (Mn)	Cromo (Cr)	Molibdeno (Mo)	Vanadio (V)	Hierro (Fe)
0,41	0,001	0,025	0,96	0,34	5,06	1,30	0,91	90,994

Fuente: Certificado N° 503084 (Anexo 2)

Tabla 4.3: Nomenclatura del AISI H13 según las normas de los distintos países

Categoría ISO	Alemania	Francia	Italia	Japón	Suecia	USA	Gran Bretaña	España
P	X40 CrMoV5 1	Z40CDV5	X40CrMoV051KU	SKD61	2242	H13	BH13	X40CrMoV5

Fuente: Catálogo de fresado Safety, 2010. Pág. 87.

4.2 Resultados de la selección de la herramienta

La herramienta seleccionada resultó en función al tipo de mecanizado que se necesitaba realizar: una cavidad para generar un molde; lo que resultó en la elección de una herramienta de punta esférica, que son las que comúnmente se utilizan para realizar mecanizados de cavidades.

Utilizando la información proporcionada por el fabricante de la herramienta: Iscar Cutting Tools; se tiene que la herramienta de trabajo fue el inserto de carburo revestido: EB100A07-4T06, de punta esférica, esto en función al material de trabajo, la geometría deseada en los moldes, y lo ya antes mencionado: el tipo de mecanizado. La figura 4.1 y la tabla 4.1

muestran respectivamente de manera gráfica y tabular, las especificaciones del inserto seleccionado.

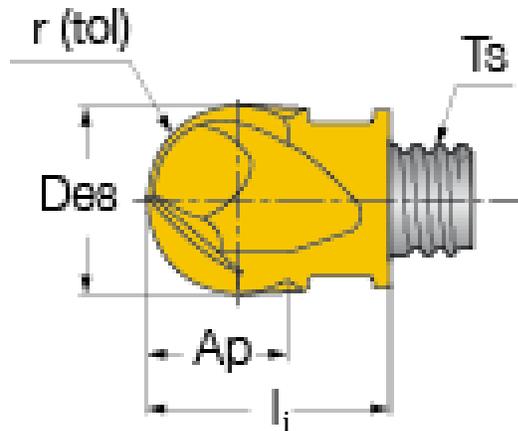


Figura 4.1: Variables del inserto EB100A07-4T06

Tabla 4.4: Especificaciones del inserto EB100A07-4T06

Especificaciones	Unidades	Valor
Des	mm	10
Ap	mm	7
r	mm	4,98
tol	mm	+/- 0,1
l_i	mm	13
Ts	Rosca métrica	M06

Fuente: www.iscar.com (consultado en línea)

El inserto posee un recubrimiento tipo IC908, que está diseñado para mecanizado de aleaciones resistentes al calor, acero inoxidable austenítico, aleaciones pesadas y mecanizado de acero al carbono con corte interrumpido; recomendado para velocidades de corte medias y elevadas. Las especificaciones del recubrimiento se muestran en la tabla 4.5:

Tabla 4.5: Especificaciones del recubrimiento IC908 del inserto EB100A07-4T06

Especificación	Descripción
Rango ISO P/M/K	(P15-P30) (M20-M30) (K20-K40)
Rango ISO H/S	(H10-H20) (S15-S25)
TRS	3950
Calidad	PDV
Calidad/tipo de recubrimiento	TiAlN

Fuente: www.iscar.com (consultado en línea)

Se utilizaron dos ejemplares de la herramienta, los cuales fueron utilizados para mecanizar la mitad de la cantidad de los moldes cada una. En la figura 4.2 se observa el inserto seleccionado.

También fue necesario adquirir un vástago MM S-A-L075-C10-T06 (figura 4.3) para poder fijar el inserto a la pinza porta-herramienta del centro de mecanizado y una llave ISCAR 4268745 (figura 4.4) para poder ajustar el inserto al vástago.



Figura 4.2: Inserto EB100A07-4T06



Figura 4.3: Vástago porta-inserto MM S-A-L075-C10-T06



Figura 4.4: Llave de ajuste inserto-vástago ISCAR 4268745

4.3 Resultados de la selección de los parámetros de corte

Como se explicó en el capítulo cuatro (4), se obtuvo la información dada por el fabricante Iscar Cutting Tools, luego de ello, y habiendo seleccionado la herramienta, se procedió a establecer los valores de avance f_1 , f_2 y f_3 , (tabla 4.6); las velocidades: Vc_1 , Vc_2 , Vc_3 (tabla 4.7) y las profundidades d_1 , d_2 , d_3 (tabla 4.8) como los valores de las variables a utilizadas.

Tabla 4.6: Parámetros de corte (Avances)

Avance (mm/dte)	
f_1	0,07
f_2	0,09
f_3	0,11

Fuente: Catálogo Iscar Cutting Tools, 2010

Tabla 4.7: Parámetros de corte (Velocidades de corte)

Velocidad de corte (m/min)	
Vc_1	100
Vc_2	130
Vc_3	150

Fuente: Catálogo Iscar Cutting Tools, 2010

Tabla 4.8: Parámetros de corte (Profundidades de corte)

Profundidad de corte (mm)	
d₁	0,3
d₂	0,6
d₃	0,9

Fuente: Catálogo Iscar Cutting Tools, 2010

4.4 Código CNC de la pasada de acabado de los moldes

El código CNC presentado, corresponde al de la última pasada (pasada de acabado), ya que es sobre este último mecanizado que se realizó la medición de rugosidad. Resultó irrelevante, para efectos de este trabajo de investigación, el código CNC del mecanizado de desbaste que se le dio a los moldes, por lo tanto no se presenta.

Cada uno de los códigos de acabado utilizados, se encuentran presentes en el anexo 3 de este trabajo. Por razones de espacio, no fueron colocados en este capítulo.

A continuación se muestra un extracto del código CNC del mecanizado de algunos moldes:

Molde 1

```
O0000
(PROGRAM NAME - MOLDE LUIS ALDANA M1)
( DATE=DD-MM-YY - 18-03-11 TIME=HH:MM - 17:13 )
N100 G21
N102 G0 G17 G40 G49 G80 G90
( TOOL - 7 DIA. OFF. - 7 LEN. - 7 DIA. - 10. )
N104 T7 M6
N106 G0 G90 G54 X-74.2 Y-126.175 A0. S3180 M3
N108 G43 H7 Z25.
N110 Z5.
N112 G1 Z-.3 F100.
```

N114 X-47.6 F890.
N116 Y-102.575
N118 X-74.2
N120 Y-126.175
N122 Z-.6 F100.
N124 X-47.6 F890.
N126 Y-102.575
N128 X-74.2
N130 Y-126.175
N132 Z-.9 F100.
N134 X-47.6 F890.
N136 Y-102.575
N138 X-74.2
N140 Y-126.175

Molde 2

O0000 M2
(PROGRAM NAME - MOLDE LUIS ALDANA)
(DATE=DD-MM-YY - 20-03-11 TIME=HH:MM - 10:05)
N100 G21
N102 G0 G17 G40 G49 G80 G90
(TOOL - 7 DIA. OFF. - 7 LEN. - 7 DIA. - 10.)
N104 T7 M6
N106 G0 G90 G54 X-33.9 Y-126.475 A0. S4138 M3
N108 G43 H7 Z23.
N110 Z3.
N112 G1 Z-2.297 F100.
N114 X-6.7 F1158.
N116 Y-102.275
N118 X-33.9
N120 Y-126.475
N122 Z-2.595 F100.
N124 X-6.7 F1158.
N126 Y-102.275
N128 X-33.9
N130 Y-126.475
N132 Z-2.892 F100.
N134 X-6.7 F1158.
N136 Y-102.275
N138 X-33.9
N140 Y-126.475
N142 Z-3.189 F100.

Molde 3

O0000 M3
(PROGRAM NAME - MOLDE LUIS ALDANA)
(DATE=DD-MM-YY - 20-03-11 TIME=HH:MM - 10:19)
N100 G21
N102 G0 G17 G40 G49 G80 G90
(TOOL - 7 DIA. OFF. - 7 LEN. - 7 DIA. - 10.)
N104 T7 M6
N106 G0 G90 G54 X6.7 Y-126.475 A0. S4774 M3
N108 G43 H7 Z23.
N110 Z3.
N112 G1 Z-2.297 F100.
N114 X33.9 F1336.
N116 Y-102.275
N118 X6.7
N120 Y-126.475
N122 Z-2.595 F100.
N124 X33.9 F1336.
N126 Y-102.275
N128 X6.7
N130 Y-126.475
N132 Z-2.892 F100.
N134 X33.9 F1336.
N136 Y-102.275
N138 X6.7
N140 Y-126.475
N142 Z-3.189 F100.

4.5 Resultado del mecanizado del acero AISI H13

Del mecanizado de la plancha de acero AISI H13 se obtuvieron veintisiete (27) moldes, cada uno de ellos mecanizado con una combinación de parámetros distintos, como se estipuló anteriormente en el capítulo tres.

Para obtener el mecanizado final (a los veintisiete moldes) fue necesario inicialmente, realizar una operación de planeado, a fin de lograr que las caras del material estuvieran a 90° entre sí, para tener una óptima fijación de la plancha de AISI H13 con la mesa del centro de mecanizado, y una correcta relación de referencia, y así se aseguró (entre otras cosas) que las

dimensiones finales de los moldes fuesen las correctas. La figura 4.5 muestra el material después de esta operación.



Figura 4.5: Material después de la operación de planeado

Luego de haber fijado firmemente el material, se procedió a mecanizar el mismo, comenzando a generar los moldes, hasta obtener sus dimensiones finales con su combinación de parámetros correspondientes. El mecanizado de acabado se puede observar para distintos moldes en las figuras 4.6 y 4.7, hasta que se realizó la última pasada necesaria para terminar el mecanizado de los moldes, como se muestra en la figura 4.8.



Figura 4.6: Molde M2 en proceso de mecanizado

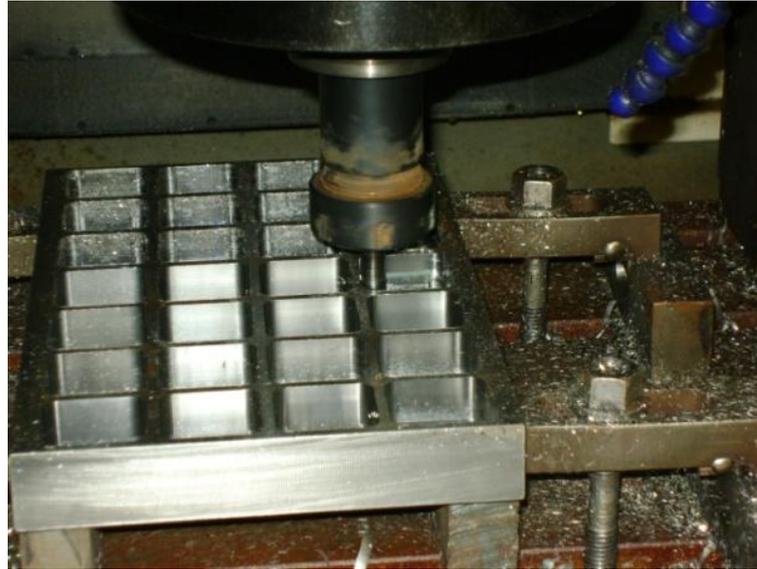


Figura 4.7: Molde M16 en proceso de mecanizado

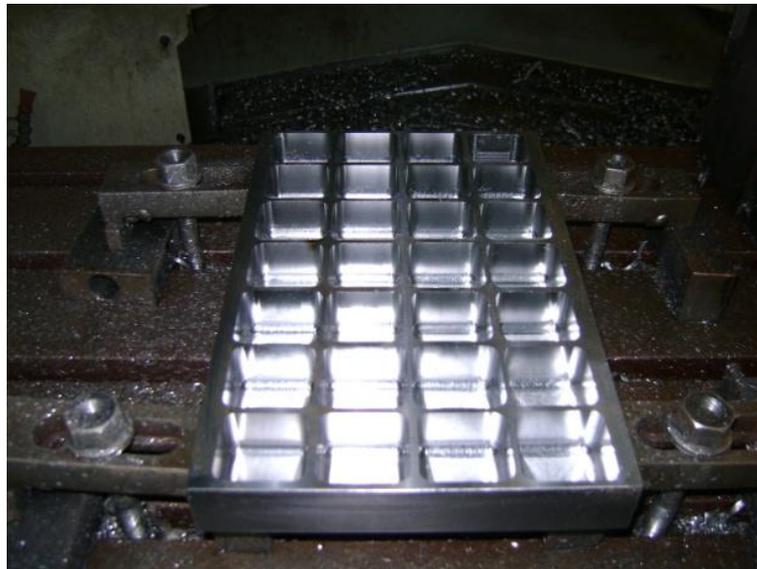


Figura 4.8: Moldes mecanizados

Las dimensiones de cada una de las cavidades (moldes) fueron de 35 x 38 x 25 mm de profundidad.

4.6 Valores de rugosidad obtenidos

Las tablas 4.9.a, 4.9.b, 4.9.c, y 4.9.d muestran los valores de rugosidades obtenidos en los distintos moldes y en las distintas caras de los mismos. Se presentan los valores de Ra (μm), Rz (μm) y Rq (μm).

Tabla 4.9.a: Rugosidad obtenida en los moldes

Moldes	Caras	Ra (μm)	Rz (μm)	Rq (μm)	Ra prom (μm)	Desv Est (μm)	Rz prom (μm)	Desv Est (μm)	Rq prom (μm)	Desv Est (μm)
M1	1	0,32	1,71	0,38	0,31	0,03	1,85	0,15	0,39	0,03
	2	0,31	1,75	0,38						
	3	0,28	1,94	0,36						
	4	0,34	2,01	0,42						
M2	1	0,25	1,49	0,31	0,28	0,05	1,69	0,29	0,35	0,06
	2	0,24	1,45	0,29						
	3	0,35	2,07	0,43						
	4	0,29	1,74	0,36						
M3	1	0,34	1,99	0,42	0,28	0,04	1,73	0,17	0,35	0,04
	2	0,26	1,63	0,33						
	3	0,26	1,67	0,33						
	4	0,26	1,63	0,33						
M4	1	0,42	2,72	0,52	0,41	0,02	2,74	0,38	0,52	0,04
	2	0,44	3,12	0,56						
	3	0,40	2,90	0,52						
	4	0,39	2,23	0,47						
M5	1	0,33	1,94	0,40	0,35	0,08	2,15	0,49	0,45	0,11
	2	0,25	1,65	0,32						
	3	0,38	2,81	0,54						
	4	0,43	2,19	0,53						
M6	1	0,34	1,86	0,41	0,34	0,03	1,92	0,15	0,41	0,03
	2	0,31	1,83	0,39						
	3	0,32	1,86	0,40						
	4	0,37	2,14	0,45						

Tabla 4.9.b: Rugosidad obtenida en los moldes (continuación)

Moldes	Caras	Ra (μm)	Rz (μm)	Rq (μm)	Ra prom (μm)	Desv Est (μm)	Rz prom (μm)	Desv Est (μm)	Rq prom (μm)	Desv Est (μm)
M7	1	0,40	3,36	0,53	0,43	0,03	3,47	0,35	0,56	0,05
	2	0,46	3,62	0,62						
	3	0,43	3,85	0,56						
	4	0,41	3,03	0,51						
M8	1	0,33	1,94	0,40	0,37	0,04	2,01	0,21	0,44	0,05
	2	0,36	1,88	0,42						
	3	0,42	2,32	0,51						
	4	0,36	1,89	0,42						
M9	1	0,39	2,39	0,47	0,36	0,03	2,46	0,36	0,46	0,06
	2	0,32	2,19	0,40						
	3	0,39	2,99	0,54						
	4	0,35	2,27	0,44						
M10	1	0,41	2,46	0,50	0,46	0,05	2,58	0,17	0,55	0,05
	2	0,41	2,40	0,50						
	3	0,51	2,74	0,60						
	4	0,50	2,70	0,59						
M11	1	0,48	2,89	0,58	0,46	0,05	3,31	0,61	0,61	0,10
	2	0,46	3,25	0,69						
	3	0,52	4,19	0,67						
	4	0,39	2,90	0,48						
M12	1	0,41	3,35	0,55	0,45	0,06	3,12	0,30	0,57	0,06
	2	0,41	2,78	0,51						
	3	0,46	2,96	0,57						
	4	0,53	3,38	0,65						
M13	1	0,51	2,70	0,61	0,51	0,05	2,97	0,53	0,63	0,07
	2	0,57	3,58	0,71						
	3	0,45	2,40	0,54						
	4	0,52	3,21	0,64						
M14	1	0,43	2,60	0,53	0,45	0,03	2,99	0,32	0,56	0,04
	2	0,43	2,93	0,52						
	3	0,47	3,04	0,58						
	4	0,48	3,38	0,59						

Tabla 4.9c: Rugosidad obtenida en los moldes (continuación)

Moldes	Caras	Ra (μm)	Rz (μm)	Rq (μm)	Ra prom (μm)	Desv Est (μm)	Rz prom (μm)	Desv Est (μm)	Rq prom (μm)	Desv Est (μm)
M15	1	0,43	2,51	0,52	0,45	0,03	2,50	0,10	0,54	0,03
	2	0,45	2,53	0,54						
	3	0,41	2,36	0,50						
	4	0,49	2,59	0,58						
M16	1	0,44	2,68	0,56	0,52	0,07	2,98	0,31	0,65	0,08
	2	0,51	2,89	0,62						
	3	0,52	2,95	0,64						
	4	0,62	3,41	0,76						
M17	1	0,45	2,96	0,56	0,48	0,03	3,19	0,40	0,60	0,05
	2	0,51	3,79	0,67						
	3	0,48	2,94	0,58						
	4	0,47	3,07	0,59						
M18	1	0,45	2,66	0,55	0,46	0,04	2,83	0,30	0,56	0,04
	2	0,44	2,67	0,54						
	3	0,51	3,28	0,62						
	4	0,43	2,70	0,54						
M19	1	0,53	2,97	0,62	0,53	0,03	3,22	0,39	0,66	0,04
	2	0,48	3,79	0,71						
	3	0,56	3,16	0,67						
	4	0,54	2,97	0,65						
M20	1	0,52	2,77	0,52	0,53	0,01	3,24	0,33	0,62	0,07
	2	0,53	3,37	0,67						
	3	0,53	3,29	0,62						
	4	0,54	3,54	0,68						
M21	1	0,50	2,80	0,61	0,51	0,08	3,08	0,62	0,62	0,10
	2	0,50	2,92	0,61						
	3	0,41	2,62	0,51						
	4	0,61	3,99	0,76						
M22	1	0,54	3,10	0,65	0,60	0,10	3,34	0,44	0,72	0,11
	2	0,50	2,87	0,60						
	3	0,72	3,54	0,85						
	4	0,62	3,86	0,77						

Tabla 4.9.d: Rugosidad obtenida en los moldes (continuación)

Moldes	Caras	Ra (μm)	Rz (μm)	Rq (μm)	Ra prom (μm)	Desv Est (μm)	Rz prom (μm)	Desv Est (μm)	Rq prom (μm)	Desv Est (μm)
M23	1	0,53	3,05	0,64	0,56	0,05	3,58	0,67	0,70	0,08
	2	0,53	3,22	0,66						
	3	0,56	3,51	0,69						
	4	0,63	4,55	0,82						
M24	1	0,58	4,09	0,75	0,56	0,05	3,64	0,50	0,70	0,08
	2	0,52	3,34	0,65						
	3	0,51	3,10	0,61						
	4	0,61	4,03	0,77						
M25	1	0,81	4,37	1,00	0,88	0,09	4,76	0,28	1,07	0,08
	2	0,83	4,91	1,01						
	3	1,02	5,02	1,18						
	4	0,87	4,74	1,07						
M26	1	0,70	3,95	0,83	0,69	0,04	3,87	0,16	0,81	0,04
	2	0,70	4,04	0,82						
	3	0,71	3,79	0,84						
	4	0,63	3,68	0,76						
M27	1	0,62	3,69	0,80	0,56	0,06	3,29	0,47	0,69	0,10
	2	0,52	2,91	0,59						
	3	0,50	2,87	0,62						
	4	0,61	3,70	0,76						

4.7 Resultados de los valores de rugosidad aritmética Ra (μm) obtenidos por cada molde

Los resultados obtenidos para cada combinación de parámetros, se encuentran en la tabla 4.10, cuyos valores también se pueden observar en las figuras 4.9, 4.10 y 4.11.

Tabla 4.10: Rugosidad aritmética promedio Ra (μm)
obtenidas para las distintas combinaciones/moldes

Parámetros		d1	d2	d3
f1	Vc1	0,31	0,41	0,43
	Vc2	0,28	0,35	0,37
	Vc3	0,28	0,34	0,36
f2	Vc1	0,46	0,51	0,52
	Vc2	0,46	0,45	0,48
	Vc3	0,45	0,45	0,46
f3	Vc1	0,53	0,60	0,88
	Vc2	0,53	0,56	0,69
	Vc3	0,51	0,56	0,56

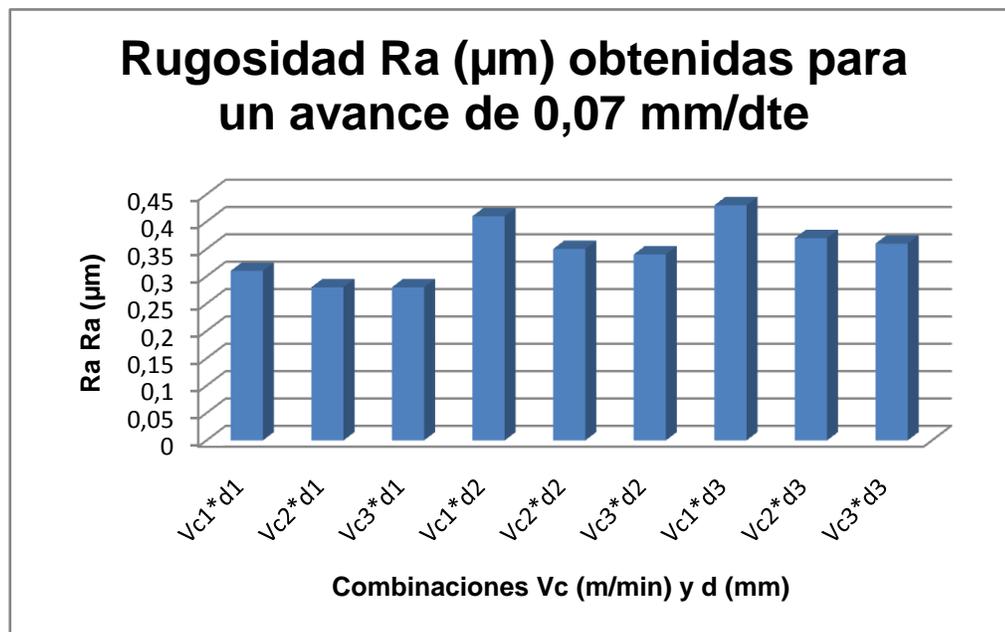


Figura 4.9: Rugosidad obtenida para un avance de 0,07 mm/dte y combinaciones de Vc y d.

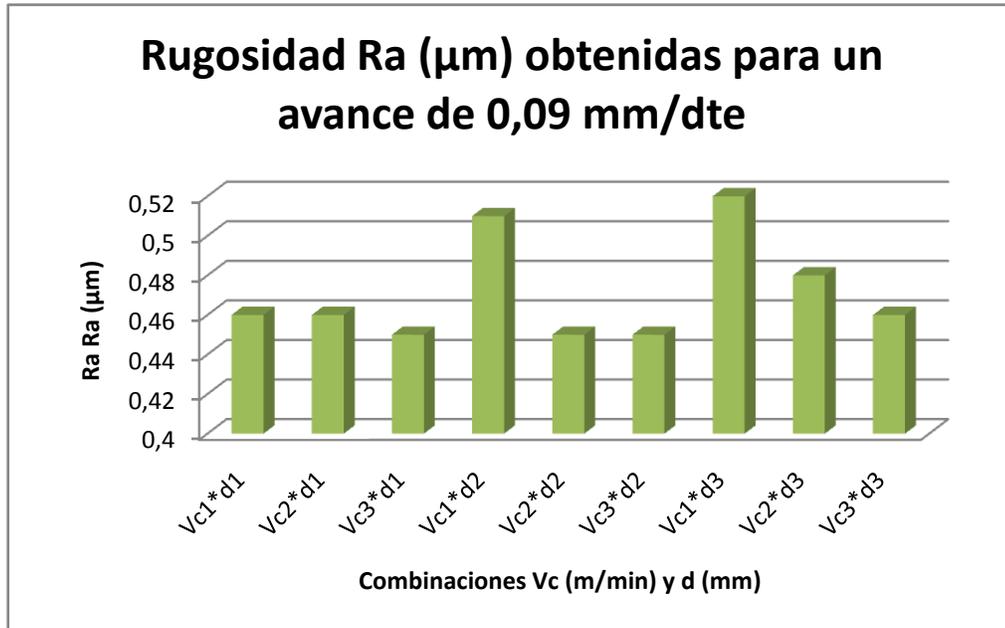


Figura 4.10: Rugosidad obtenida para un avance de 0,09 mm/dte y combinaciones de Vc y d.

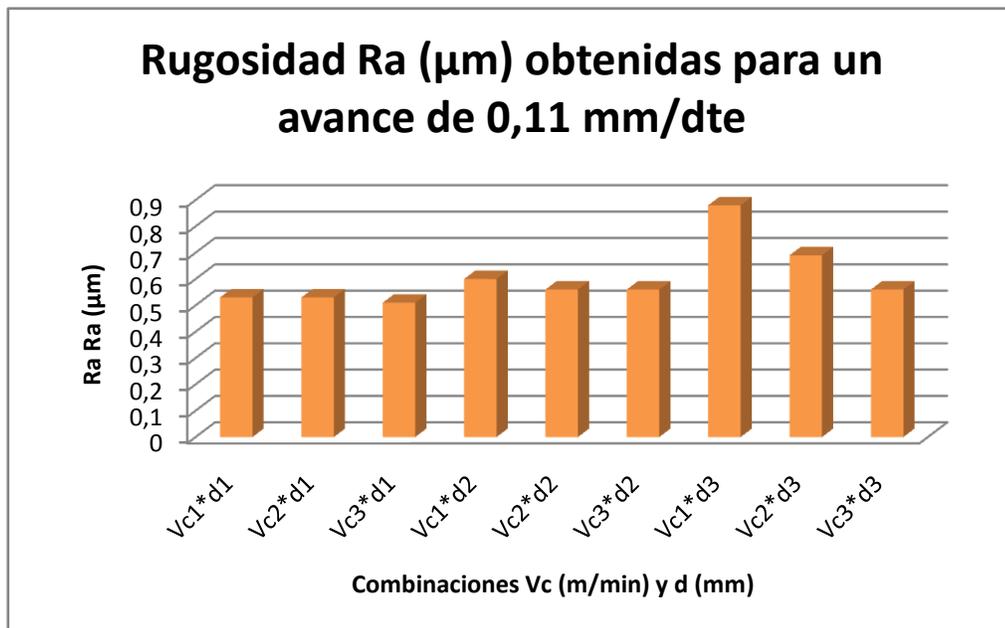


Figura 4.11: Rugosidad obtenida para un avance de 0,11 mm/dte y combinaciones de Vc y d.

4.8 Resultados de los perfiles de rugosidad aritmética Ra (μm) obtenidos por cada molde

A continuación se presentan los resultados de los perfiles obtenidos en los moldes. Por razones de espacio, se publicó en este capítulo sólo veintisiete perfiles, un sólo perfil representativo (de los cuatro) de cada molde o combinación de parámetros utilizados, distribuidos en las gráficas 4.9, 4.10 y 4.11.

El número que encuentra entre paréntesis, en las leyendas de los perfiles, representa la cara del molde, cuyo perfil es el más representativo de los cuatro perfiles determinados para cada cavidad.

La cantidad de perfiles totales (108) fueron publicados en el anexo 4 del presente trabajo de grado.

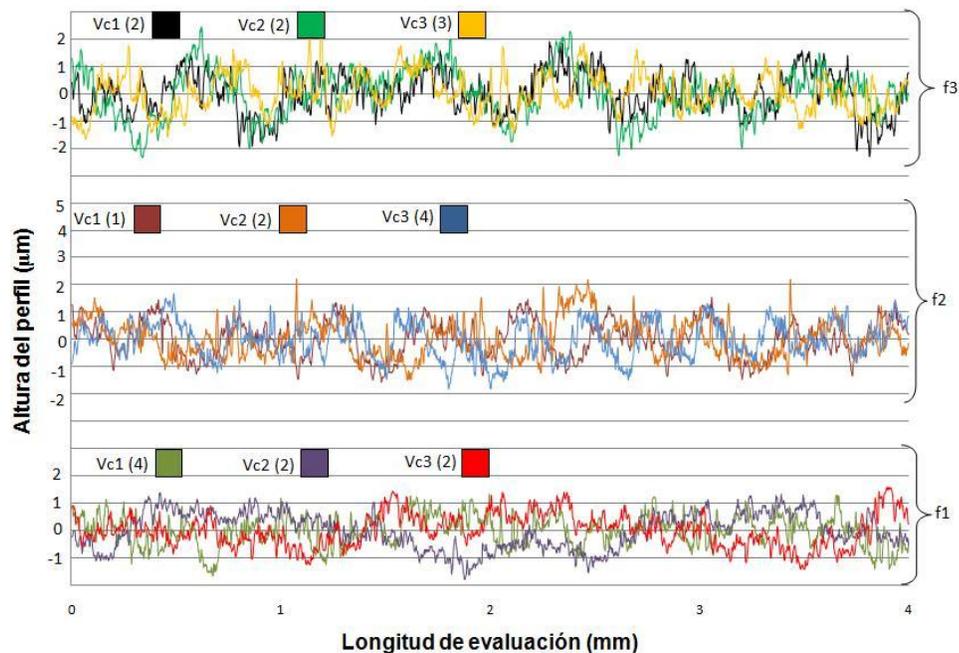


Figura 4.12: Perfiles obtenidos para una profundidad de 0,3 mm (d_1)

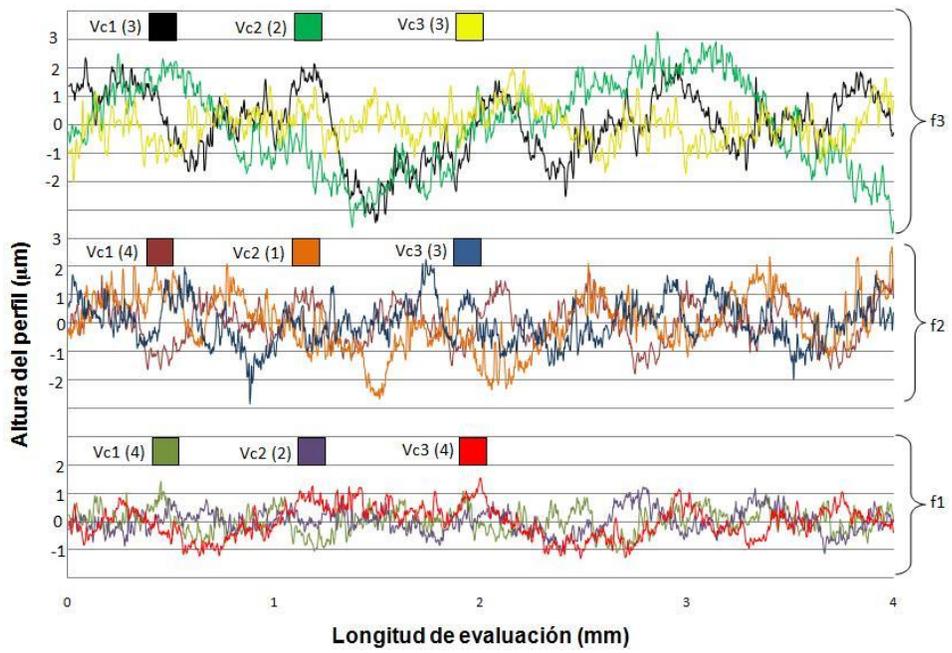


Figura 4.13: Perfiles obtenidos para una profundidad de 0,6 mm (d2)

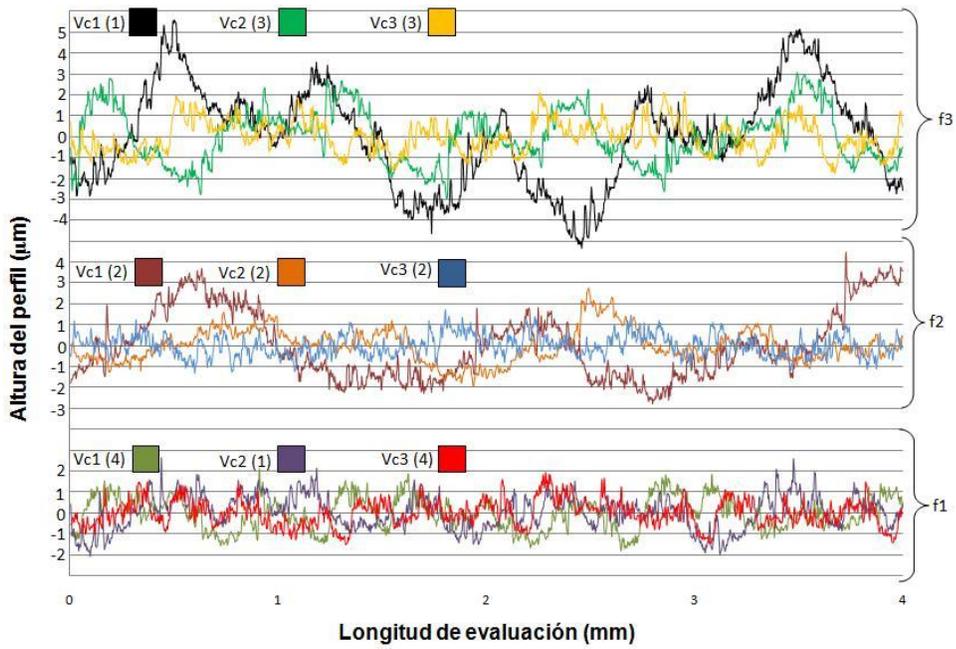


Figura 4.14: Perfiles obtenidos para una profundidad de 0,9 mm (d3)

4.9 Resultados del análisis de varianza (ANOVA) a las muestras de rugosidad obtenidas

Se efectuaron análisis de varianza multifactorial a los resultados obtenidos de rugosidad R_a (μm), siendo 108 los valores en total; lo que permitió, de manera cuantitativa y porcentual, establecer individualmente la influencia de las variables de estudio (f , d , V_c), así como también la influencia que tuvieron la interacción entre sí de dichas variables, en la rugosidad superficial obtenida. Para esto se utilizó el modelo del “factorial completo” (full factorial), que permitió obtener el efecto generado por la interacción entre las variables $d*V_c$, $d*f$, V_c*f , y $d*V_c*f$.

Para el análisis de varianza multifactorial (ANOVA) se utilizó el software estadístico SPSS® versión 14, para Windows®. La tabla 4.11 muestra Las variables, los valores tomados por dichas variables, así como las etiquetas de las variables utilizadas. En la tabla 4.12 se presentan los resultados obtenidos del ANOVA, indicando el grado de correlación obtenido en el modelo, las sumas de los cuadrados de las desviaciones, el factor F (F test) y el porcentaje de contribución P en la rugosidad obtenida, para cada factor. Los análisis se realizaron con un nivel de significancia del 5%, lo que conllevó a tener un nivel de confiabilidad de 95%.

Tabla 4.11: Factores inter-sujetos empleados para el análisis de varianza multifactorial

Variabes	Valores	Etiqueta de la Variable	N^d
Profundidad (mm)	0,3	d1	36
	0,6	d2	36
	0,9	d3	36
Velocidad de corte (m/min)	100	Vc1	36
	130	Vc2	36
	150	Vc3	36
Avance (mm/dte)	0,07	f1	36
	0,09	f2	36
	0,11	f3	36

^d Número de ensayos donde está involucrada la variable

Tabla 4.12: Resultados del análisis de varianza multifactorial

Variable dependiente: Rugosidad Ra (µm). Material acero AISI H13					
Variable	Suma de cuadrados (tipo III)	GL^a	Media Cuadrática (Varianza)	F	P^b (%)
d (mm)	0,19	2	0,10	36,41	10,09
Vc (m/min)	0,11	2	0,06	20,97	5,81
f (mm/dte)	1,16	2	0,58	216,58	60,03
d * Vc	0,06	4	0,01	5,23	2,90
d * f	0,10	4	0,02	9,29	5,15
Vc * f	0,02	4	0,01	2,25	1,25
d * Vc * f	0,07	8	0,01	3,19	3,54
Error	0,22	81	0,00		11,23
Total	1,92	108			100,00

Coefficiente de correlación del modelo: $R^2 = 0,992$ (R^2 corregido 0,989)

^a Grados de Libertad

^b Porcentaje de contribución

Los resultados del porcentaje de contribución, se pueden observar gráficamente en la figura 4.15.

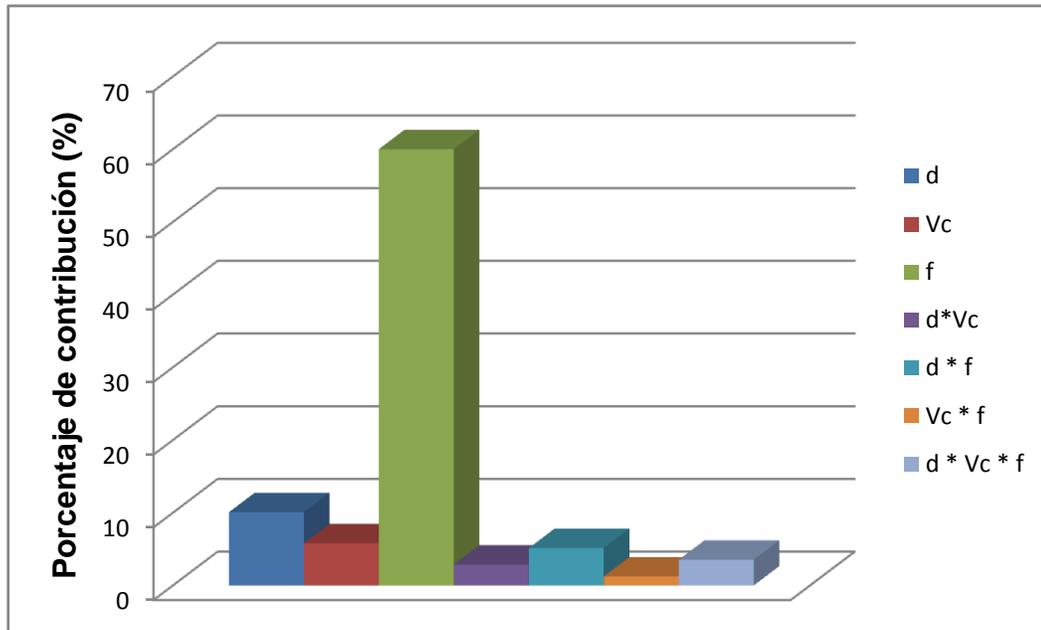


Figura 4.15: Contribución de las variables de estudio en la rugosidad Ra

4.10 Influencia del avance de la herramienta en la rugosidad aritmética promedio (Ra)

La influencia del avance de la herramienta resultó significativa, como se puede observar en el análisis de varianza, arrojando un 60,03% de contribución en la rugosidad; siendo ésta variable la más significativa de todas, coincidiendo con los resultados obtenidos por Bernardos y Vosniakos (2002) quienes presentaron que el avance (y la profundidad de corte), son los parámetros más relevantes en la rugosidad superficial para operaciones de fresado. Las combinaciones de los factores en los cuales estaba presente el avance ($d*f$, $Vc*f$, $d*Vc*f$) resultaron poco significativas, ya que entre las tres se alcanza menos del 10% (9,94%) de contribución, por lo que refleja que para el proceso de mecanizado de moldes en AISI H13, el avance por sí sólo, es la variable que influye notablemente en la rugosidad superficial.

Estos resultados se respaldaron, observando los valores de rugosidad obtenidos, para combinaciones en las que sólo se variaba el avance, como por ejemplo en los moldes M1, M10 y M19, o para las combinaciones M4, M13 y M22, y cualquier otra combinación en las que sólo se varió el avance, estuvo presente la tendencia de que a mayores avances, la rugosidad obtenida fue mayor, y viceversa.

El avance influyó en la rugosidad superficial de tal manera, ya que éste es el parámetro que define la altura de la huella dejada por la herramienta, sobre el material de trabajo, a través del movimiento que dicha herramienta realiza. A mayores avances, se genera una mayor huella sobre la superficie del material, lo que se traduce en una mayor rugosidad superficial, mientras que ésta se ve disminuida cuando disminuye el avance, como se observa en la figura 4.16:

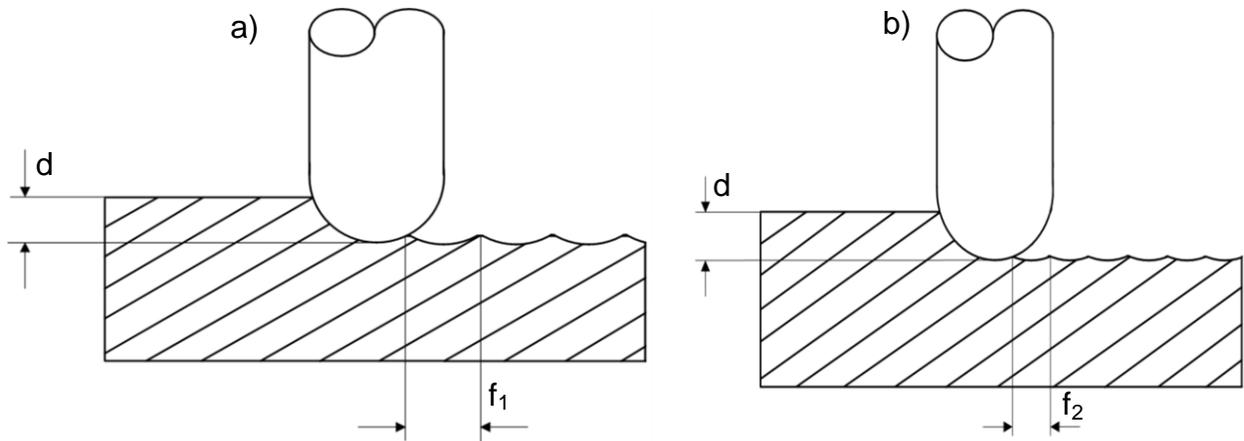


Figura 4.16: Influencia del avance sobre la rugosidad superficial, en el fresado CNC con insertos de punta esférica. a) Avance alto b) Avance bajo

La influencia del avance en los valores obtenidos de la rugosidad superficial, así como la influencia de las demás variables, se pueden apreciar en la figura 4.17. Esta figura fue realizada mediante un algoritmo de MatLab® y muestra en un gráfico de 3 dimensiones, el comportamiento de la rugosidad

media aritmética, dejando constante uno de los parámetros y mostrando la variación de la rugosidad, en función de las otras dos variables.

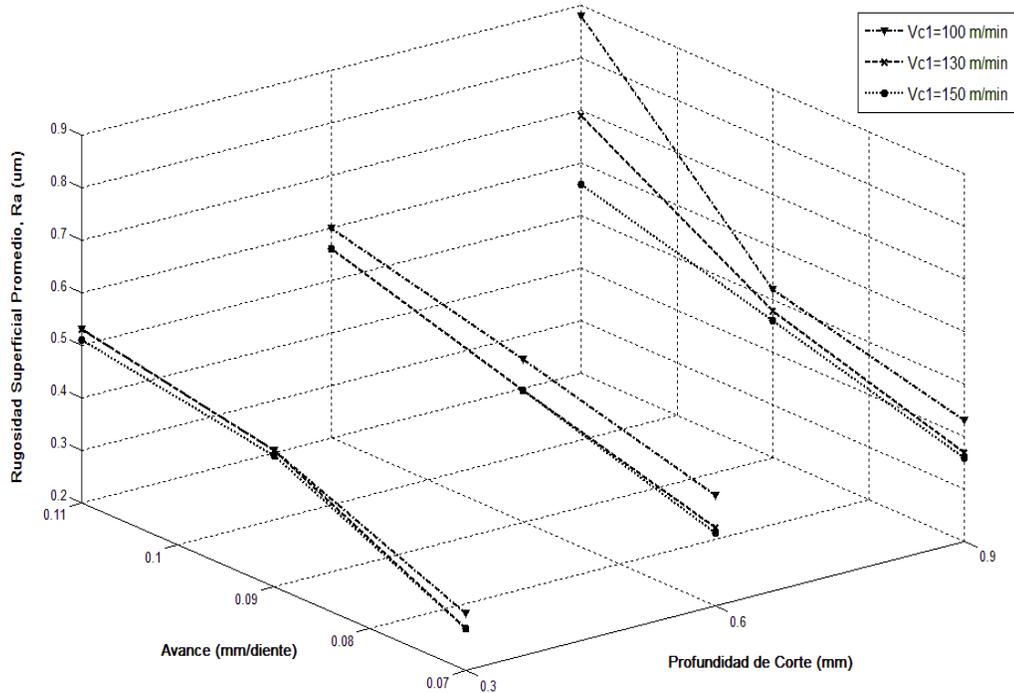


Figura 4.17: Comportamiento de la rugosidad aritmética promedio en función del avance, profundidad y velocidad de corte

4.11 Influencia de la profundidad de corte de la herramienta en la rugosidad aritmética promedio (Ra)

A pesar de que la profundidad de corte no debería influir en la rugosidad superficial, ya que no modifica la huella dejada por la herramienta sobre el material, como se observa en la figura 4.18; se obtuvo que al aumentar ésta (la profundidad de corte) aumentaba la rugosidad. Esto se debe a que al aumentar la profundidad de corte, es mayor la cantidad de material que se tiene que remover, por lo que se genera un mayor esfuerzo entre la herramienta y el material, el cual provoca vibración, lo que pudo ser evidenciado al momento en que se realizaba el mecanizado, por el alto ruido que este generaba, en comparación de aquellos moldes mecanizados con la

profundidad de corte más baja. Esta vibración genera un aumento de la rugosidad, ya que genera una rápida pérdida de los filos de la herramienta, debido a que el acero AISI H13 posee una alta dureza, lo que hace que el inserto pierda sus propiedades cortantes, y no genere un corte limpio de material, realizando desprendimientos y cortes imperfectos.

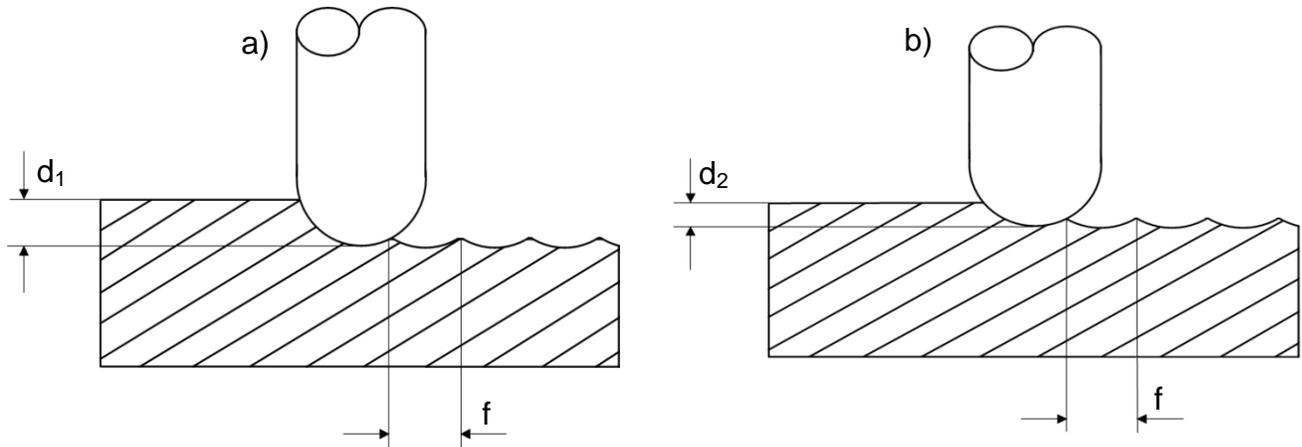


Figura 4.18: Influencia de la profundidad de corte sobre la rugosidad superficial, en el fresado CNC con insertos de punta esférica. a) Profundidad alta b) Profundidad baja

La profundidad de corte tuvo cierta influencia en la rugosidad superficial, resultado obtenido del análisis de varianza multifactorial, siendo la contribución de la mencionada variable de 10,09%, y la contribución por la interacción de la profundidad de corte con las demás variables ($d \cdot V_c$, $d \cdot f$, $d \cdot V_c \cdot f$) suman 11,59%; lo que demostró que este parámetro afecta de cierta manera, la rugosidad superficial, y que el efecto que éste generó, dependió también de la interacción de las otras variables.

Este resultado se evidenció al observar como varían los valores de rugosidad, en las combinaciones de moldes mecanizados con profundidades de corte distintas, y manteniendo la velocidad de corte y el avance constante. Ejemplo de esto se encuentran las combinaciones de moldes como: M1, M4 y M7; o también M10, M13 y M16, (y cualquier otra combinación que mantenga la relación antes mencionada), que mostraron que en la medida que aumentó

la profundidad de corte, aumentó la rugosidad y viceversa; cuyos aumentos resultaron muy bajos para el menor avance estudiado, pero se obtuvieron altos aumentos para el mayor avance estudiado.

De allí se tiene que la influencia que posee la profundidad de corte con la interacción de las demás variables de estudio, sí influyen notablemente en la variación de la rugosidad, aspecto al que anteriormente se hizo mención. Esto se pudo evidenciar también, mediante la figura 4.15.

4.12 Influencia de la velocidad de corte de la herramienta en la rugosidad aritmética promedio (Ra)

La velocidad de corte fue la que menos influyó en la rugosidad superficial, en tal sentido de que al variar éste parámetro, dejando los demás constantes, para prácticamente cualquier combinación, no influyeron notoriamente en los valores de la rugosidad superficial, sin importar la interacción entre las demás variables. Sin embargo se pudo observar que al aumentar la velocidad de corte, disminuyó la rugosidad superficial, y viceversa. Este comportamiento fue coincidente con los obtenidos por Rashid et al. (2009), quienes en sus ensayos de rugosidad, la mayoría de las muestras obtuvieron también esta tendencia.

Esta relación se debe a que a bajas velocidades, el corte del material no resulta óptimo, y se tiene más bien un desprendimiento o desgarramiento entre el material y la herramienta, lo que conlleva a obtener mayores valores de rugosidad. Para velocidades de corte altas, se generan altas velocidades de rotación de la herramienta, lo que permite que los filos de la herramienta pasen más veces por el mismo punto del material, removiendo cierta cantidad de material que quizás no pudo haber sido removido en instantes anteriores.

Del análisis de varianza realizado se obtuvo un valor de contribución de 5,81% para la influencia solamente de la velocidad de corte, y de la

interacción de ésta con las demás ($d \cdot V_c$, $V_c \cdot f$, $d \cdot V_c \cdot f$) un valor total de 7,69%; el valor más bajo obtenido para las interacciones.

Los cambios en los valores de rugosidad, resultaron muy bajos, como se puede apreciar en la tabla 4.9 lo que corroboró los resultados obtenidos mediante el análisis de varianza, que indicó que la contribución de la velocidad de corte en la rugosidad, resultó baja; como también se pudo apreciar en las figuras 4.15 y 4.17.

4.13 Análisis de los parámetros gráficos de los perfiles de rugosidad obtenidos

En los perfiles obtenidos, pueden observarse los elementos en los cuales está compuesto el acabado superficial de un material: rugosidad superficial, ondulaciones, orientaciones y las fallas, descritas en el capítulo 2 del presente trabajo. La rugosidad claramente se puede ver, en los finos espaciados que presentan los perfiles. Esto se observa para las combinaciones que poseen menores valores de avance, que son aquellos perfiles que se encuentran en la zona baja de las figuras 4.12, 4.13 y 4.14.

Las ondulaciones son evidentes en aquellas combinaciones que tienen los valores altos de avance, cuyos perfiles se encuentran en la zona alta de las figuras 4.12, 4.13 y especialmente de la figura 4.14, que representa las combinaciones con mayores valores de avance y profundidad de corte. Estos ciclos resultan lógicos ya que con altos valores de avance y profundidad, se generan altas vibraciones que provocan deflexiones en el material, generando que la trayectoria entre dicho material y la herramienta no sea en línea recta, sino curvo, producto de las fuerzas de reacción que están presentes al profundizar el inserto y moverse con altos avances. Las orientaciones fueron observadas en las caras del material, pero no se presentaron de manera muy resaltante.

Cabe destacar que en los perfiles, se observó que para iguales combinaciones de avance y profundidad de corte, o dicho de otra manera, aquellos perfiles en las zonas altas, medias o bajas de las figuras 4.12, 4.13 y 4.14; los ciclos son menores al aumentar las velocidades de corte, esto fue debido a que disminuyen las ondulaciones producto ya que las vibraciones son menores debido a que el corte del material es más efectivo.

Las fallas, fueron fácilmente detectadas en los perfiles, específicamente en los mostrados en el anexo 4 (ya que en los perfiles presentados en este capítulo, fueron los más característicos de las cuatro caras del molde, por la razón antes mencionada). Estas fallas se evidencian en los perfiles que poseen crestas y valles muy prominentes, que estaban fuera de los patrones y la tendencia regular que tenían los perfiles en que las mencionados crestas y valles aparecieron. Esto se atribuyó a defectos puntuales que poseía el material, producto de la etapa de mecanizado, ya que por haber sido maquinado el acero AISI H13, sin la utilización de fluido refrigerante para corte, se pudo haber acumulado material en los filos o labios de la herramienta, provocando un entorpecimiento del arranque efectivo de viruta. Pudo ser atribuido también a la no homogeneidad de dureza o densidad del material que pudiese haber tenido, y poseer ciertas zonas blandas que provocasen desprendimientos del material (fenómeno común en los materiales blandos) así como también puede atribuírsele al daño causado por la viruta enredada entre la herramienta y el material de trabajo.

Los perfiles presentaron en su mayoría, como ya se hizo mención anteriormente, un comportamiento cíclico a lo largo de la longitud estudiada. Otras de las diferencias entre los perfiles, fue el paso de las irregularidades, que es el espaciado o la distancia que hubo entre las crestas y valles consecutivos. Los perfiles cuyas gráficas presentan menor paso de irregularidades de perfil, fueron la de los ensayos realizados con los avances

más bajos, influyendo muy poco la profundidad de corte, como se puede apreciar en las figuras 4.12, 4.13 y 4.14.

Por el contrario, las curvas de los perfiles que presentaron mayor paso de irregularidades de perfil, fueron las de aquellos moldes mecanizados con el avance más alto, lo que se tradujo en un mayor valor de rugosidad. Esto se debe a que a mayor sea el avance por diente que posee la herramienta, mayor será la longitud de la huella dejada por la herramienta sobre el material, y por ende mayor rugosidad.

También se pudo observar en los perfiles obtenidos, que a medida que se aumentó el avance, también aumentaron las alturas de las irregularidades o amplitud del perfil, lo que se tradujo en un aumento de las alturas y las profundidades de picos y valles respectivamente, aumentando lógicamente el valor de la rugosidad aritmética promedio, ya que como se expuso anteriormente en el capítulo 2, la rugosidad aritmética promedio depende de los módulos (valores absolutos) de las alturas y profundidades de crestas y valles respectivamente, presentes en las irregularidades en una superficie, y no tanto de las ondulaciones ni orientaciones. La combinación de parámetros que tuvo mayor amplitud fue $V_{c1,f3,d3}$, lo cual coincide lógicamente, ya que esta combinación posee la menor velocidad de corte, el mayor avance y la mayor profundidad de corte, y cuyos efectos ya se han expuesto precedentemente.

CAPÍTULO 5

Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

- La rugosidad superficial obtenida para una operación de cavidades está influenciada notoriamente por el avance, ya que para el mecanizado de moldes en acero AISI H13, los resultados arrojaron un 60,03% de contribución. Este es el parámetro al que más se le atribuye al efecto de la rugosidad, en la cual se tiene una relación directa, ya que al aumentar el avance de la herramienta, aumenta también la rugosidad y viceversa.
- La profundidad de corte poco influye en la rugosidad superficial, para el tipo de mecanizado utilizado en el presente trabajo de grado, obteniéndose un porcentaje de contribución de 10,09%, presentando una relación directa, donde al aumentar la profundidad de corte, aumenta en cierta medida la rugosidad, y viceversa.
- La velocidad de corte influye muy poco en la rugosidad superficial, apenas en un 5,81%. Sin embargo este parámetro, muestra una relación inversa donde al aumentar la velocidad de corte en la herramienta, disminuye sutilmente la rugosidad superficial.
- Los perfiles de rugosidad permiten obtener el comportamiento de la superficie, en la longitud medida, lo que hace reconocer defectos

puntuales en el material como por ejemplo las fallas en el material, como inclusiones o desgarres, que no pertenecen a la huella común dejada por el mecanizado, también permiten observar los efectos de las ondulaciones y orientaciones que están presentes en la superficie mecanizada.

- El acero AISI H13, ciertamente posee buenas condiciones de pulido, ya que todos los valores de rugosidad superficial obtenidos, fueron relativamente bajos, sin necesidad de haber utilizado procesos de mecanizado posteriores al fresado, como el rectificado.
- La amplitud del perfil está relacionada mayormente con los valores de avances, para altos avances, mayor será la amplitud, y viceversa.

5.2 Recomendaciones

- Analizar la influencia de la geometría de la herramienta en la rugosidad superficial.
- Analizar la influencia del uso de fluido refrigerante para corte en la rugosidad superficial.
- Analizar la influencia de la estrategia de mecanizado (trayectoria) en la rugosidad superficial.

CAPÍTULO 5

Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

- La rugosidad superficial obtenida para una operación de cavidades está influenciada notoriamente por el avance, ya que para el mecanizado de moldes en acero AISI H13, los resultados arrojaron un 60,03% de contribución. Este es el parámetro al que más se le atribuye al efecto de la rugosidad, en la cual se tiene una relación directa, ya que al aumentar el avance de la herramienta, aumenta también la rugosidad y viceversa.
- La profundidad de corte poco influye en la rugosidad superficial, para el tipo de mecanizado utilizado en el presente trabajo de grado, obteniéndose un porcentaje de contribución de 10,09%, presentando una relación directa, donde al aumentar la profundidad de corte, aumenta en cierta medida la rugosidad, y viceversa.
- La velocidad de corte influye muy poco en la rugosidad superficial, apenas en un 5,81%. Sin embargo este parámetro, muestra una relación inversa donde al aumentar la velocidad de corte en la herramienta, disminuye sutilmente la rugosidad superficial.
- Los perfiles de rugosidad permiten obtener el comportamiento de la superficie, en la longitud medida, lo que hace reconocer defectos

puntuales en el material como por ejemplo las fallas en el material, como inclusiones o desgarres, que no pertenecen a la huella común dejada por el mecanizado, también permiten observar los efectos de las ondulaciones y orientaciones que están presentes en la superficie mecanizada.

- El acero AISI H13, ciertamente posee buenas condiciones de pulido, ya que todos los valores de rugosidad superficial obtenidos, fueron relativamente bajos, sin necesidad de haber utilizado procesos de mecanizado posteriores al fresado, como el rectificado.
- La amplitud del perfil está relacionada mayormente con los valores de avances, para altos avances, mayor será la amplitud, y viceversa.

5.2 Recomendaciones

- Analizar la influencia de la geometría de la herramienta en la rugosidad superficial.
- Analizar la influencia del uso de fluido refrigerante para corte en la rugosidad superficial.
- Analizar la influencia de la estrategia de mecanizado (trayectoria) en la rugosidad superficial.

CÓDIGO CNC MOLDE 1

O0000
(PROGRAM NAME - MOLDE LUIS ALDANA M1)
(DATE=DD-MM-YY - 18-03-11 TIME=HH:MM - 17:13)
N100 G21
N102 G0 G17 G40 G49 G80 G90
(TOOL - 7 DIA. OFF. - 7 LEN. - 7 DIA. - 10.)
N104 T7 M6
N106 G0 G90 G54 X-74.2 Y-126.175 A0. S3180 M3
N108 G43 H7 Z25.
N110 Z5.
N112 G1 Z-.3 F100.
N114 X-47.6 F890.
N116 Y-102.575
N118 X-74.2
N120 Y-126.175
N122 Z-.6 F100.
N124 X-47.6 F890.
N126 Y-102.575
N128 X-74.2
N130 Y-126.175
N132 Z-.9 F100.
N134 X-47.6 F890.
N136 Y-102.575
N138 X-74.2
N140 Y-126.175
N142 Z-1.2 F100.
N144 X-47.6 F890.
N146 Y-102.575
N148 X-74.2
N150 Y-126.175
N152 Z-1.5 F100.
N154 X-47.6 F890.
N156 Y-102.575
N158 X-74.2
N160 Y-126.175
N162 Z-1.8 F100.
N164 X-47.6 F890.
N166 Y-102.575
N168 X-74.2
N170 Y-126.175
N172 Z-2.1 F100.
N174 X-47.6 F890.
N176 Y-102.575
N178 X-74.2
N180 Y-126.175
N182 Z-2.4 F100.
N184 X-47.6 F890.
N186 Y-102.575
N188 X-74.2

N190 Y-126.175
N192 Z-2.7 F100.
N194 X-47.6 F890.
N196 Y-102.575
N198 X-74.2
N200 Y-126.175
N202 Z-3. F100.
N204 X-47.6 F890.
N206 Y-102.575
N208 X-74.2
N210 Y-126.175
N212 Z-3.3 F100.
N214 X-47.6 F890.
N216 Y-102.575
N218 X-74.2
N220 Y-126.175
N222 Z-3.6 F100.
N224 X-47.6 F890.
N226 Y-102.575
N228 X-74.2
N230 Y-126.175
N232 Z-3.9 F100.
N234 X-47.6 F890.
N236 Y-102.575
N238 X-74.2
N240 Y-126.175
N242 Z-4.2 F100.
N244 X-47.6 F890.
N246 Y-102.575
N248 X-74.2
N250 Y-126.175
N252 Z-4.5 F100.
N254 X-47.6 F890.
N256 Y-102.575
N258 X-74.2
N260 Y-126.175
N262 Z-4.8 F100.
N264 X-47.6 F890.
N266 Y-102.575
N268 X-74.2
N270 Y-126.175
N272 Z-5.1 F100.
N274 X-47.6 F890.
N276 Y-102.575
N278 X-74.2
N280 Y-126.175
N282 Z-5.4 F100.
N284 X-47.6 F890.
N286 Y-102.575
N288 X-74.2
N290 Y-126.175

N292 Z-5.7 F100.
N294 X-47.6 F890.
N296 Y-102.575
N298 X-74.2
N300 Y-126.175
N302 Z-6. F100.
N304 X-47.6 F890.
N306 Y-102.575
N308 X-74.2
N310 Y-126.175
N312 Z-6.3 F100.
N314 X-47.6 F890.
N316 Y-102.575
N318 X-74.2
N320 Y-126.175
N322 Z-6.6 F100.
N324 X-47.6 F890.
N326 Y-102.575
N328 X-74.2
N330 Y-126.175
N332 Z-6.9 F100.
N334 X-47.6 F890.
N336 Y-102.575
N338 X-74.2
N340 Y-126.175
N342 Z-7.2 F100.
N344 X-47.6 F890.
N346 Y-102.575
N348 X-74.2
N350 Y-126.175
N352 Z-7.5 F100.
N354 X-47.6 F890.
N356 Y-102.575
N358 X-74.2
N360 Y-126.175
N362 Z-7.8 F100.
N364 X-47.6 F890.
N366 Y-102.575
N368 X-74.2
N370 Y-126.175
N372 Z-8.1 F100.
N374 X-47.6 F890.
N376 Y-102.575
N378 X-74.2
N380 Y-126.175
N382 Z-8.4 F100.
N384 X-47.6 F890.
N386 Y-102.575
N388 X-74.2
N390 Y-126.175
N392 Z-8.7 F100.

N394 X-47.6 F890.
N396 Y-102.575
N398 X-74.2
N400 Y-126.175
N402 Z-9. F100.
N404 X-47.6 F890.
N406 Y-102.575
N408 X-74.2
N410 Y-126.175
N412 Z-9.3 F100.
N414 X-47.6 F890.
N416 Y-102.575
N418 X-74.2
N420 Y-126.175
N422 Z-9.6 F100.
N424 X-47.6 F890.
N426 Y-102.575
N428 X-74.2
N430 Y-126.175
N432 Z-9.9 F100.
N434 X-47.6 F890.
N436 Y-102.575
N438 X-74.2
N440 Y-126.175
N442 Z-10.2 F100.
N444 X-47.6 F890.
N446 Y-102.575
N448 X-74.2
N450 Y-126.175
N452 Z-10.5 F100.
N454 X-47.6 F890.
N456 Y-102.575
N458 X-74.2
N460 Y-126.175
N462 Z-10.8 F100.
N464 X-47.6 F890.
N466 Y-102.575
N468 X-74.2
N470 Y-126.175
N472 Z-11.1 F100.
N474 X-47.6 F890.
N476 Y-102.575
N478 X-74.2
N480 Y-126.175
N482 Z-11.4 F100.
N484 X-47.6 F890.
N486 Y-102.575
N488 X-74.2
N490 Y-126.175
N492 Z-11.7 F100.
N494 X-47.6 F890.

N496 Y-102.575
N498 X-74.2
N500 Y-126.175
N502 Z-12. F100.
N504 X-47.6 F890.
N506 Y-102.575
N508 X-74.2
N510 Y-126.175
N512 Z-12.3 F100.
N514 X-47.6 F890.
N516 Y-102.575
N518 X-74.2
N520 Y-126.175
N522 Z-12.6 F100.
N524 X-47.6 F890.
N526 Y-102.575
N528 X-74.2
N530 Y-126.175
N532 Z-12.9 F100.
N534 X-47.6 F890.
N536 Y-102.575
N538 X-74.2
N540 Y-126.175
N542 Z-13.2 F100.
N544 X-47.6 F890.
N546 Y-102.575
N548 X-74.2
N550 Y-126.175
N552 Z-13.5 F100.
N554 X-47.6 F890.
N556 Y-102.575
N558 X-74.2
N560 Y-126.175
N562 Z-13.8 F100.
N564 X-47.6 F890.
N566 Y-102.575
N568 X-74.2
N570 Y-126.175
N572 Z-14.1 F100.
N574 X-47.6 F890.
N576 Y-102.575
N578 X-74.2
N580 Y-126.175
N582 Z-14.4 F100.
N584 X-47.6 F890.
N586 Y-102.575
N588 X-74.2
N590 Y-126.175
N592 Z-14.7 F100.
N594 X-47.6 F890.
N596 Y-102.575

N598 X-74.2
N600 Y-126.175
N602 Z-15. F100.
N604 X-47.6 F890.
N606 Y-102.575
N608 X-74.2
N610 Y-126.175
N612 Z-15.3 F100.
N614 X-47.6 F890.
N616 Y-102.575
N618 X-74.2
N620 Y-126.175
N622 Z-15.6 F100.
N624 X-47.6 F890.
N626 Y-102.575
N628 X-74.2
N630 Y-126.175
N632 Z-15.9 F100.
N634 X-47.6 F890.
N636 Y-102.575
N638 X-74.2
N640 Y-126.175
N642 Z-16.2 F100.
N644 X-47.6 F890.
N646 Y-102.575
N648 X-74.2
N650 Y-126.175
N652 Z-16.5 F100.
N654 X-47.6 F890.
N656 Y-102.575
N658 X-74.2
N660 Y-126.175
N662 Z-16.8 F100.
N664 X-47.6 F890.
N666 Y-102.575
N668 X-74.2
N670 Y-126.175
N672 Z-17.1 F100.
N674 X-47.6 F890.
N676 Y-102.575
N678 X-74.2
N680 Y-126.175
N682 Z-17.4 F100.
N684 X-47.6 F890.
N686 Y-102.575
N688 X-74.2
N690 Y-126.175
N692 Z-17.7 F100.
N694 X-47.6 F890.
N696 Y-102.575
N698 X-74.2

N700 Y-126.175
N702 Z-18. F100.
N704 X-47.6 F890.
N706 Y-102.575
N708 X-74.2
N710 Y-126.175
N712 Z-18.3 F100.
N714 X-47.6 F890.
N716 Y-102.575
N718 X-74.2
N720 Y-126.175
N722 Z-18.6 F100.
N724 X-47.6 F890.
N726 Y-102.575
N728 X-74.2
N730 Y-126.175
N732 Z-18.9 F100.
N734 X-47.6 F890.
N736 Y-102.575
N738 X-74.2
N740 Y-126.175
N742 Z-19.2 F100.
N744 X-47.6 F890.
N746 Y-102.575
N748 X-74.2
N750 Y-126.175
N752 Z-19.5 F100.
N754 X-47.6 F890.
N756 Y-102.575
N758 X-74.2
N760 Y-126.175
N762 Z-19.8 F100.
N764 X-47.6 F890.
N766 Y-102.575
N768 X-74.2
N770 Y-126.175
N772 Z-20.1 F100.
N774 X-47.6 F890.
N776 Y-102.575
N778 X-74.2
N780 Y-126.175
N782 Z-20.4 F100.
N784 X-47.6 F890.
N786 Y-102.575
N788 X-74.2
N790 Y-126.175
N792 Z-20.7 F100.
N794 X-47.6 F890.
N796 Y-102.575
N798 X-74.2
N800 Y-126.175

N802 Z-21. F100.
N804 X-47.6 F890.
N806 Y-102.575
N808 X-74.2
N810 Y-126.175
N812 Z-21.3 F100.
N814 X-47.6 F890.
N816 Y-102.575
N818 X-74.2
N820 Y-126.175
N822 Z-21.6 F100.
N824 X-47.6 F890.
N826 Y-102.575
N828 X-74.2
N830 Y-126.175
N832 Z-21.9 F100.
N834 X-47.6 F890.
N836 Y-102.575
N838 X-74.2
N840 Y-126.175
N842 Z-22.2 F100.
N844 X-47.6 F890.
N846 Y-102.575
N848 X-74.2
N850 Y-126.175
N852 Z-22.5 F100.
N854 X-47.6 F890.
N856 Y-102.575
N858 X-74.2
N860 Y-126.175
N862 Z-22.8 F100.
N864 X-47.6 F890.
N866 Y-102.575
N868 X-74.2
N870 Y-126.175
N872 Z-23.1 F100.
N874 X-47.6 F890.
N876 Y-102.575
N878 X-74.2
N880 Y-126.175
N882 Z-23.4 F100.
N884 X-47.6 F890.
N886 Y-102.575
N888 X-74.2
N890 Y-126.175
N892 Z-23.7 F100.
N894 X-47.6 F890.
N896 Y-102.575
N898 X-74.2
N900 Y-126.175
N902 Z-24. F100.

N904 X-47.6 F890.
N906 Y-102.575
N908 X-74.2
N910 Y-126.175
N912 Z-24.3 F100.
N914 X-47.6 F890.
N916 Y-102.575
N918 X-74.2
N920 Y-126.175
N922 G0 Z25.
N924 M5
N926 G91 G28 Z0.
N928 G28 X0. Y0. A0.
N930 M30
N104 T7 M6
N106 G0 G90 G54 X-47.6 Y-126.175 A0. S3180 M3
N108 G43 H7 Z2.
N110 Z-18.
N112 G1 Z-24.3 F30.
N114 X-74.2 F890.
N116 Y-102.575
N118 X-47.6
N120 Y-126.175
N122 X-47.9 Y-125.875
N124 X-73.9
N126 Y-102.875
N128 X-47.9
N130 Y-125.875
N132 X-48.2 Y-125.575
N134 X-73.6
N136 Y-103.175
N138 X-48.2
N140 Y-125.575
N142 X-48.5 Y-125.275
N144 X-73.3
N146 Y-103.475
N148 X-48.5
N150 Y-125.275
N152 X-48.8 Y-124.975
N154 X-73.
N156 Y-103.775
N158 X-48.8
N160 Y-124.975
N162 X-49.1 Y-124.675
N164 X-72.7
N166 Y-104.075
N168 X-49.1
N170 Y-124.675
N172 X-49.4 Y-124.375
N174 X-72.4
N176 Y-104.375

N178 X-49.4
N180 Y-124.375
N182 X-49.7 Y-124.075
N184 X-72.1
N186 Y-104.675
N188 X-49.7
N190 Y-124.075
N192 X-50. Y-123.775
N194 X-71.8
N196 Y-104.975
N198 X-50.
N200 Y-123.775
N202 X-50.3 Y-123.475
N204 X-71.5
N206 Y-105.275
N208 X-50.3
N210 Y-123.475
N212 X-50.6 Y-123.175
N214 X-71.2
N216 Y-105.575
N218 X-50.6
N220 Y-123.175
N222 X-50.9 Y-122.875
N224 X-70.9
N226 Y-105.875
N228 X-50.9
N230 Y-122.875
N232 X-51.2 Y-122.575
N234 X-70.6
N236 Y-106.175
N238 X-51.2
N240 Y-122.575
N242 X-51.5 Y-122.275
N244 X-70.3
N246 Y-106.475
N248 X-51.5
N250 Y-122.275
N252 X-51.8 Y-121.975
N254 X-70.
N256 Y-106.775
N258 X-51.8
N260 Y-121.975
N262 X-52.1 Y-121.675
N264 X-69.7
N266 Y-107.075
N268 X-52.1
N270 Y-121.675
N272 X-52.4 Y-121.375
N274 X-69.4
N276 Y-107.375
N278 X-52.4

N280 Y-121.375
N282 X-52.7 Y-121.075
N284 X-69.1
N286 Y-107.675
N288 X-52.7
N290 Y-121.075
N292 X-53. Y-120.775
N294 X-68.8
N296 Y-107.975
N298 X-53.
N300 Y-120.775
N302 X-53.3 Y-120.475
N304 X-68.5
N306 Y-108.275
N308 X-53.3
N310 Y-120.475
N312 X-53.6 Y-120.175
N314 X-68.2
N316 Y-108.575
N318 X-53.6
N320 Y-120.175
N322 X-53.9 Y-119.875
N324 X-67.9
N326 Y-108.875
N328 X-53.9
N330 Y-119.875
N332 X-54.2 Y-119.575
N334 X-67.6
N336 Y-109.175
N338 X-54.2
N340 Y-119.575
N342 X-54.5 Y-119.275
N344 X-67.3
N346 Y-109.475
N348 X-54.5
N350 Y-119.275
N352 X-54.8 Y-118.975
N354 X-67.
N356 Y-109.775
N358 X-54.8
N360 Y-118.975
N362 X-55.1 Y-118.675
N364 X-66.7
N366 Y-110.075
N368 X-55.1
N370 Y-118.675
N372 X-55.4 Y-118.375
N374 X-66.4
N376 Y-110.375
N378 X-55.4
N380 Y-118.375

N382 X-55.7 Y-118.075
N384 X-66.1
N386 Y-110.675
N388 X-55.7
N390 Y-118.075
N392 X-56. Y-117.775
N394 X-65.8
N396 Y-110.975
N398 X-56.
N400 Y-117.775
N402 X-56.3 Y-117.475
N404 X-65.5
N406 Y-111.275
N408 X-56.3
N410 Y-117.475
N412 X-56.6 Y-117.175
N414 X-65.2
N416 Y-111.575
N418 X-56.6
N420 Y-117.175
N422 X-56.9 Y-116.875
N424 X-64.9
N426 Y-111.875
N428 X-56.9
N430 Y-116.875
N432 X-57.2 Y-116.575
N434 X-64.6
N436 Y-112.175
N438 X-57.2
N440 Y-116.575
N442 X-57.5 Y-116.275
N444 X-64.3
N446 Y-112.475
N448 X-57.5
N450 Y-116.275
N452 X-57.8 Y-115.975
N454 X-64.
N456 Y-112.775
N458 X-57.8
N460 Y-115.975
N462 X-58.1 Y-115.675
N464 X-63.7
N466 Y-113.075
N468 X-58.1
N470 Y-115.675
N472 X-58.4 Y-115.375
N474 X-63.4
N476 Y-113.375
N478 X-58.4
N480 Y-115.375
N482 X-58.7 Y-115.075

N484 X-63.1
N486 Y-113.675
N488 X-58.7
N490 Y-115.075
N492 X-59. Y-114.775
N494 X-62.8
N496 Y-113.975
N498 X-59.
N500 Y-114.775
N502 X-59.3 Y-114.475
N504 X-62.5
N506 Y-114.275
N508 X-59.3
N510 Y-114.475
N512 G0 Z2.
N514 M5
N516 G91 G28 Z0.
N518 G28 X0. Y0. A0.
N520 M30

AISI Type H13 Hot Work Tool Steel

Categories: [Metal](#); [Ferrous Metal](#); [Tool Steel](#); [Hot Work Steel](#)

Material Notes: High hardenability, excellent wear resistance and hot toughness. H13 has good thermal shock resistance and will tolerate some water cooling in service. Nitriding will improve hardness, but can diminish shock resistance if hardened layer is too thick. Electroslag Remelted (ESR) H13 has greater homogeneity and an exceptionally fine structure, resulting in improved machinability, polishability and high temperature tensile strength.

Applications: hot work applications: pressure die casting tools, extrusion tools, forging dies, hot shear blades, stamping dies, plastic molds. ESR H13 is great for aluminum die-casting tools and plastic mold tools requiring a very high polish.

Weldability: Pre and Post-heating recommended, can be welded with oxy-acetylene, inert shielded gas and shielded metal arc; Filler should be similar to the base metal.

Key Words: UNS T20813, ASTM A681, FED QQ-T-570, BS 4659 BH13, BS 4659 H13, BS EN ISO 4957 :2000 X40CrMoV5-1, Werkstoff 1.2344

Vendors: [Click here to view all available suppliers for this material.](#)

Please [click here](#) if you are a supplier and would like information on how to add your listing to this material.

Physical Properties	Metric	English	Comments
Density	7.80 g/cc	0.282 lb/in ³	

Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Hardness, Rockwell C	28.0 - 30.0	28.0 - 30.0	air or oil quenched and tempered at 705°C (1300°F).
	31.0 - 33.0	31.0 - 33.0	air or oil quenched and tempered at 675°C (1250°F).
	39.0 - 41.0	39.0 - 41.0	air or oil quenched and tempered at 650°C (1200°F).
	45.0 - 47.0	45.0 - 47.0	air or oil quenched and tempered at 620°C (1150°F).
	49.0 - 51.0	49.0 - 51.0	air or oil quenched and tempered at 595°C (1100°F).
	51.0 - 53.0	51.0 - 53.0	air quenched from 1025°C (1875°F) or oil quenched from 1010°C (1850°F) with no temper, or tempered for 1 hour at 315°C (600°F), 425°C (800°F), and 480°C (900°F).
	51.0 - 53.0	51.0 - 53.0	air or oil quenched and tempered at 565°C (1050°F).
	52.0 - 54.0	52.0 - 54.0	air or oil quenched and tempered at 510°C (950°F) and 540°C (1000°F).
Tensile Strength, Ultimate	1990 MPa	289000 psi	at HRC = 55 (air or oil quenched from 995-1025°C)
Tensile Strength, Yield	1650 MPa	239000 psi	at HRC = 55 (air or oil quenched from 995-1025°C)
Elongation at Break	9.00 %	9.00 %	at HRC = 55 (air or oil quenched from 995-1025°C)
Modulus of Elasticity	210 GPa	30500 ksi	
Bulk Modulus	140 GPa	20300 ksi	Typical for steel.
Poissons Ratio	0.300	0.300	Calculated
Machinability	50 %	50 %	Based on 1% carbon steel. as 100% machinability
Shear Modulus	81.0 GPa	11700 ksi	Estimated from elastic modulus

Thermal Properties	Metric	English	Comments
CTE, linear 	11.0 µm/m-°C @Temperature 25.0 - 95.0 °C	6.11 µin/in-°F @Temperature 77.0 - 203 °F	
	11.5 µm/m-°C @Temperature 25.0 - 205 °C	6.39 µin/in-°F @Temperature 77.0 - 401 °F	
	12.4 µm/m-°C @Temperature 25.0 - 540 °C	6.89 µin/in-°F @Temperature 77.0 - 1000 °F	
Specific Heat Capacity	0.460 J/g-°C @Temperature 0.000 - 100 °C	0.110 BTU/lb-°F @Temperature 32.0 - 212 °F	
Thermal Conductivity 	24.3 W/m-K @Temperature 215 °C	169 BTU-in/hr-ft ² -°F @Temperature 419 °F	
	24.3 W/m-K @Temperature 475 °C	169 BTU-in/hr-ft ² -°F @Temperature 887 °F	
	24.4 W/m-K @Temperature 350 °C	169 BTU-in/hr-ft ² -°F @Temperature 662 °F	
	24.7 W/m-K @Temperature 605 °C	171 BTU-in/hr-ft ² -°F @Temperature 1120 °F	

Processing Properties	Metric	English	Comments
Processing Temperature	540 - 650 °C	1000 - 1200 °F	Tempering Temperature
	995 - 1040 °C	1820 - 1900 °F	Hardening Temperature
Annealing Temperature	845 - 900 °C	1550 - 1650 °F	

Component Elements Properties	Metric	English	Comments
Carbon, C	0.320 - 0.40 %	0.320 - 0.40 %	
Chromium, Cr	5.13 - 5.25 %	5.13 - 5.25 %	
Iron, Fe	>= 90.95 %	>= 90.95 %	as remainder

Molybdenum, Mo	1.33 - 1.40 %	1.33 - 1.40 %
Silicon, Si	1.0 %	1.0 %
Vanadium, V	1.0 %	1.0 %

Descriptive Properties

Annealing Temperature	850 - 870°C for 4 hours	furnace cool 20°C per hour max.
Stress Relieving Temperature	600 - 650°C for 2 hours (approx.)	cool in still air; always stress relief before hardening.

[References](#) for this datasheet.

Some of the values displayed above may have been converted from their original units and/or rounded in order to display the information in a consistent format. Users requiring more precise data for scientific or engineering calculations can click on the property value to see the original value as well as raw conversions to equivalent units. We advise that you only use the original value or one of its raw conversions in your calculations to minimize rounding error. We also ask that you refer to MatWeb's disclaimer and terms of use regarding this information. [Click here](#) to view all the property values for this datasheet as they were originally entered into MatWeb.