



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

“CARACTERIZACIÓN DE LA CALIDAD SUPERFICIAL DE MECANIZADO EN EL PROCESO DE CILINDRADO DEL TORNO ROMI C420”

TRABAJO DE TITULACION PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO

NÚÑEZ GÁLVEZ JUAN CARLOS
juan.nunez01@epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. MARIO ALBERTO CESÉN ARTEAGA, M. Sc.
mario.cesen@epn.edu.ec

CODIRECTOR: ING. CARLOS WIME DÍAZ CAMPOVERDE, M. Sc.
carlos.diaz@epn.edu.ec

Quito, Enero 2019

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por **NÚÑEZ GÁLVEZ JUAN CARLOS**, bajo mi supervisión.

Ing. Mario Alberto Cesén Arteaga, M. Sc.

DIRECTOR DE PROYECTO

Ing. Carlos Wime Díaz Campoverde, M. Sc.

CODIRECTOR DE PROYECTO

DECLARACIÓN

Yo, **Juan Carlos Núñez Gálvez**, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Juan Carlos Núñez Gálvez

DEDICATORIA

Dedicado a mis padres por su constancia y ejemplo, a mi hermano por su paciencia y comprensión, a mis abuelos paternos y maternos por su amor en especial a María y Luz que nunca dudaron de esta persona.

AGRADECIMIENTO

Mis más sinceras gracias a:

Mi Dios y a mi madre Dolorosa que me han dado la dicha de estar con vida en este momento de satisfacción y permitirme dar un paso más en mi camino.

Toda mi familia materna y paterna que han permanecido junto a mi desde que he comenzado mi formación personal de manera especial a mis tíos Jose, Ederson, Luz, Gonzalo, Julio, Eugenia que han sido un enorme apoyo en diversas etapas de mi vida.

Ingeniero César Ayabaca por ser el promotor del proyecto y por su confianza en los trabajos que pude asistirle.

Ingeniero Mario Cesén y al Ingeniero Carlos Díaz por su guía y por su recelo en la realización no solo del proyecto de titulación sino en la experiencia profesional y personal que me han compartido.

Toda la familia del Laboratorio de Máquinas Herramientas por su gran amistad y sobre todo las enseñanzas que me lleve de ustedes.

Todo el equipo del Laboratorio de Desgaste y Falla por la ayuda en la realización de los diferentes ensayos.

Todo el personal del subdecanato en especial a Mildred, Geovana, Don Manuel y Doña Jaqueline por la predisposición que me han mostrado en la presentación de este proyecto.

Ingeniero Patricio Fuentes, Ingeniero Javier Valverde y Álvaro Escola por el tiempo y colaboración que me brindaron para las fases importantes del proyecto.

Tecnólogo Fabián Peñaloza por ser uno de mis primeros y de mis últimos profesores en la carrera que nunca se cansó de enseñarme algo nuevo.

Ingeniera Andrea Guerra por su cariño y alegría que supo ofrecerme no solo en los últimos momentos de mi carrera sino en un momento en que más lo necesitaba.

Mis amigos del colegio que aun han permanecido junto a mí con la misma amistad y acolite.

Andres, Santiago, Mario, Marlon, Henry, David, Christian, Israel, Orlando y Geomy que me han acompañado a lo largo de la carrera compartiendo la joda y los estudios.

Mis amigos Los Camaradas por ser las personas más unidas y luchadoras que pude conocer en mi experiencia universitaria, por tantas tardes de futbol que tuvimos.

La Escuela Politécnica Nacional y la Facultad de Ingeniería Mecánica por la educación que me ha ofrecido, y a todos y todas a las que he podido conocer dentro de esta institución, me llevo todo lo que he vivido con ustedes.

ÍNDICE

CERTIFICACIÓN	i
DECLARACIÓN	ii
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTO.....	iv
ÍNDICE	v
INDICE DE FIGURAS	ix
INDICE DE TABLAS	xi
RESUMEN	xiii
ABSTRACT	xiv
INTRODUCCIÓN	1
Objetivo general	1
Objetivos específicos	2
Hipótesis	2
1. MARCO TEÓRICO.....	3
1.1. Calidad superficial	3
1.1.1. Alteraciones superficiales producidas en operaciones tradicionales de mecanizado.....	4
1.1.2. Técnicas de evaluación de la calidad superficial.....	5
1.1.3. Estudio microscópico.....	6
1.1.4. Microdureza.....	7
1.2. Proceso de mecanizado por arranque de viruta.....	9
1.2.1. Proceso de Torneado	10
1.2.2. Parámetros de mecanizado en el proceso de cilindrado	11
1.2.3. Movimientos principales de mecanizado en el proceso de cilindrado	12
1.2.3.1. Movimiento principal de corte.....	12

1.2.3.2. Movimiento Principal de Avance	12
1.3. Teoría del diseño de experimentos	13
1.3.1. Etapas para el diseño de experimentos	13
1.4. Rugosidad	14
1.4.1. Medición de rugosidad	15
1.4.2. Rugosidad superficial producida en procesos de manufactura	16
2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	17
2.1. Diseño de Experimentos	17
2.1.1. Selección del criterio de experimentación	18
2.1.1.1. Determinación cuantitativa de experimentos	19
2.1.2. Selección de materiales y herramienta de corte.....	19
2.1.2.1. Material de estudio	19
2.1.2.2. Herramienta de corte.....	19
2.1.3. Determinación de parámetros de mecanizado	20
2.2. Pruebas experimentales de rugosidad	22
2.2.1. Preparación de probetas y montaje.....	22
2.2.2. Medición de Rugosidad	23
2.3. Ensayo de microdureza.....	24
2.3.1. Probetas para ensayo de microdureza.....	24
2.3.2. Equipos para el Ensayo de Microdureza	25
2.3.3. Procedimiento del ensayo de microdureza.....	25
2.4. Ensayo metalográfico	26
2.4.1. Probetas para ensayo metalográfico	26
2.4.2. Equipos para el ensayo metalográfico	27
2.4.3. Procedimiento del Ensayo Metalográfico	28
2.5. Ensayo de composición química	29
2.5.1. Probetas para ensayo de composición química	29

2.5.2. Equipos de ensayo de composición química.....	30
2.5.3. Procedimiento para el ensayo de composición química.....	30
2.6. Ensayo de tracción.....	30
2.6.1. Probetas para el ensayo de tracción	31
2.6.2. Equipos para el ensayo de tracción	31
2.6.3. Procedimiento para el ensayo de tracción.....	32
2.7. Análisis multifuncional respecto a variables experimentales	32
2.7.1. Modelamiento matemático	32
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	35
3.1. Resultados para la materia prima.....	35
3.1.1. Ensayo de composición química.....	35
3.1.2. Ensayo de tracción.....	35
3.2. Resultados para el elemento mecanizado.....	36
3.2.1. Medición de rugosidad superficial	36
3.2.2. Esquematización de los datos de rugosidad	37
3.2.2.1. Considerando la profundidad de corte constante	37
3.2.2.2. Considerando el avance de corte constante	38
3.2.3. Modelamiento matemático respecto a variables experimentales	38
3.2.4. Respuesta estadística y validación del modelo matemático.....	40
3.2.5. Ensayo de Microdureza.....	41
3.2.5.1. Zona transversal de la probeta.....	41
3.2.6. Esquematización de la microdureza.....	42
3.2.7. Ensayo metalográfico.....	43
3.2.7.1. Espesor de capa superficial deformada	43
3.2.8. Síntesis de resultados principales	46
3.3. Discusión.....	46
3.3.1. Comportamiento de la materia prima	46

3.3.2. Comportamiento superficial del mecanizado.....	47
3.3.2.1. Comparación entre el modelo matemático-estadístico y la validación	48
3.3.3. Comportamiento microestructural	49
3.3.4. Comportamiento del espesor de capa superficial deformada.....	52
3.3.5. Comportamiento final de la experimentación	54
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	57
4.1. Conclusiones.....	57
4.2. Recomendaciones.....	58
Referencias Bibliográficas	59
ANEXOS	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Alteraciones Superficiales producidas en el mecanizado.....	3
Figura 1.2. Alteración en la dureza superficial.....	4
Figura 1.3. Deformación excesiva producida por taladrado agresivo.....	4
Figura 1.4. Probeta metalográfica.	6
Figura 1.5. Comportamiento de la microdureza en el mecanizado.	8
Figura 1.6. Procesos tradicionales de remoción de material.....	9
Figura 1.7. Diversos procesos de torneado.....	10
Figura 1.8. Variables dependientes e independientes dentro del mecanizado. ...	11
Figura 1.9. Movimiento principal de corte transmitido por máquina-herramienta.	12
Figura 1.10. Movimiento principal de avance del torno.	12
Figura 1.11. Esquematización del proceso.	13
Figura 1.12. Rugosidad obtenida por procesos de mecanizado tradicionales.	16
Figura 2.1. Relación entre eficiencia y número de factores.....	17
Figura 2.2. Esquematización del experimento.....	18
Figura 2.3. Probeta premecanizada	23
Figura 2.4. Montaje para mecanizado.	23
Figura 2.5. Medición de rugosidad.	24
Figura 2.6. Probetas para ensayo de microdureza.....	25
Figura 2.7. Capa superficial deformada.	26
Figura 2.8. Probetas para ensayo metalográfico.....	27
Figura 2.9. Probeta para ensayo de composición química.....	29
Figura 2.10. Curva Esfuerzo-Deformación.	31
Figura 2.11. Espécimen de tracción.	31
Figura 3.1. Diagrama Esfuerzo-Deformación del acero SAE 1018.	36
Figura 3.2. Variación de la rugosidad con respecto al avance para diferentes velocidades de corte y profundidad constante (0.5 mm).	37
Figura 3.3. Variación de la rugosidad con respecto a la profundidad de corte para velocidades de corte y avance constante (0.2 mm/rev).	38
Figura 3.4. Indentación sobre: a) Capa superficial deformada, b) Bajo la capa superficial deformada, c) Material base.....	41
Figura 3.5. Variación de la microdureza con respecto a la distancia de	

indentación para diferentes profundidades de corte con revoluciones y avance constante. (950 RPM, 0.2 mm/rev).....	42
Figura 3.6. Variación de la microdureza con respecto a la distancia de indentación para diferentes profundidades de corte con revoluciones y avance constante. (1200 RPM, 0.2 mm/rev).....	43
Figura 3.7. Variación de la microdureza con respecto a la distancia de indentación para diferentes profundidades de corte con revoluciones y avance constante. (1500 RPM, 0.2 mm/rev).....	43
Figura 3.8. Límites de medición de capa superficial deformada.....	44
Figura 3.9. Mediciones de la capa superficial deformada para 950 RPM, 0.2 mm/rev y 0.5 mm.....	44
Figura 3.10. Mediciones de la capa superficial deformada para 1200 RPM, 0.2 mm/rev y 0.5 mm.....	45
Figura 3.11. Mediciones de la capa superficial deformada para 1500 RPM, 0.2 mm/rev y 0.5 mm.....	45
Figura 3.12. Influencia de los parámetros de mecanizado sobre la Rugosidad. ..	48
Figura 3.13. Comportamiento de la microdureza con respecto a la profundidad de corte en la capa superficial deformada.....	51
Figura 3.14. Desplazamiento del material y de la resina debido a la indentación sobre el borde del mecanizado.	51
Figura 3.15. Variación de la forma de indentación sobre a) Capa superficial deformada, b) Límite de transición de la superficial y el material base.	52
Figura 3.16. Variación de la forma de indentación sobre: a) Superficie acompañada de gran cantidad de perlita, b) Superficie acompañada de gran cantidad de ferrita.....	52
Figura 3.17. Comportamiento del espesor de capa promedio con respecto para diferentes revoluciones y profundidades de corte con avance constante (0.2 mm/rev).	53
Figura 3.18. Comportamiento de las revoluciones y el avance de corte sobre los comportamientos principales a profundidad de corte constante (0.5 mm).	55
Figura 3.19. Comportamiento del avance y profundidad de corte sobre los comportamientos principales a revoluciones constantes (950 RPM)	56

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Evaluación mínima.	5
Tabla 1.2. Evaluación estándar.	6
Tabla 1.3. Evaluación extendida.	6
Tabla 1.4. Características del indentador.	8
Tabla 1.5. Método de cálculo para rugosidad superficial.	15
Tabla 2.1. Propiedades mecánicas del material.	19
Tabla 2.2. Características técnicas del inserto.	20
Tabla 2.3 Rango de revoluciones ajustado.	20
Tabla 2.4. Avances ajustado de experimentación.	21
Tabla 2.5. Profundidad ajustada de experimentación.	21
Tabla 2.6. Parámetros y niveles cuantitativos de experimentación.	22
Tabla 2.7. Especificaciones Técnicas del Microdurómetro.	25
Tabla 2.8. Especificaciones técnicas del equipo de desbaste grueso.	27
Tabla 2.9. Especificaciones técnicas del equipo de pulido fino.	28
Tabla 2.10. Especificaciones técnicas del microscopio óptico.	28
Tabla 2.11. Especificaciones Técnicas del Espectrómetro.	30
Tabla 2.12. Especificaciones Técnicas de la máquina de ensayos.	31
Tabla 3.1. Composición Química principales del acero SAE 1018.	35
Tabla 3.2. Composición Química del acero SAE 1018 en base a la norma A29. .	35
Tabla 3.3. Valores obtenidos del acero SAE 1018.	36
Tabla 3.4. Rugosidad Superficial obtenida para cada nivel de experimentación. .	36
Tabla 3.5. Análisis ANOVA de la experimentación.	40
Tabla 3.6. Coeficientes generados por el software	40
Tabla 3.7. Análisis ANOVA de la validación.	40
Tabla 3.8. Coeficientes de validación	41
Tabla 3.9. Variación de la Microdureza con respecto a la distancia de indentación para parámetros constantes de revoluciones y avance (950 RPM, 0.2 mm/rev) y parámetro variable de profundidad de corte (a) 0.5 mm, b) 1 mm, c) 1.5 mm).	41
Tabla 3.10. Variación de la Microdureza con respecto a la distancia de indentación para parámetros constantes de revoluciones y avance	

(1200 RPM, 0.2 mm/rev) y parámetro variable de profundidad de corte (a) 0.5 mm, b) 1 mm, c) 1.5 mm).....	42
Tabla 3.11. Variación de la Microdureza con respecto a la distancia de indentación para parámetros constantes de revoluciones y avance (1500 RPM, 0.2 mm/rev) y parámetro variable de profundidad de corte (a) 0.5 mm, b) 1 mm, c) 1.5 mm).....	42
Tabla 3.15. Comportamientos cuantitativos principales de mecanizado.....	46
Tabla 3.16. Variación de la microdureza con respecto a la variación de la profundidad de corte en la capa superficial deformada para revoluciones constantes y diferentes avances. (a) 950 RPM y 0.2 mm/rev, b) 950 RPM y 0.3 mm/rev, c) 950 RPM y 0.4 mm/rev).....	49
Tabla 3.17. Variación de la microdureza con respecto a la variación del avance en la capa superficial deformada para revoluciones constantes y diferentes profundidades. (a) 950 RPM y 0.5 mm, b) 950 RPM y 1 mm, c) 950 RPM y 1.5 mm)	50

RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se caracterizó la calidad superficial de mecanizado por el proceso de cilindrado del Torno ROMI C420. Para este propósito se analizó el acabado superficial, las características metalúrgicas siendo estas la microdureza y el espesor de capa superficial deformada de la materia prima (AISI 1018) para diferentes niveles de parámetros de corte (revoluciones, avance y profundidad). Para determinar la calidad superficial se realizaron mediciones de rugosidad superficial, y la determinación de las características metalúrgicas se realizó ensayos de microdureza y ensayos metalográficos.

Partiendo de la determinación de los parámetros de corte y el diseño de la experimentación, se procedió a realizar las mediciones de rugosidad para cada combinación de los parámetros de corte y tabulando los mismos. Para continuar en la obtención de las microdurezas a lo largo del área transversal de las probetas, como también la obtención del espesor de capa deformada en la periferia de las probetas mecanizadas, siguiendo los lineamientos provenientes de la evaluación de calidad superficial descritos en el Machining Data Book.

En base a los resultados dentro del estudio realizado al mecanizado, se determinó tres tipos de comportamientos que afectan a cada combinación de parámetros realizados en la experimentación, definiendo cuantitativamente y el grado de influencia de el o los parámetros que permiten conseguir la caracterización final del mecanizado bajo las condiciones de experimentación propuestas en este estudio.

Palabras claves: Revoluciones, avance, profundidad de corte, rugosidad superficial, microdureza, capa superficial deformada.

ABSTRACT

In the present research work, the surface quality of machining was characterized by the turning process in the turning machine ROMI C420. For this purpose the surface finish and the metallurgical characteristics which are the microhardness and the thickness of the deformed surface layer of the raw material (AISI 1018) was analyzed for different levels of cutting parameters (revolutions, feed and depth). To determine the surface quality, surface roughness measurements were made, and the determination of the metallurgical characteristics was made microhardness tests and metallographic tests.

Based on the determination of the cutting parameters and the design of the experiments, roughness measurements were taken for each combination of cutting parameters and tabulating them. To continue in obtainment the microhardness along the cross area of the specimens, as well as obtainment the thickness of the layer in the periphery of the mechanized specimens, following the guidelines from the evaluation of surface quality described in the Machining Data Book.

Based on the results of the study made to the machining, three types of behaviors were determined that affect each combination of parameters made in the experimentation, defining quantitatively and the degree of influence of the parameter or parameters that allow to achieve the final characterization of the machining under the experimental conditions proposed in this study.

Keywords: Revolutions, feed, depth of cut, surface roughness, microhardness, deformed layer.

“CARACTERIZACIÓN DE LA CALIDAD SUPERFICIAL DE MECANIZADO POR EL PROCESO DE CILINDRADO DEL TORNO ROMI C420”

INTRODUCCIÓN

La manufactura de superficies óptimas requiere del entendimiento de la relación entre la metalurgia, la maquinabilidad y las pruebas mecánicas. Para satisfacer este requerimiento, se introduce un concepto conocido como integridad o calidad superficial que ha tenido una amplia aceptación en la industria (Machining Data, 1980). La calidad superficial se enfoca en las alteraciones que sufre la capa superficial durante el mecanizado, como también las alteraciones de las propiedades mecánicas del material. En el mecanizado interviene el proceso de cilindrado realizado en el torneado, el cilindrado está influenciado por niveles de parámetros de corte que permiten realizar el proceso, estos parámetros tienen rangos normalizados de trabajo de acuerdo a la herramienta de corte (inserto) que intervenga en el proceso y la materia prima a mecanizar.

Dentro de la calidad superficial se encuentra la medición de rugosidad que permite analizar los efectos de los parámetros mencionados en la superficie del material. Cada superficie mecanizada presenta su propia rugosidad que está relacionada con los parámetros de corte. Simultáneamente se produce una deformación plástica en la capa superficial, es en donde interviene otro aspecto de la calidad superficial que es la metalografía, esta permite observar la microestructura de la capa superficial y sobretodo el comportamiento que presenta la deformación plástica después de mecanizar la materia prima al atacar químicamente una sección de la probeta mecanizada. Con la finalidad de entregar una evaluación completa de la influencia de la combinación de los parámetros de corte sobre los comportamientos presentes en el mecanizado mencionados anteriormente.

Objetivo general

Caracterizar la calidad superficial de mecanizado en el proceso de cilindrado del Torno ROMI C420.

Objetivos específicos

Obtener mediciones de rugosidad de acuerdo a los parámetros de corte seleccionados para el mecanizado.

Determinar las características metalúrgicas del material mecanizado.

Determinar la relación de la rugosidad obtenida mediante de la experimentación y aplicada a un modelo matemático en base a los parámetros de mecanizado.

Hipótesis

- A medida que aumenta los niveles de los parámetros de mecanizado, producen un afinamiento en los acabados superficiales, un incremento en la microdureza y en el espesor de capa superficial deformada.
- La utilización del fluido de corte permite la disminución de la generación de calor, afectando positivamente en las variaciones de rugosidad, microdureza y espesor de capa superficial deformada.

1. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se expone los temas más relevantes en la calidad superficial, procesos de mecanizados, y sus métodos que van hacer analizados y aplicados dentro del trabajo de investigación.

1.1. Calidad superficial

Dentro de la fabricación de elementos se enfatiza en la calidad que esta presenta debido a las funciones que este va a desempeñar. La calidad superficial permite que las tolerancias y la rugosidad sean las adecuadas para el correcto ensamblaje entre elementos mecánicos, como también la evaluación de las cargas dinámicas de trabajo, siendo un factor importante de diseño, debido a la sensibilidad que presenta la superficie del elemento a estas cargas.

El interés en la calidad superficial es alcanzar un análisis de los defectos que producen los procesos de manufactura en la superficie, con esto se pretende prevenir en lo más mínimo que se presenten estos defectos. Los cambios pueden producirse de manera química, térmica, eléctrica y mecánica que afecten a las propiedades físicas y metalúrgicas del material. A continuación la figura 1.1 presenta las principales alteraciones superficiales producidas por los distintos procesos de manufactura. (Machining Data, 1980)








ALTERACIÓN	Grieta	Crater	Alteraciones en la Dureza	Zonas afectadas por el calor	Inclusión	Solapamiento	Transformaciones Metalúrgicas
DEFINICIÓN	Son rupturas o separaciones en la superficie. Son angostos y con aristas vivas en dirección transversal, no son apreciables a simple vista.	Son depresiones superficiales con filos rugosos de forma ovalada, se presentan en dirección transversal.	Son cambios en la dureza de la capa superficial como resultado de la deformación mecánica o el cambio químico durante el proceso.	Son las porciones de material mal fundido, estas son zonas que provocan cambios microestructurales y cambios en la dureza.	Son pequeñas partículas en la capa superficial de un objeto externo.	Son defectos en la superficie provenientes de un trabajo plástico de superficies superpuestas.	Son cambios microestructurales por el resultado de agentes externos.
ESQUEMA							

Figura 1.1. Alteraciones Superficiales producidas en el mecanizado.

(Fuente: Machining Data, 1980)

1.1.1. Alteraciones superficiales producidas en operaciones tradicionales de mecanizado

Los métodos tradicionales en los cuales se encuentran los procesos por arranque de viruta (fresado, torneado, limado y taladrado) y los procesos abrasivos (esmerilado, bruñido), los cuales producen alteraciones en la capa superficial al momento de utilizar condiciones agresivas de mecanizado (figura 1.2 y figura 1.3). Este tipo de condiciones provocan altas temperaturas y una deformación plástica excesiva las cuales se evidencian en el cambio de las propiedades del material, y un desgaste inapropiado de la herramienta ocasionando superficies ineficientes. (Machining Data, 1980)

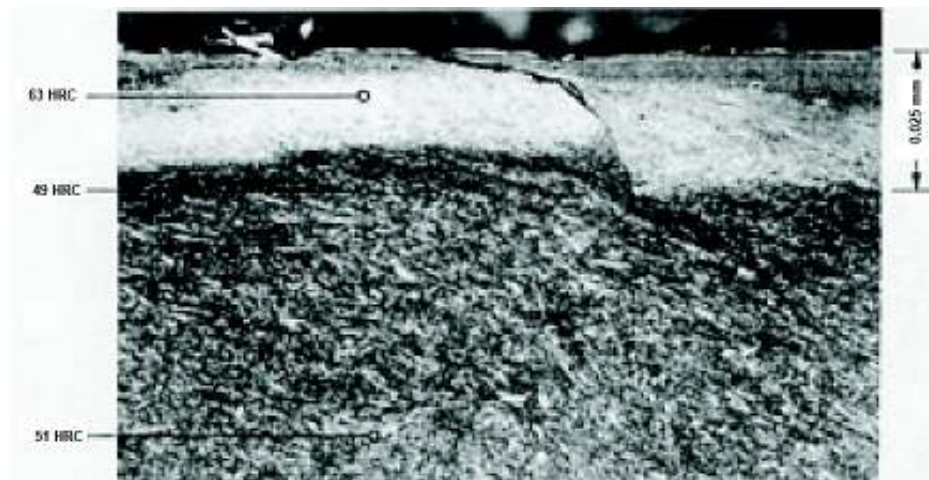


Figura 1.2. Alteración en la dureza superficial.

(Fuente: ASM Handbook, 1997)

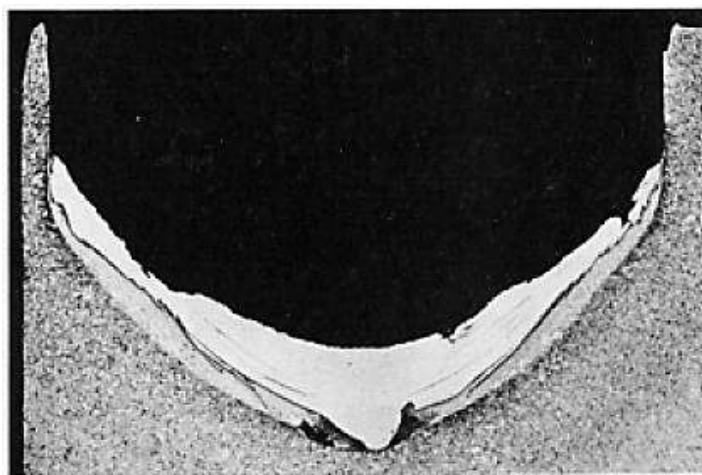


Figura 1.3. Deformación excesiva producida por taladrado agresivo.

(Fuente: ASM Handbook, 1997)

1.1.2. Técnicas de evaluación de la calidad superficial

Se han desarrollado procedimientos experimentales para la evaluación de la calidad superficial, analizando superficialmente y subsuperficialmente el elemento mecanizado. Existiendo tres tipos de evaluaciones para la calidad superficial.

La evaluación mínima es la que proporciona la información de los efectos superficiales sobre el elemento a estudiar, como por ejemplo la información que provee la metalografía y mediciones de microdureza y rugosidad superficial, se presenta en la tabla 1.1 los pasos para realizar esta evaluación.

La evaluación estándar indica una mayor información debido a los efectos de las cargas y a la deformación producida entre el contacto de la herramienta y el material, este incluye los resultados de la evaluación mínima sumado con el análisis de los esfuerzos residuales y ensayos de fatiga, la tabla 1.2 muestra los pasos para la evaluación.

La evaluación extendida provee información de programas de diseño estadístico de ciclos de vida del elemento, además incluye información del análisis del esfuerzo corrosivo para diferentes ambientes de exposición, se presentan los pasos a seguir en la tabla 1.3. (Machining Data, 1980)

Tabla 1.1. Evaluación mínima.

ETAPA	DESCRIPCIÓN
Textura Superficial (Rugosidad)	Medición de Rugosidad (ANSI B46.1)
	Fotografía de la superficie
Macroestructura (10x o menos)	Macro grietas o imperfecciones superficiales
	Macroataque (partículas magnéticas, líquidos penetrantes)
Microestructura (evaluación en la sección transversal a 1000X)	Microgrietas
	Deformación Plástica
	Transformación de Fase
	Ataque intergranular
	Microdefectos (solapamientos, inclusiones, etc.)
	Transformaciones Metalúrgicas
Alteraciones en la Microdureza	Medición de Microdureza

(Fuente: Machining Data, 1980)

Tabla 1.2. Evaluación estándar.

ETAPA	DESCRIPCIÓN
Evaluación mínima	
Esfuerzos residuales	Perfil de esfuerzos
	Medición de Distorsión
Fatiga	Ensayos de Fatiga

(Fuente: Machining Data, 1980)

Tabla 1.3. Evaluación extendida.

ETAPA	DESCRIPCIÓN
Evaluación Estándar	
Fatiga	Diseño Estadístico de perfil de fatiga
Corrosión	Ensayos de corrosión en diferentes condiciones ambientales
Ensayos Mecánicos Adicionales	Tracción Creep Desgaste Ciclo de Vida etc.

(Fuente: Machining Data, 1980)

1.1.3. Estudio microscópico

El estudio microscópico es un factor importante para la evaluación de la calidad superficial ya que las alteraciones superficiales se presentan en el orden de las 0.025 a 0.076 mm. Bajo condiciones agresivas, las alteraciones se presentan bajo el orden de las 0.127 a 0.38 mm. Otras alteraciones significativas como las microfisuras y solapamientos se presentan a 0.0025 mm bajo la superficie mecanizada. Para identificar estas alteraciones es necesario emplear técnicas de obtención y montaje de probetas metalográficas que no modifiquen la superficie a analizar. Una técnica es el uso de resina para el montaje de probetas que permite observar claramente los efectos del mecanizado en la probeta, la figura 1.4 muestra una probeta metalográfica lista para el análisis.

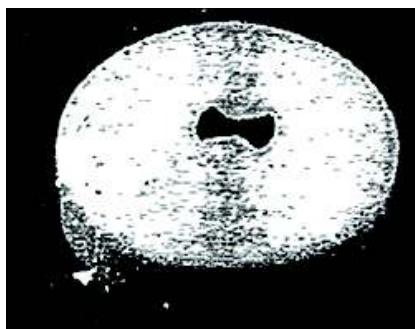


Figura 1.4. Probeta metalográfica.

(Fuente: Machining Data, 1980)

Diferentes tipos de microscopios intervienen en el estudio microscópico para la evaluación metalúrgica de la calidad superficial, como por ejemplo el microscopio electrónico de barrido, el microscopio electrónico de transmisión y el microscopio óptico siendo este el más accesible para la evaluación. Para observar las diferentes alteraciones superficiales en el microscopio se lo realiza en probetas no atacadas, para observar la microestructura de la probeta se procede atacar químicamente esta. (Machining Data, 1980)

1.1.4. Microdureza

La determinación de la microdureza se puede realizar sobre las probetas metalográficas usando un microdurómetro con indentador Knoop o Vickers, siguiendo los lineamientos del ensayo de microdureza.

Dentro del ensayo de microdureza se encuentra la escala Knoop y la Vickers, las dos escalas parten de la división de la carga aplicada en kilogramos fuerza por el área proyectada de la indentación en milímetros cuadrados, la diferencia radica en que la escala Knoop calcula lo antes descrito a partir de la medida de la diagonal más larga de indentación, mientras que la escala Vickers calcula a partir de la medida de la media de las diagonales de indentación. (ASTM E384-17, 2017)

Para calcular la microdureza Knoop se utiliza la siguiente fórmula.

$$HK = 14229 \times \frac{P}{d^2}$$

Ecuación 2.4. Microdureza Knoop

(Fuente: ASTM E384-17, 2017)

Donde:

P: carga de indentación (gf)

d: longitud de la diagonal más larga (μm)

Para calcular la microdureza Vickers se utiliza la siguiente fórmula.

$$HV = 1854.4 \times \frac{P}{d^2}$$

Ecuación 2.5. Microdureza Vickers

(Fuente: ASTM E384-17, 2017)

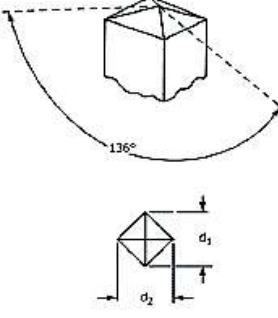
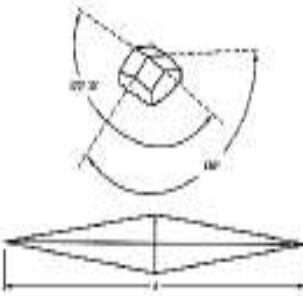
Donde:

P: carga de indentación (gf)

d: longitud de la media de las diagonales (μm)

La tabla 1.4 muestra las geometrías de los indentadores y sus cargas para los dos tipos de escala de microdureza.

Tabla 1.4. Características del indentador.

INDENTADOR	GEOMETRIA	CARGA
Vickers		1 a 1000 gf
Knoop		

(Fuente: ASTM E384-17, 2017)

La microdureza analiza cambios superficiales como por ejemplo:

- Zonas con presencia de martensita
- Ablandamiento debido a la presencia de austenita
- Zonas afectadas por el calor
- Zonas endurecidas por excesiva deformación plástica

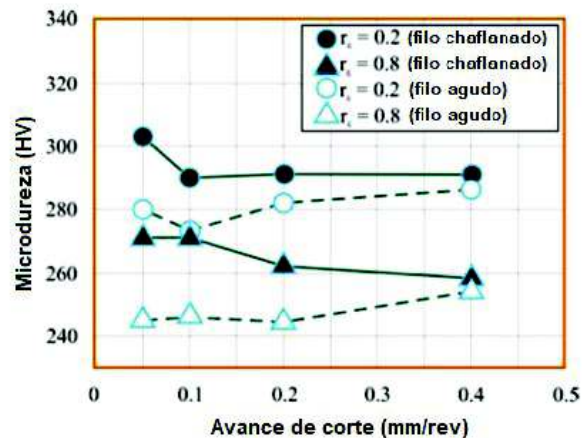


Figura 1.5. Comportamiento de la microdureza en el mecanizado.

(Fuente: Lescano, 2015)

La distribución de la microdureza a lo largo de la sección transversal del elemento es más alta en las cercanías de la superficie debido a la deformación plástica dada por el mecanizado, y va disminuyendo al avanzar hacia el núcleo alcanzando nuevamente la dureza del material. Diferentes estudios muestran que la dureza es más alta cuando se utiliza una herramienta achaflanada con un radio de nariz más pequeño, se debe a que la deformación plástica en la capa superficial se vuelve más grande (Lescano, 2015). Esto se puede observar en la figura 1.5.

1.2. Proceso de mecanizado por arranque de viruta

Los procesos de remoción de material se encuentran en las operaciones de modelado geométrico, en donde se remueve material en bruto para obtener la forma final geométrica deseada. Dentro de este proceso se encuentra el mecanizado convencional, el cual una herramienta de corte afilada es utilizada para realizar corte al material en bruto para alcanzar dimensiones específicas (Groover, 2010). La figura 1.6 muestra los diferentes procesos de remoción de material existentes.

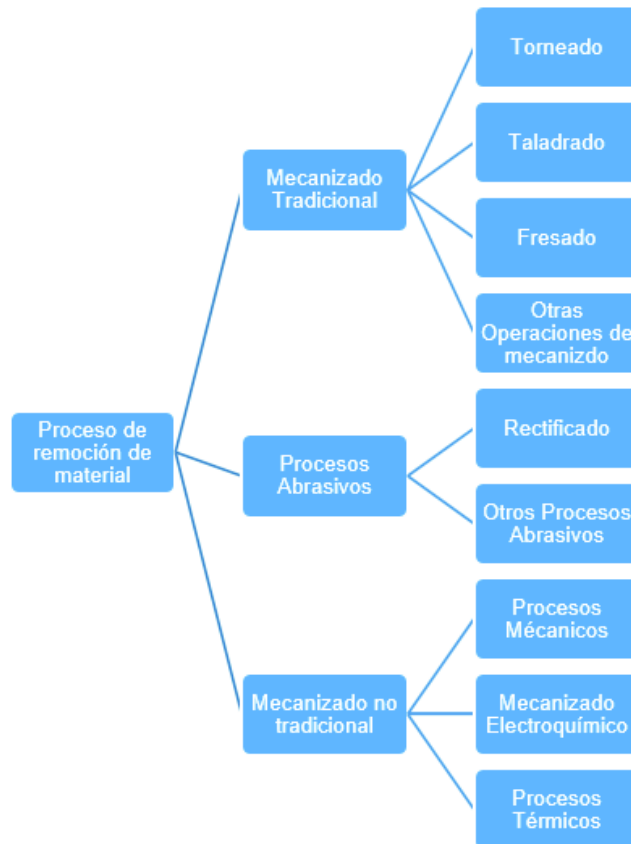


Figura 1.6. Procesos tradicionales de remoción de material.

(Fuente: Propia; Groover, 2010)

En el mecanizado convencional, la acción predominante del corte provoca deformaciones plásticas sobre el material, formando la viruta o material removido, generando una nueva superficie.

1.2.1. Proceso de Torneado

Uno de los procesos tradicionales de mecanizado es el torneado, en donde el material es el que rota en vez de la herramienta de corte. El torneado se lo realiza en un torno o máquina herramienta similar. En esta máquina se puede producir diferentes formas de acuerdo a los requerimientos del usuario (Kalpakjian, 2008). La figura 1.7 muestra la forma de los procesos y se detallan las mismas a continuación:

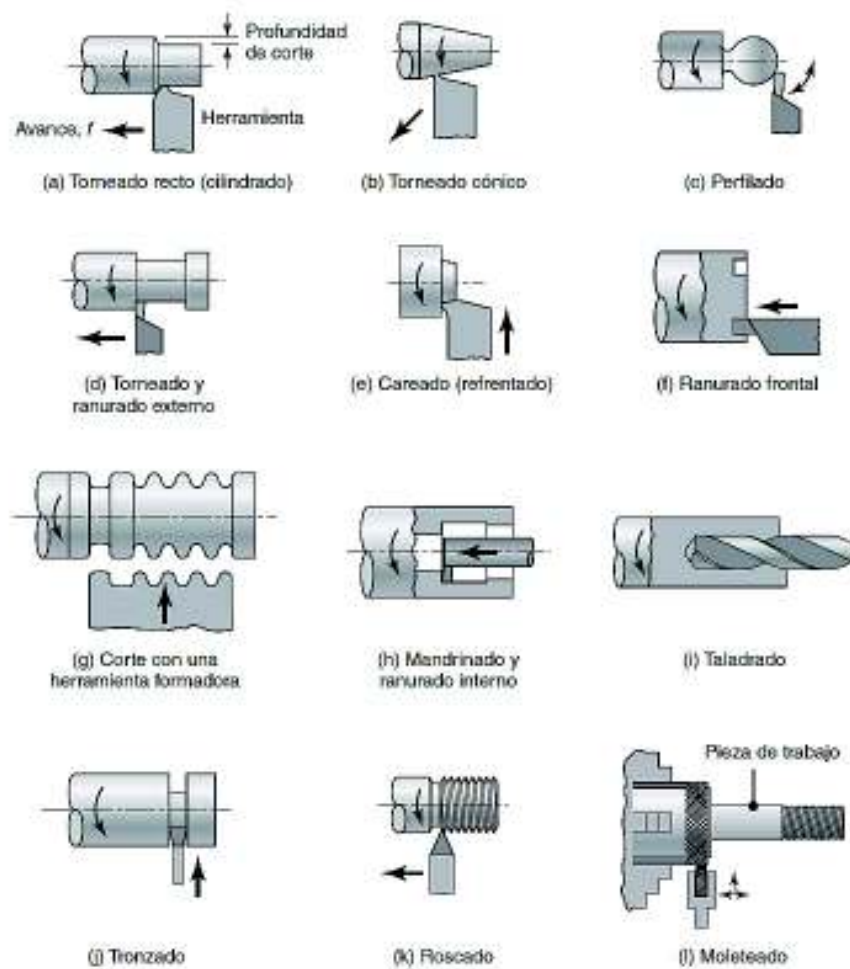


Figura 1.7. Diversos procesos de torneado.

(Fuente: Kalpakjian, 2008)

- **Cilindrado:** produce piezas rectas, cónicas, curvadas o ranuradas, como ejes o flechas, husillos y pasadores.

- **Refrentado:** produce superficies planas al inicio o al final de la pieza, y perpendicular a la longitud de este.
- **Corte con herramienta de forma:** produce diversas formas simétricas dependiendo de la herramienta a utilizar para una finalidad funcional o estética.
- **Mandrinado:** agranda orificios o agujeros cilíndricos internos mediante un proceso previo.
- **Taladrado:** produce un orificio o agujero circular por medio de la utilización de una broca.
- **Tronzado:** corta un extremo de la pieza, el cual es utilizado en la producción en serie de piezas para su fácil extracción.
- **Roscado:** produce roscas internas y externas.
- **Moleteado:** produce una superficie rugosa de forma regular, para un mejor agarre sobre esta superficie.

1.2.2. Parámetros de mecanizado en el proceso de cilindrado

Dentro del torneado está presente el proceso de cilindrado, en este proceso la herramienta de corte es la encargada de remover material por toda la longitud de la probeta para obtener la geometría requerida para una determinada función, la mayor deformación se produce en dos regiones cercanas al filo de la herramienta de corte, la primera región se encuentra entre la punta de la herramienta y la interfaz entre el material no deformado y la viruta removida, la segunda región es la fricción entre la herramienta y la viruta produciendo calor y deformación plástica del material. “El proceso de mecanizado es el conjunto de variables dependientes e independientes que afectan en la remoción de material” (Lescano, 2015), esto se muestra en la figura 1.8.

Variables Independientes		Variables Dependientes	
Variables de la herramienta	Material Geometría	Reacción en la herramienta	Desgaste Fractura
Variables de la pieza	Material Geometría	Reacción en la pieza	Acabado superficial Precisión dimensional Cambio de propiedades Tipo de viruta
Variable del proceso	Velocidad de corte Avance Tipo de corte Profundidad de corte	Reacción en la máquina	Desgaste Ruido Vibración Fuerza Potencia
Variables de condición	Fluido de corte Ambiente	Reacción Económica	Costo de la herramienta Costo del maquinado
Variables de la máquina	Rigidez Desgaste		

Figura 1.8. Variables dependientes e independientes dentro del mecanizado.

(Fuente: Lescano, 2015)

1.2.3. Movimientos principales de mecanizado en el proceso de cilindrado

Estos movimientos también conocidos como de trabajo, son los encargados de desplazar la herramienta hacia el material para modificar geoméricamente el material provocando arranque de viruta.

1.2.3.1. Movimiento principal de corte

Este movimiento puede ser de dos tipos: rotacional o rectilíneo y se encarga de desprender material en forma de viruta durante una revolución o golpe de la herramienta que interviene en el mecanizado. El movimiento de corte puede ser transmitido por el material o por la herramienta. En el torneado la pieza es la encargada de transmitir el movimiento de corte mientras que en el fresado la herramienta (fresa) es la responsable del movimiento de corte. En la figura 1.9 se muestra la diferencia entre ellos.

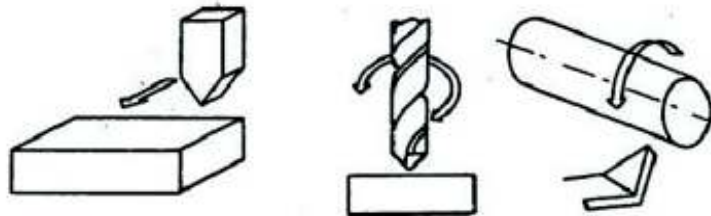


Figura 1.9. Movimiento principal de corte transmitido por máquina-herramienta.

(Fuente Propia)

1.2.3.2. Movimiento Principal de Avance

Este movimiento que también puede ser ejercido tanto por la herramienta como por el elemento a mecanizar, agregado al movimiento de corte producen una remoción de material continua o discontinua, creando una superficie con la geometría que se requiera. El movimiento de avance es puramente rectilíneo. La figura 1.10 ejemplifica el movimiento descrito.

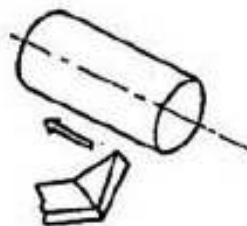


Figura 1.10. Movimiento principal de avance del torno.

(Fuente Propia)

1.3. Teoría del diseño de experimentos

La experimentación permite realizar diferentes pruebas donde existen niveles de cambios en las variables de estudio con el fin de identificar los posibles resultados que se presentan a partir de estos cambios. En el campo ingenieril, la experimentación permite la obtención de nuevos productos, nuevos procesos de fabricación, lo que conlleva a que se defina que variables son las que afectan adecuadamente al proceso experimental para que el producto sea eficiente.

Los objetivos del experimento es determinar cuáles son las variables de mayor influencia sobre la respuesta de estudio, también se determina cual es el ajuste de las variables para que la respuesta sea cercana a un valor deseado y que la respuesta tenga una baja variabilidad (Montgomery, 2004). La figura 1.11 muestra la influencia de las variables de entrada y salida dentro de un proceso.

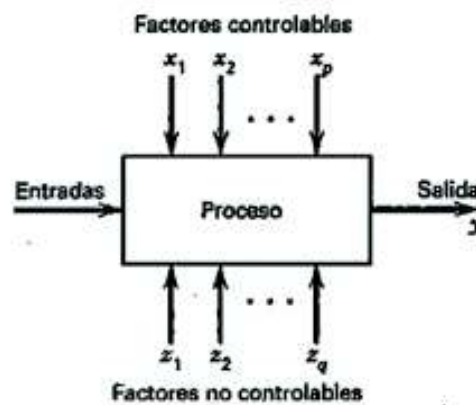


Figura 1.11. Esquematización del proceso.

(Fuente: Montgomery, 2004)

1.3.1. Etapas para el diseño de experimentos

Identificación del problema: Este punto permite definir claramente el problema ya que puede resultar difícil enunciarlo de manera precisa, se recomienda un enfoque de equipo en donde se encuentren los aportes de las diferentes áreas que intervienen en el diseño del experimento.

Elección de los factores, los niveles y los rangos: Al identificar claramente los factores que intervienen en la experimentación, los experimentadores pueden definir a estos como factores potenciales del diseño, los factores potenciales son aquellos que varían en la experimentación. Después de la identificación, se elige los rangos de variación de los factores, así también los niveles en donde se probará la experimentación. Los

experimentadores decidirán la región de variación de los factores y la cantidad de niveles y combinaciones que se usaran.

Selección de variables de respuesta: Al momento de seleccionar la variable de respuesta, los experimentadores deben asegurar que esta variable proporciona información útil dentro de la experimentación y su correspondiente análisis. La precisión de los instrumentos de medición (apreciación) es un factor determinante ya que si es inadecuado, se presentara errores en donde los experimentadores no podrán reconocerlos o explicarlos. En la mayoría de experimentos se mide varias veces para minimizar los errores y usar el promedio como respuesta de experimentación.

Elección del diseño experimental: En esta etapa se considera el tamaño de la muestra (número de experimentos), el orden de corridas que intervienen en la experimentación y las combinaciones que se realizan en cada corrida. Algunos textos presentan diferentes tipos de diseños de experimentos estándar que es aplicable para una variedad de problemas, como también la ayuda de software que adicionan una ayuda en el diseño experimental siendo una guía para el experimentador.

Realización del experimento: Es importante que en la realización, los experimentadores se aseguren que el desarrollo sea conforme a lo planteado, sino es así se tiene una validez nula de experimentación. Para esto se toma en cuenta corridas de prueba para la comprobación de las mediciones y verificar que las etapas anteriores del diseño se hayan hecho adecuadamente.

Análisis estadístico de los datos: Para el análisis de los datos obtenidos se usan métodos estadísticos para que se llegue a una conclusión que este de la mano con los objetivos planteados. En esta etapa también interviene el software que cuenta con un análisis estadístico, en este se presentan métodos gráficos que interpretan los datos. En el análisis se puede presentar los resultados en términos de un método empírico, es decir, por medio de una ecuación que parte de los datos y relacionado con la respuesta y los factores de diseño.

1.4. Rugosidad

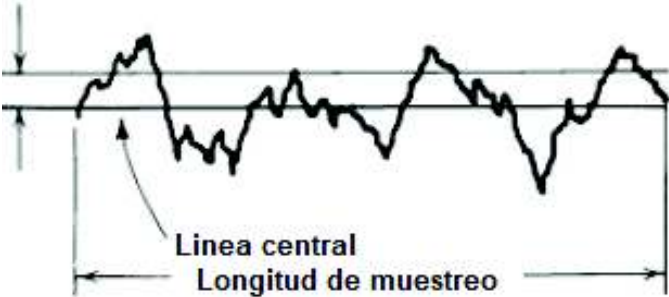
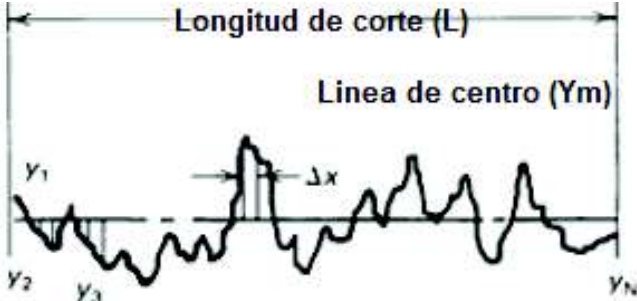
La rugosidad está definida por las irregularidades que presenta la superficie producidas por los procesos de producción, en donde la superficie presenta diferencias aunque se utilice el mismo proceso de producción, ya que los parámetros de corte están relacionados con la superficie a obtener. Las irregularidades mayores están asociados con la variación de tamaño del elemento, el paralelismo entre superficies, redondez y cilindridad. Las

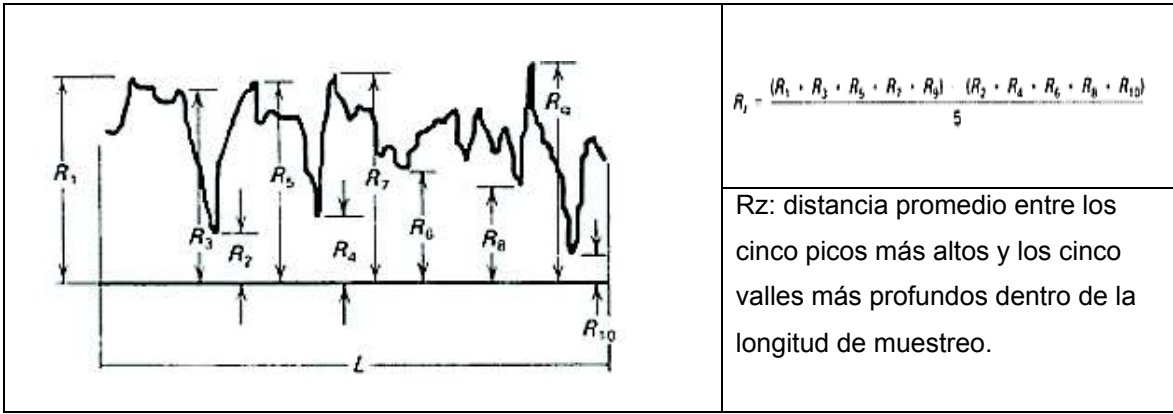
irregularidades menores están asociadas con las ondulaciones y la propia rugosidad. La rugosidad obtenida está dada por la herramienta de corte utilizada en el mecanizado (ASM, 1997).

1.4.1. Medición de rugosidad

La rugosidad superficial representada como ondulaciones puede ser medida por una variedad de instrumentos de contacto y no contacto. La técnica más utilizada es medir la rugosidad superficial con un instrumento de contacto que provee un valor numérico de rugosidad superficial a lo largo de una longitud de muestreo. Estos instrumentos expresan la rugosidad en términos de una media aritmética (R_a) o la mínima raíz cuadrada (R_q) (ASME B46.1, 2009). La tabla 1.5 muestra los diferentes métodos para la medición de rugosidad.

Tabla 1.5. Método de cálculo para rugosidad superficial.

ESQUEMA	FÓRMULA
 <p>Linea central Longitud de muestreo</p>	$R_a = \frac{1}{L} \int_{x=0}^{x=L} y dx,$ <p>Ra: Rugosidad Promedio L: longitud de muestreo y: perfil vertical tomado desde la línea central</p>
 <p>Longitud de corte (L) Linea de centro (Ym)</p> <p>y_1, y_2, y_3, y_N, Δx</p>	$R_q = \left(\frac{1}{L} \int_{x=0}^{x=L} y^2 dx \right)^{1/2}$ <p>Rq: Rugosidad mínima raíz cuadrada L: longitud de muestreo y: perfil vertical tomado desde la línea central</p>



(Fuente: ASM Handbook, 1997)

1.4.2. Rugosidad superficial producida en procesos de manufactura

Para la obtención de superficies ingenieriles se los realiza por medio de procesos de mecanizado aunque también existen superficies obtenidas por medio de fundición, extrusión y forjado. Cada proceso de producción tiene su rango de rugosidad superficial, algunas se muestran en la figura 1.12. En la figura se aprecia que los acabados más finos son obtenidos por procesos de mecanizado. Las técnicas tradicionales incluyen los procesos por arranque de viruta (torneado, fresado, limado) y procesos abrasivos (esmerilado, pulido y superpulido), estos producen superficies estándar las cuales se encuentran en la mayoría de los elementos de las máquinas industriales (ASM, 1997).

Proceso	Rugosidad (Ra)													
	µm	50	25	12.5	6.3	3.2	1.6	0.8	0.40	0.20	0.10	0.05	0.025	0.0
	µin.	2000	1000	500	250	125	63	32	16	8	4	2	1	0.
Corte de desbaste														
Corta por filana														
Desbaste (rectificado grueso)														
Aserrado														
Fundición														
Fundición en arena														
Fundición en molde permanente														
Fundición por arena verde														
Fundición a presión o en dado														
Forjado														
Laminación en caliente														
Fijado														
Extrusión														
Laminación en frío, aserrado														
Bruido por rodillos														
Mecanizado														
Planado y cepillado de mesa fija														
Fresado														
Brochado														
Rimado o acarriado														
Torneado, mandrinado														
Taladrado														
Mecanizado avanzado														
Mecanizado de láser														
Mecanizado por descarga eléctrica (electroerosión)														
Mecanizado por haz de electrones														
Mecanizado por rayo láser														
Mecanizado electroquímico														

Figura 1.12. Rugosidad obtenida por procesos de mecanizado tradicionales.

(Fuente: ASM Handbook, 1997)

2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

2.1. Diseño de Experimentos

Un experimento es una prueba o una serie de pruebas, entre estas intervienen los efectos de dos o más factores. A este tipo de experimentación se la conoce como diseño factorial, debido a que en cada prueba de la experimentación se analiza todas las combinaciones posibles de los niveles de los factores. El efecto de un factor está dado por el cambio en la respuesta debido a un cambio en el nivel del factor, a esto se lo denomina efecto principal porque interviene un factor principal dentro de la experimentación. La ventaja del diseño factorial es la obtención de dos o más estimaciones dentro de cada nivel de experimentación, con esto se puede promediar estimaciones produciendo efectos principales que tienen la misma precisión de las estimaciones individuales obtenidas (Montgomery, 2004). En la figura 2.1 se muestra como se relaciona la eficiencia respecto al número de factores que intervienen en la experimentación. Con esto se puede evitar conclusiones erróneas y produciendo las que son válidas dentro del rango de condiciones experimentales.

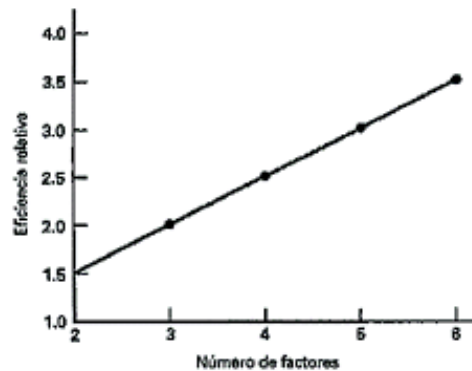


Figura 2.1. Relación entre eficiencia y número de factores.

(Fuente: Montgomery, 2004)

En el proceso de mecanizado se tiene diferentes niveles de intensidad para la evaluación de la calidad superficial, generalmente dentro del mecanizado se diferencia en dos tipos: el desbaste y el acabado. A continuación se muestra los niveles de intensidad empleados en el mecanizado:

- Superficie de bajo esfuerzo
- Superficie de acabado (gentil)
- Superficie convencional (estándar)
- Superficie rugosa (límite)
- Superficie agresiva (condición fuera de límite)

2.1.1. Selección del criterio de experimentación

Dentro del criterio de experimentación se seleccionó el diseño factorial 3^k de tres niveles y tres factores principales, debido a que en la experimentación intervienen tres factores principales o variables independientes dados por las condiciones de corte, los cuales son los siguientes:

- Velocidad de avance de corte (mm/rev)
- Velocidad de rotación de corte (RPM)
- Profundidad de corte (mm)

Cada una de estas tiene tres niveles propuestos para el diseño factorial, los niveles son seleccionados de acuerdo al libro Machining Data, los niveles que intervienen en la experimentación son los siguientes:

- Bajo o gentil
- Medio o convencional
- Alto o rugoso

Las variables dependientes o de respuesta de análisis en la experimentación son las siguientes:

- Rugosidad
- Microdureza en la capa superficial
- Espesor de capa superficial

En la figura 2.2 se muestra la relación de variables y los niveles y combinaciones que intervienen en el experimento.

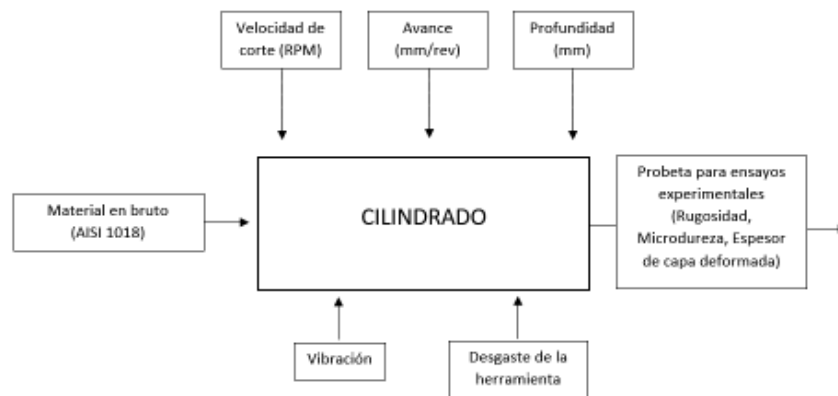


Figura 2.2. Esquematización del experimento.

(Fuente Propia)

2.1.1.1. Determinación cuantitativa de experimentos

De acuerdo al diseño factorial 3^k se determina el número de experimentaciones con la ecuación 2.1.

$$p = n^k$$

Ecuación 2.1. Cuantificación de experimentos

(Fuente: Montgomery, 2004)

Donde:

p: población experimental

n: número de factores

k: niveles de experimentación

$$p = 3^3 = 27 \text{ experimentos}$$

2.1.2. Selección de materiales y herramienta de corte

2.1.2.1. Material de estudio

El material seleccionado es el acero SAE 1018 el cual presenta mejores propiedades mecánicas debido a su alto contenido de manganeso, buena soldabilidad y buena maquinabilidad e interviene en la fabricación de distintos elementos de máquinas (pines, cuñas, remaches, rodillos, piñones, etc.). Sus propiedades mecánicas y composición se muestran en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Propiedades mecánicas del material.

MATERIAL				
Tipo	Acero SAE 1018			
Composición Química	C = 0,15-0.2%	Mn=0.6%	P=0.04%	S=0.05%
Elongación	20%			
Resistencia a la tracción	51-71 kg/mm ²		499-695,8 N/mm ²	

(Fuente: Catálogo Ivan Bohman, 2017)

2.1.2.2. Herramienta de corte

La herramienta seleccionada es el inserto DNMG 15 06-PM 4325 de la marca SANDVICK, la cual tiene un recubrimiento de CVD Ti(C₂N)+Al₂O₃+TiN para desbaste y afinado. Las características geométricas y de corte se muestran en la tabla 2.2.

Tabla 2.2. Características técnicas del inserto.

INSERTO	
Tipo	DNMG 150608-PM 4325
Velocidad de corte (Vc)	(135-230) m/min
Profundidad de Corte (ap)	(0,5-6) mm
Velocidad de avance (fn)	(0,15-0,5) mm/rev
Ángulo de nariz	55

(Fuente: Catálogo Sandvick, 2016)

2.1.3. Determinación de parámetros de mecanizado

Para la determinación de las revoluciones de experimentación se utilizó la ecuación 2.2.

$$n = \frac{Vc * 1000}{\pi * \varnothing}$$

Ecuación 2.2. Revoluciones de trabajo

(Fuente: Montgomery, 2004)

Donde:

n: Velocidad de rotación de corte (Revoluciones)

vc: Velocidad de corte = 135 m/min (Herramienta de corte)

∅: Diámetro = 25.4 mm (Material en bruto)

Reemplazando los valores se obtiene las revoluciones de trabajo

$$n = \frac{135 \text{ m/min} * 1000}{\pi * 25.4 \text{ mm}} = 1691.8 \text{ RPM}$$

Debido a que la experimentación es enfocada a las revoluciones de trabajo de las máquinas convencionales, se ajusta el valor calculado al valor de las revoluciones máximas del torno convencional siendo esta de 1500 RPM. Con esto se determina los niveles que tendrá las revoluciones para la experimentación que se muestran en la tabla 2.3.

Tabla 2.3 Rango de revoluciones ajustado.

RANGO DE REVOLUCIONES DE EXPERIMENTACIÓN	
Revoluciones de trabajo	1691,8 RPM
Rango Superior	1500 RPM
Rango Intermedio	1200 RPM
Rango Inferior	900 RPM

(Fuente: Propia)

Para la determinación de la velocidad de avance de experimentación, se basó en los avances estándar que presentan los tornos convencionales, y que estos valores estén dentro del rango de trabajo del inserto, los cuales se muestran en la tabla 2.4.

Tabla 2.4. Avances ajustado de experimentación.

DETERMINACIÓN DE AVANCE DE EXPERIMENTACIÓN	
Avance Superior	0,2 mm/rev
Avance Intermedio	0,3 mm/rev
Avance Inferior	0,4 mm/rev

(Fuente: Propia)

Para la determinación de la profundidad de corte de experimentación, se ajustó a la profundidad usada en los tornos convencionales, y al rango de trabajo del inserto, esto es mostrada en la tabla 2.5.

Tabla 2.5. Profundidad ajustada de experimentación.

DETERMINACIÓN DE LA PROFUNDIDAD DE EXPERIMENTACIÓN	
Profundidad Superior	0,5 mm
Profundidad Intermedio	1 mm
Profundidad Inferior	1,5 mm

(Fuente: Propia)

Para verificar que las profundidades de corte de la tabla 2.5 no comprometan al equipo de trabajo, se determinó la profundidad de corte máxima en base a la potencia del torno, para ello se emplea también el avance máximo determinado anteriormente, la ecuación 2.3 permite cuantificar esta profundidad.

$$ap = \frac{(60 * 10^3) * Pc}{Vc * fn * kc}$$

Ecuación 2.3. Profundidad máxima en base a la potencia del Torno

(Fuente: Montgomery, 2004)

Donde:

ap: Profundidad máxima

pc: Potencia de la maquina = 7,5 kW (Hoja Técnica del Torno ROMI C420)

vc: Velocidad de corte = 135 m/min (Herramienta de corte)

kc: Fuerza especifica de corte = 2000 N/mm² (Catálogo Sandvick)

$$ap = 4.16 \text{ mm}$$

Con este valor se evidencia lo adecuado del rango de profundidad de corte determinado. Al definir completamente los valores de los parámetros de mecanizado para la experimentación, se muestra en la tabla 2.6 los niveles de experimentación con sus respectivos valores.

Tabla 2.6. Parámetros y niveles cuantitativos de experimentación.

RPM	AVANCE (mm/rev)	PROFUNDIDAD (mm)
950	0,2	0,5
950	0,2	1
950	0,2	1,5
950	0,3	0,5
950	0,3	1
950	0,3	1,5
950	0,4	0,5
950	0,4	1
950	0,4	1,5
1200	0,2	0,5
1200	0,2	1
1200	0,2	1,5
1200	0,3	0,5
1200	0,3	1
1200	0,3	1,5
1200	0,4	0,5
1200	0,4	1
1200	0,4	1,5
1500	0,2	0,5
1500	0,2	1
1500	0,2	1,5
1500	0,3	0,5
1500	0,3	1
1500	0,3	1,5
1500	0,4	0,5
1500	0,4	1
1500	0,4	1,5

	Condición baja
	Condición moderada
	Condición agresiva

(Fuente: Propia)

2.2. Pruebas experimentales de rugosidad

2.2.1. Preparación de probetas y montaje

De acuerdo al diseño de experimentos, se determinó la cantidad de experimentos siendo esta de veinte y siete experimentos, con esto se adquirió ejes cilíndricos de 1.8 metros de longitud, los cuales se obtuvieron 27 ejes de 70 mm de longitud cada uno. El diámetro de experimentación es de 25.4 mm como material en bruto, esto se muestra en la figura 2.3.



Figura 2.3. Probeta premecanizada

(Fuente: Propia)

Al término de la preparación se procede al montaje de la probeta en el torno, ya que el torno es automático tiene su forma apropiada de montaje, el mandril es hidráulico y se regulan las muelas respecto al diámetro de la probeta. En el controlador del torno se procede a ingresar las características geométricas de la probeta y se posiciona la herramienta con respecto a la probeta para conseguir el mecanizado deseado. Seguidamente se realiza la programación en código G del mecanizado experimental (Anexo I) en donde se introduce los parámetros de mecanizado determinados en la sección anterior, en cada corrida se variará los parámetros de acuerdo a las combinaciones establecidas en la sección anterior. Las probetas mecanizadas se deben almacenar en recipientes aislados en donde la oxidación de las mismas sea la mínima. En la figura 2.4 se muestra la presentación del mecanizado final con parámetros de mecanizado aleatorio.



Figura 2.4. Montaje para mecanizado.

(Fuente: Propia)

2.2.2. Medición de Rugosidad

Concluida la etapa de mecanizado se procedió a registrar la rugosidad superficial para cada nivel de experimentación, que es el primer paso en la caracterización de la calidad superficial. El equipo utilizado para la medición fue un rugosímetro de marca Mitutoyo

modelo SJ-210 con un palpador de punta de diamante, el palpador recorre una longitud de 5 mm sobre la superficie mecanizada. El rugosímetro expresa la rugosidad en términos de la media aritmética dentro de la longitud de muestreo. Para la toma de datos la probeta debe estar colocada sobre una base cilíndrica y asentada en la parte pre-mecanizada para que exista una correcta obtención de datos y no comprometer la superficie mecanizada. Tomando en cuenta las recomendaciones del Machining Data Book, se toma tres mediciones de rugosidad, las mediciones se las realiza girando 120 grados horario o antihorario a partir de la primera medición, y colocando el palpador perpendicular a la superficie mecanizada. En la figura 2.5 se muestra como se realizó el montaje tanto de la probeta como del equipo para las respectivas mediciones de rugosidad.



Figura 2.5. Medición de rugosidad.

(Fuente: Propia)

2.3. Ensayo de microdureza

El ensayo de microdureza permite analizar la condición de la superficie del material, se entiende como la propiedad del material a resistir la penetración de un indentador bajo cierta carga. Este ensayo de microindentación utiliza una máquina calibrada con indentador de diamante de geometría específica, la carga de ensayo se encuentra entre 1 a 1000 gf, en donde al ser aplicada la carga sobre el material, deforma a este en forma de rombo, para determinar la microdureza del material se toman las medidas de las diagonales. Dentro del estudio de la calidad superficial se pretende conseguir la microdureza a lo largo de la sección transversal de la probeta, definiendo el comportamiento de la capa superficial deformada (ASTM E384-17, 2017).

2.3.1. Probetas para ensayo de microdureza

Para la determinación de la microdureza, se utilizan las probetas preparadas para un ensayo metalográfico. Este tipo de probetas son preparadas con resina para el adecuado montaje de cada una de las probetas. La diferencia con las probetas metalográficas radica

que en las dos caras de la probeta deben estar sin resina para que exista un valor real de microdureza. La figura 2.6 muestra la forma de las probetas de microdureza.



Figura 2.6. Probetas para ensayo de microdureza.

(Fuente: Propia)

2.3.2. Equipos para el Ensayo de Microdureza

La ejecución del ensayo se realizó en las instalaciones del Laboratorio de Metalografía, Desgaste y Falla de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional, en donde se facilitó el equipo de ensayo, siendo este el microdurómetro de marca METKON. Las especificaciones técnicas se detallan en la tabla 2.7.

Tabla 2.7. Especificaciones Técnicas del Microdurómetro.

DESCRIPCIÓN	ESPECIFICACIÓN	ESQUEMA
Marca	METKON	
Modelo	DURONLINE-M	
Serie	T20150002	
Peso	30 kg	
Indentador	Vickers	

(Fuente: Propia)

2.3.3. Procedimiento del ensayo de microdureza

La realización del ensayo se fundamentó en la norma ASTM E384-17 (Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials), los pasos a seguir se detallan a continuación:

- Realizar los pasos para la obtención de probetas metalográficas.
- Rectificar la superficie de resina opuesta a la cara principal de contacto, en donde se obtenga superficies sin resina y completamente planas entre sí.

- Seleccionar la escala de dureza a trabajar en el microdurómetro METKON (HV o HK).
- Seleccionar el indentador respecto a la escala a ensayar.
- Colocar la probeta sobre el soporte del microdurómetro.
- Posicionar adecuadamente la probeta de manera horizontal y vertical mediante el lente óptico incluido en el microdurómetro.
- Introducir la carga y el tiempo de ensayo en el panel digital del microdurómetro.
- Cargar el microdurómetro el tiempo definido.
- Capturar las diagonales proyectada por medio del software auxiliar del microdurómetro, realizar mínimo 4 capturas.
- Realizar mínimo 3 indentaciones sobre la superficie.
- Realizar las mediciones de las diagonales con ayuda del medidor de dureza del software auxiliar especificando la carga utilizada.

2.4. Ensayo metalográfico

El ensayo metalográfico estudia las características microestructurales, las cuales se relacionan con las propiedades físicas, mecánicas y químicas del material. El ensayo permite determinar el tamaño de grano, las fases que componen el material, defectos como las inclusiones no metálicas, escorias, solapamientos, rayaduras, etc. Para la caracterización de la calidad superficial se busca identificar la zona de la capa superficial deformada plásticamente y el material base, esto se muestra en la figura 2.7.

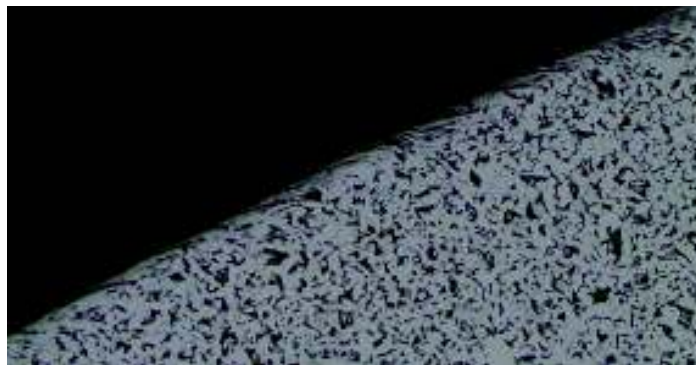


Figura 2.7. Capa superficial deformada.

(Fuente: Propia)

2.4.1. Probetas para ensayo metalográfico

Para el análisis metalográfico, se utiliza superficies que presenten las características microestructurales a estudiar, para esto se elige una dirección en particular para la extracción de la probeta metalográfica, siendo la dirección transversal o longitudinal como

opciones. La figura 2.8 muestra la disposición de las probetas, finalizadas la extracción y el montaje.



Figura 2.8. Probetas para ensayo metalográfico.

(Fuente: Propia)

2.4.2. Equipos para el ensayo metalográfico

La ejecución del ensayo se realizó en las instalaciones del Laboratorio de Metalografía de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional. Las máquinas utilizadas fueron de desbaste grueso y fino, como también los reactivos para atacar químicamente las probetas y los equipos de observación y medición. Las tablas 2.8, 2.9 y 2.10 muestran las características técnicas de las máquinas y equipos utilizados.

Tabla 2.8. Especificaciones técnicas del equipo de desbaste grueso.

DESCRIPCION	ESPECIFICACIÓN	ESQUEMA
Marca	BUEHLER	
Modelo	121-0M-84	
Serie	-	
Número de Abrasivo	100 granos/in ²	
Voltaje	220 V	
Amperaje	6,2 A	

(Fuente: Propia)

Tabla 2.9. Especificaciones técnicas del equipo de pulido fino.

DESCRIPCIÓN	ESPECIFICACIÓN	ESQUEMA
Marca	FORCIMAT	
Modelo	FORCIMATPOL 2V	
Serie	N20161076	
Voltaje	230 V	
Frecuencia	50/60 Hz	

(Fuente: Propia)

Tabla 2.10. Especificaciones técnicas del microscopio óptico.

DESCRIPCION	ESPECIFICACIÓN	ESQUEMA
Marca	OLYMPUS	
Modelo	GX41F	
Serie	4D41167	
Voltaje	230/240 V	
Frecuencia	50/60 Hz	

(Fuente: Propia)

2.4.3. Procedimiento del Ensayo Metalográfico

- Extraer las probetas cortando transversalmente la zona mecanizada con sierra manual tomando en cuenta que no exista cambios bruscos de temperatura. Se recomienda que la longitud de extracción este entre 40 y 50 mm para que el montaje en la resina sea adecuado.
- Montar las probetas extraídas en moldes cilíndricos de diámetro equivalente a los que se encuentren en el equipo de desbaste y pulido automático. En estos moldes se procede a colocar la resina en toda la altura del molde cilíndrico. Dependiendo de los reactivos utilizados, el tiempo de secado varía entre 30 a 60 min.
- Desbastar con lija metálica cada probeta de manera que se remuevan las rebabas generadas por el corte, también se obtendrá paralelismo entre caras.
- Desbastar con lijas de agua N° 240, 600, 1200 en el equipo de desbaste y pulido automático para cada probeta en un intervalo de tiempo de 3 a 4 minutos. Acabada

la secuencia de desbaste, se recomienda lavar con alcohol al 99.8% para que las probetas no se oxiden.

- Pulir cada probeta en paño con lubricante de suspensión de diamante de 1 o 6 micras en un intervalo de tiempo de 1 a 2 minutos, las superficies deben ser lo más planas y uniformes posible.
- Atacar químicamente la superficie pulida a analizar con el reactivo Nital al 2% en intervalos de tiempo de 10 segundos para que se pueda observar la microestructura deformada plásticamente y el material base.
- Analizar la microestructura con el microscopio óptico para magnificaciones de 100 y 500 X, enfocando la capa superficial deformada. Seguidamente capturar las imágenes con el software auxiliar del microscopio para medir el espesor de capa deformada para cada probeta.

2.5. Ensayo de composición química

El análisis de composición química permite verificar la cantidad de elementos presentes en un material como el acero, comparando con la composición entregada por el fabricante. Dentro del análisis se evalúa los principales componentes del acero como son: el carbono (C), azufre (S), fósforo (P) y manganeso (Mn), los cuales influyen en las propiedades del material, en base a los lineamientos presentados para los aceros según la norma ASTM A29.

2.5.1. Probetas para ensayo de composición química

Para la elaboración de las probetas para composición química, estas deben ser cilíndricas con una superficie plana en donde va a ser asentada en el equipo de ensayo, el diámetro y la altura del cilindro no deben ser más grandes a 1 pulgada (25.4 mm) para que puedan ser montadas correctamente en el equipo. La figura 2.9 muestra la forma de la probeta de ensayo.



Figura 2.9. Probeta para ensayo de composición química.

(Fuente: Propia)

2.5.2. Equipos de ensayo de composición química

La ejecución del ensayo se realizó en el Laboratorio de Fundición de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional. El equipo utilizado fue un espectrómetro de chispa, el cual en la tabla 2.11 muestra sus especificaciones técnicas.

Tabla 2.11. Especificaciones Técnicas del Espectrómetro.

DESCRIPCION	ESPECIFICACIÓN	ESQUEMA
Marca	BRUKER	
Modelo	Q2 ION	
Serie	-	
Peso	28 kg	
Voltaje	100/240 V	
Frecuencia	50/60 Hz	

(Fuente: Propia)

2.5.3. Procedimiento para el ensayo de composición química

Se monta la probeta en el equipo de ensayo, el cual es el encargado de generar un arco eléctrico sobre la superficie de la probeta. El calentamiento emite ondas que son analizadas por el equipo, obteniendo los porcentajes de los elementos por medio del software auxiliar del equipo de ensayo.

2.6. Ensayo de tracción

El ensayo de tracción permite definir la resistencia a la tracción, límite de fluencia y la elongación que presenta el material ensayado verificando la materia prima. Se aplican cargas de tensión a lo largo del material hasta el momento que se fractura el material, siendo almacenados los datos obtenidos mediante el software de la máquina de ensayos. Al final del ensayo se obtiene la curva “Esfuerzo-Deformación” para el material ensayado, la figura 2.10 muestra la curva típica realizada en el ensayo.

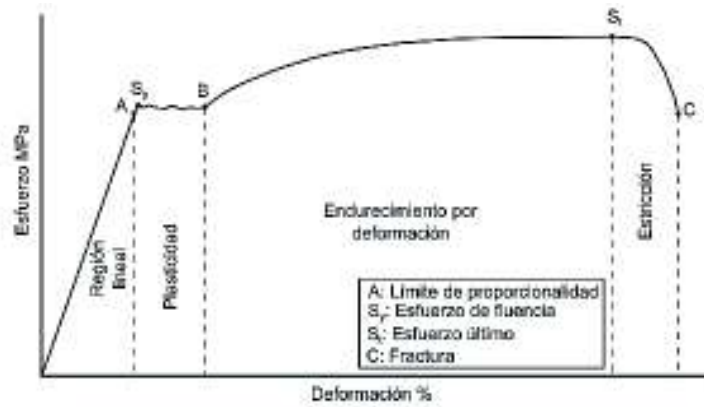


Figura 2.10. Curva Esfuerzo-Deformación.

(Fuente: Gere, 2016)

2.6.1. Probetas para el ensayo de tracción

La elaboración de las probetas siguió los lineamientos que presenta la norma ASTM 370 sección 9 para aceros, en donde la forma y dimensiones se muestran en la figura 2.11.

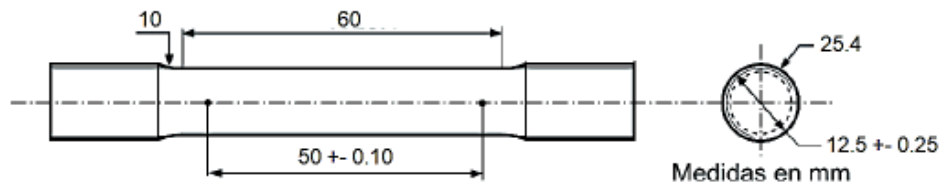


Figura 2.11. Especimen de tracción.

(Fuente: ASTM A370, 2017)

2.6.2. Equipos para el ensayo de tracción

La ejecución del ensayo se realizó en el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional. El equipo utilizado fue la máquina universal de ensayos el cual en la tabla 2.12 muestra sus especificaciones técnicas.

Tabla 2.12. Especificaciones Técnicas de la máquina de ensayos.

DESCRIPCIÓN	ESPECIFICACIÓN	ESQUEMA
Marca	TINIUS OLSEN	
Modelo	SUPER L	
Capacidad de carga	3000 kN	
Display	Digital	
Almacenamiento de datos	Software Navigator	

(Fuente: Propia)

2.6.3. Procedimiento para el ensayo de tracción

- Preparar las probetas según la norma ASTM E370.
- Tomar las medidas de las dimensiones iniciales de la probeta.
- Colocar la probeta en la maquina universal de ensayo, sujetar con las boquillas para evitar el deslizamiento.
- Programar la máquina con una velocidad de carga moderada (aprox. 3500 lbf/min).
- Encender la máquina de ensayos para comenzar la aplicación de la carga sobre la probeta.
- Tabular los datos obtenidos por el software de la máquina de ensayos.
- Desmontar la probeta.
- Medir las dimensiones finales de la probeta por medio del calibrador.
- Determinar la resistencia a la tracción y la elongación de la probeta ensayada.

2.7. Análisis multifuncional respecto a variables experimentales

Los experimentos que estudian dos o más variables dependientes e independientes se interesan en modelar la relación que existe entre ellos. Para el desarrollo de estas relaciones y su posterior análisis se introduce los modelamientos matemáticos, el más utilizado es el modelo de la regresión lineal, y se ajusta a un conjunto de datos experimentales. Los modelos polinomiales de grado inferior son los comúnmente usados como modelos de aproximación. Los modelos de regresión están en términos de modelos empíricos, ya que estos modelos son de fácil comprensión, interpretación e implementación en la mayoría de experimentos.

2.7.1. Modelamiento matemático

El modelo para los datos experimentales medidos se basa en el modelo de regresión lineal, específicamente en el modelo de regresión múltiple ya que el experimento considera tres variables independientes respecto a una variable dependiente (Montgomery, 2004). La regresión lineal múltiple es representada en la ecuación 2.6.

$$Y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \varepsilon$$

Ecuación 2.6. Regresión lineal múltiple

(Fuente: Montgomery, 2004)

Para encontrar cada coeficiente de la ecuación de regresión se emplea la aproximación matricial, utilizando notación matricial. Suponemos que existen k variables de regresión

para n observaciones $(X_{i1}, X_{i2}, X_{i3}, \dots, X_{ik}, Y_i)$, $i=1,2,\dots, n$. De esta manera la ecuación se transforma en la ecuación 2.7.

$$Y = X\beta + \varepsilon$$

Ecuación 2.7. Representación matricial de regresión

(Fuente: Montgomery, 2004)

Donde:

$$Y = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix} X = \begin{bmatrix} 1 & X_{11} & X_{21} & \dots & X_{1k} \\ 1 & X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 1 & X_{n1} & X_{n2} & \dots & X_{nk} \end{bmatrix} \beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix} \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix}$$

Y: matriz de mediciones

X: matriz de observaciones o combinaciones

β : matriz de coeficientes

ε : matriz de errores

La ecuación 2.10 muestra la obtención de los coeficientes.

$$\hat{\beta} = (X \cdot X)^{-1} X \cdot Y$$

Ecuación 2.10. Obtención de los coeficientes por medio del método matricial.

(Fuente: Montgomery, 2004)

Donde:

X: transpuesta de la matriz de observaciones

La matriz de observación que interviene en el modelamiento matemático previo a la medición de datos experimentales viene a ser los parámetros de mecanizado y sus respectivos niveles. Esta matriz se presenta en la tabla 2.6.

Otro método de obtención de los coeficientes de regresión es el método de los mínimos cuadrados, manteniendo las mismas variables de regresión y observaciones. La ecuación 2.9 expresa la forma del modelo:

$$Y = \beta + \sum_{j=1}^k \beta_j X_{ij} + \varepsilon$$

Ecuación 2.9. Representación del método de mínimos cuadrados.

(Fuente: Montgomery, 2004)

Este método consiste en la elección de los coeficientes β de la ecuación 2.9 de tal modo que la suma de los cuadrados de los errores ε sean los mínimos. La función de mínimos cuadrados se muestra en la ecuación 2.10.

$$L = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2$$

$$L = \sum_{i=1}^n \left(Y_i - \beta_0 - \sum_{j=1}^k \beta_j X_{ij} \right)^2$$

Ecuación 2.10. Función de mínimos cuadrados

(Fuente: Montgomery, 2004)

La función L minimiza con respecto a la cantidad de coeficientes a obtener $(\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k)$, satisfaciendo a la ecuación 2.11:

$$\left. \frac{\partial L}{\partial \beta_0} \right|_{\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \dots, \hat{\beta}_k} = -2 \sum_{i=1}^n \left(Y_i - \beta_0 - \sum_{j=1}^k \beta_j X_{ij} \right) = 0$$

Ecuación 2.11. Derivación de la función L

(Fuente: Montgomery, 2004)

Al simplificar la ecuación 2.11, se obtiene un sistema de ecuaciones para cada coeficiente.

$$\begin{array}{ccccccc} n\beta_0 & + & \beta_1 \sum_{i=1}^n x_{i1} & + \dots + & \beta_k \sum_{i=1}^n x_{ik} & = & \sum_{i=1}^n Y_i \\ \beta_0 \sum_{i=1}^n x_{i1} & + & \beta_2 \sum_{i=1}^n x_{i1}x_{i2} & + \dots + & \beta_k \sum_{i=1}^n x_{i1}x_{ik} & = & \sum_{i=1}^n x_{i1}Y_i \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \beta_0 \sum_{i=1}^n x_{ik} & + & \beta_2 \sum_{i=1}^n x_{ik}x_{i2} & + \dots + & \beta_k \sum_{i=1}^n x_{ik}^2 & = & \sum_{i=1}^n x_{ik}Y_i \end{array}$$

Ecuación 2.12. Obtención de coeficientes por medio de mínimos cuadrados

(Fuente: Montgomery, 2004)

Con la obtención de los coeficientes para cada variable dependiente se puede predecir el resultado de manera matemática, ya que solamente se tendrá que cambiar los niveles de las variables dependientes y observar los errores entre lo calculado y lo experimental. Estos errores deben tener una confiabilidad del 5% para que se acepte el modelo matemático.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Resultados para la materia prima

3.1.1. Ensayo de composición química

Los resultados obtenidos por medio del ensayo de composición química para el acero SAE 1018 son realizados por el laboratorio de Fundición y presentados en el Anexo II. En la tabla 3.1 se encuentran los porcentajes del promedio de los elementos principales realizados por el ensayo.

Tabla 3.1. Composición Química principales del acero SAE 1018.

ELEMENTO	PORCENTAJE
Carbono	0,152
Manganeso	0,572
Fósforo	0,031
Azufre	0,017

(Fuente: Ensayo de espectrometría)

La norma ASTM A29 detalla los porcentajes permisibles que debe tener el acero SAE 1018 dentro de su composición química, los mismos que son mostrados en la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Composición Química del acero SAE 1018 en base a la norma A29.

ELEMENTO	PORCENTAJE
Carbono	0,15-0,20
Manganeso	0,60-0,9
Fósforo	0,04
Azufre	0,05 MAX

(Fuente: ASTM A29, 2017)

3.1.2. Ensayo de tracción

Los resultados del ensayo de tracción obtenidos para el acero SAE 1018 en base a la probeta maquinada de longitud 50 mm, parten de la tabulación de los datos entregados por el ensayo de tracción. Con esto se realizó la elaboración del diagrama esfuerzo-deformación, el cual se muestra en la figura 3.1.

En la tabla 3.3 se indica las características obtenidas a partir del ensayo de tracción realizado sobre el material base.

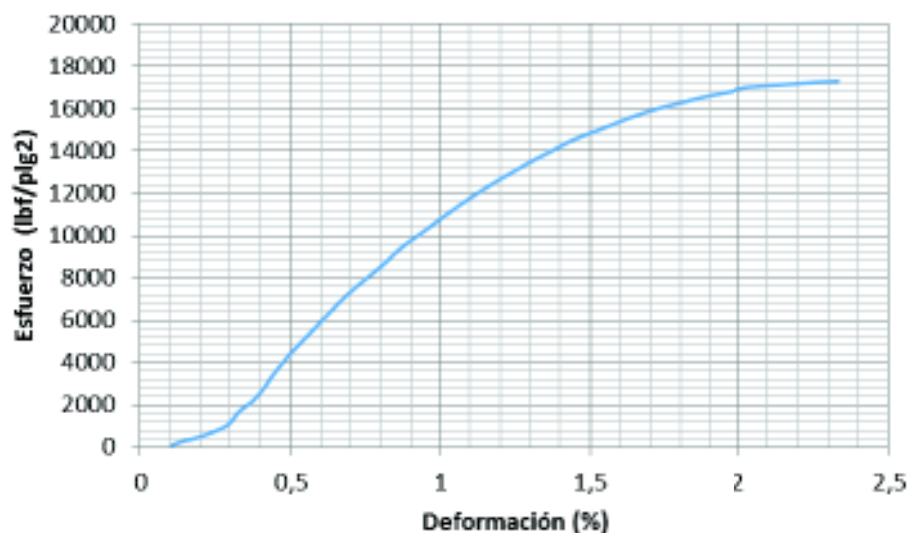


Figura 3.1. Diagrama Esfuerzo-Deformación del acero SAE 1018.

(Fuente: Ensayo de Tracción)

Tabla 3.3. Valores obtenidos del acero SAE 1018.

ESPECIMEN	RESISTENCIA A LA TRACCIÓN		% ELONGACIÓN
	MPa	ksi	
1	626,4	90,9	17,7
2	633,4	91,9	15,2
3	618,6	89,7	19,9

(Fuente: Ensayo de Tracción)

3.2. Resultados para el elemento mecanizado

3.2.1. Medición de rugosidad superficial

Para la evaluación de la rugosidad superficial se realizó las mediciones sobre la zona mecanizada, como lo sugiere la norma ANSI B46.1 sección 1 y sección 4. Específicamente para este caso se realizaron 3 mediciones para cada probeta, las cuales están regidas por las combinaciones experimentales anteriormente mencionadas, y en donde se obtiene los siguientes resultados expuestos en la tabla 3.4.

Tabla 3.4. Rugosidad Superficial obtenida para cada nivel de experimentación.

PARAMETROS DE MECANIZADO			RUGOSIDAD	DIÁMETRO FINAL
RPM	AVANCE (mm/rev)	PROFUNDIDAD (mm)	Rprom (µm)	(mm)
950	0,2	0,5	1,445	24,5
950	0,2	1	0,957	23,7
950	0,2	1,5	1,129	22,7
950	0,3	0,5	2,190	24,8
950	0,3	1	2,617	23,9
950	0,3	1,5	2,008	22,7

950	0,4	0,5	3,005	24,6
950	0,4	1	4,002	23,8
950	0,4	1,5	4,021	22,7
1200	0,2	0,5	0,934	25
1200	0,2	1	1,176	23,9
1200	0,2	1,5	2,041	22,9
1200	0,3	0,5	2,258	24,9
1200	0,3	1	1,443	23,9
1200	0,3	1,5	1,946	22,9
1200	0,4	0,5	5,152	23,78
1200	0,4	1	6,076	22,75
1200	0,4	1,5	6,892	21,75
1500	0,2	0,5	3,388	23,75
1500	0,2	1	4,166	22,54
1500	0,2	1,5	2,224	21,75
1500	0,3	0,5	2,501	23,79
1500	0,3	1	3,899	23,54
1500	0,3	1,5	4,089	22,53
1500	0,4	0,5	4,020	24,53
1500	0,4	1	3,017	23,5
1500	0,4	1,5	2,548	22,75

(Fuente: Propia)

3.2.2. Esquematización de los datos de rugosidad

3.2.2.1. Considerando la profundidad de corte constante

Partiendo de los valores de rugosidad de la sección anterior, se muestra la tendencia que presenta la rugosidad en la figura 3.2.

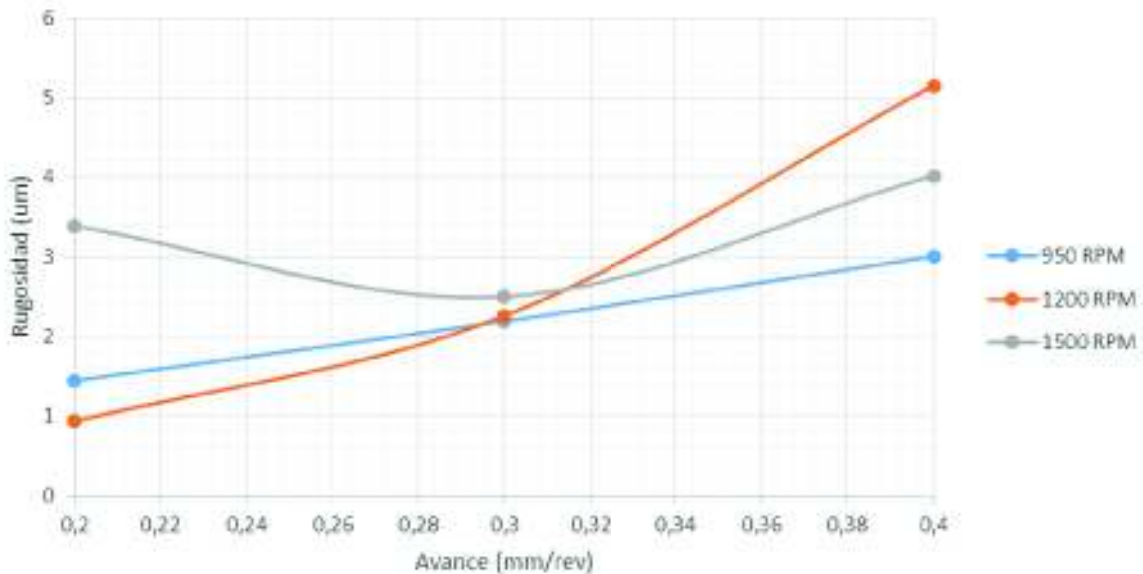


Figura 3.2. Variación de la rugosidad con respecto al avance para diferentes velocidades de corte y profundidad constante (0.5 mm).

(Fuente: Propia)

3.2.2.2. Considerando el avance de corte constante

Basándose también en los resultados de la tabla 3.4, se presenta el siguiente comportamiento de la rugosidad en la figura 3.3.

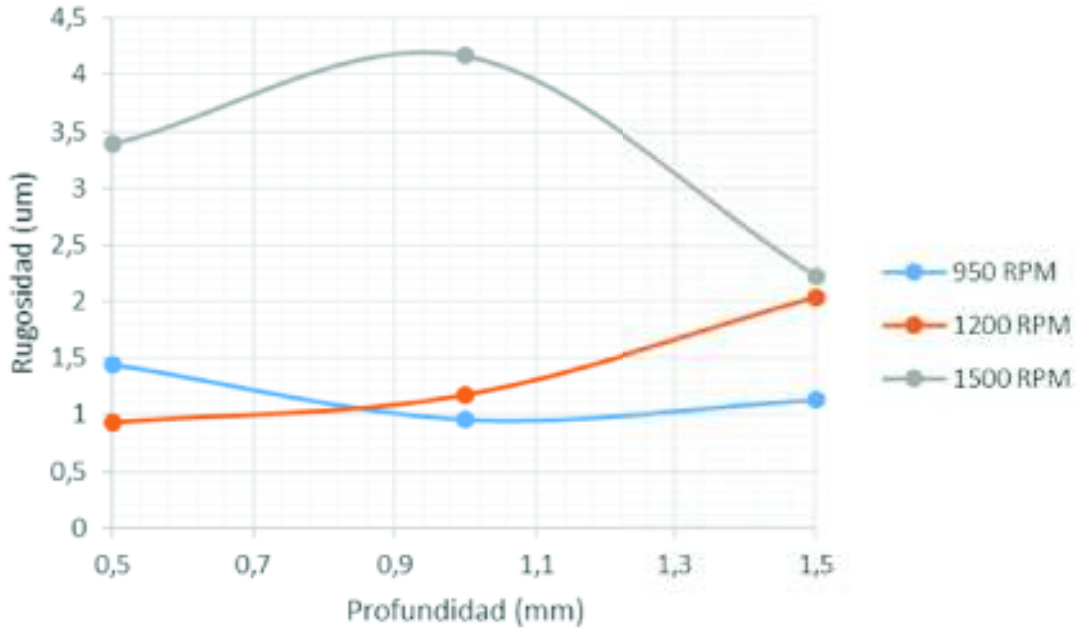


Figura 3.3. Variación de la rugosidad con respecto a la profundidad de corte para velocidades de corte y avance constante (0.2 mm/rev).

(Fuente Propia)

3.2.3. Modelamiento matemático respecto a variables experimentales

De acuerdo a lo expuesto en la metodología experimental, específicamente la sección 2.7, se escogió el método de mínimos cuadrados para el modelamiento, de este modo se designa los parámetros de cálculo para definir el sistema de ecuaciones a resolver siguiendo el modelo de regresión lineal planteado en la metodología (Montgomery, 2004), los parámetros de cálculo vienen a ser los expuestos en la tabla 3.4 excluyendo la columna del diámetro final. Obteniendo así los coeficientes que permiten establecer el modelo matemático para este experimento. Utilizando las ecuaciones 2.10, 2.11 y 2.12 se tiene los siguientes cálculos:

$$\sum x1 = \sum_{n=1}^{27} RPM_n = 32850$$

$$\sum x2 = \sum_{n=1}^{27} ap_n = 8.1$$

$$\sum x_3 = \sum_{n=1}^{27} f n_n = 27$$

$$\sum x_1^2 = \sum_{n=1}^{27} RPM_n^2 = 41332500$$

$$\sum x_2^2 = \sum_{n=1}^{27} f n_n^2 = 2.61$$

$$\sum x_3^2 = \sum_{n=1}^{27} a p_n^2 = 31.5$$

$$\sum x_1 x_2 = \sum_{n=1}^{27} RPM_n f n_n = 9855$$

$$\sum x_1 x_3 = \sum_{n=1}^{27} RPM_n a p_n = 32850$$

$$\sum x_2 x_3 = \sum_{n=1}^{27} f n_n a p_n = 8.1$$

$$\sum x_1 y = \sum_{n=1}^{27} RPM_n Rugosidad = 9.8583 * 10^4$$

$$\sum x_2 y = \sum_{n=1}^{27} f n_n Rugosidad = 25.87$$

$$\sum x_3 y = \sum_{n=1}^{27} a p_n Rugosidad = 80.14$$

Siguiendo la forma designada en la metodología experimental de representación del sistema de ecuaciones de regresión lineal, se muestra el sistema adaptado para este experimento:

$$27\beta_0 + 32850\beta_1 + 8.1\beta_2 + 27\beta_3 = 79.14$$

$$32850\beta_0 + 41332500\beta_1 + 9855\beta_2 + 32850\beta_3 = 9.8583 * 10^4$$

$$8.1\beta_0 + 9855\beta_1 + 2.61\beta_2 + 8.1\beta_3 = 25.87$$

$$27\beta_0 + 32850\beta_1 + 8.1\beta_2 + 31.5\beta_3 = 80.14$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones se obtiene la matriz de coeficientes del modelo matemático:

$$\beta = \begin{bmatrix} -2.8805 \\ 0.0017 \\ 11.8191 \\ 0.2228 \end{bmatrix}$$

El modelo matemático del experimento propuesto es el siguiente:

$$Rugosidad = -2.8805 + 0.0017 * RPM + 11.8191 * fn + 0.2228 * ap$$

3.2.4. Respuesta estadística y validación del modelo matemático

Utilizando el software estadístico de nombre STATGRAPHICS, se introdujo los valores experimentales para simular y obtener una comparación entre los coeficientes calculados en la sección anterior. La tabla 3.5 muestra la tabla ANOVA la cual permite analizar la variabilidad de cada parámetro del experimento.

Tabla 3.5. Análisis ANOVA de la experimentación.

VARIABLE	SUMA DE CUADRADOS	GRADOS DE LIBERTAD	RAZON F	VALOR P
RPM	3,99057	1	2,88	0,1033
Avance	25,1433	1	18,14	0,0003
Profundidad	0,223428	1	0,16	0,6918
Error Total	31,8882	-	-	-

(Fuente: Statgraphics)

La tabla 3.6 muestra los coeficientes de regresión generados por el software para el análisis estadístico.

Tabla 3.6. Coeficientes generados por el software

COEFICIENTE	ESTIMADO
Constante	-2,93474
RPM	0,00171218
Avance	11,8191
Profundidad	0,222824

(Fuente: Statgraphics)

La tabla 3.7 muestra el análisis ANOVA de los valores experimentales del estudio de Cakir [9] para validar el modelo utilizado en este trabajo.

Tabla 3.7. Análisis ANOVA de la validación.

VARIABLE	SUMA DE CUADRADOS	GRADOS DE LIBERTAD	RAZON F	VALOR P
RPM	0,783816	1	28,47	0,0000
Avance	7,4239	1	267,64	0,0000
Profundidad	0,0519296	1	1,89	0,1777
Error Total	8.53497	-	-	-

(Fuente: Statgraphics)

La tabla 3.8 muestra los coeficientes de regresión de validación del modelo.

Tabla 3.8. Coeficientes de validación

COEFICIENTE	ESTIMADO
Constante	-0,034038
RPM	-0,00495139
Avance	12,5711
Profundidad	0,106111

(Fuente: Statgraphics)

3.2.5. Ensayo de Microdureza

3.2.5.1. Zona transversal de la probeta

En la figura 3.4 se presenta el método de realización de la indentación sobre la superficie transversal de la probeta partiendo desde la capa superficial deformada hasta el material base, en donde se puede observar las diagonales las cuales son medidas para la determinación de la microdureza.

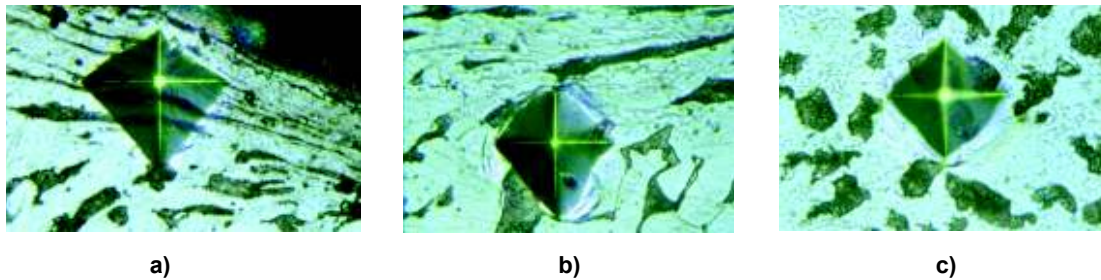


Figura 3.4. Indentación sobre: a) Capa superficial deformada, b) Bajo la capa superficial deformada, c) Material base.

(Fuente: Propia)

Las tablas 3.9, 3.10 y 3.11 muestran los valores obtenidos de la medición de microdureza para cada sección de probeta experimental.

Tabla 3.9. Variación de la microdureza con respecto a la distancia de indentación para parámetros constantes de revoluciones y avance (950 RPM, 0.2 mm/rev) y parámetro variable de profundidad de corte (a) 0.5 mm, b) 1 mm, c) 1.5 mm).

Número	Dureza (HV)	Distancia bajo la superficie (mm)	Número	Dureza (HV)	Distancia bajo la superficie (mm)	Número	Dureza (HV)	Distancia bajo la superficie (mm)
1	240,06	0	1	242,65	0	1	246,49	0
2	233,76	0,5	2	229,34	0,5	2	238,71	0,5
3	221,56	1,5	3	214,6	1,5	3	212	1,5

(Fuente: Propia)

Tabla 3.10. Variación de la microdureza con respecto a la distancia de indentación para parámetros constantes de revoluciones y avance (1200 RPM, 0.2 mm/rev) y parámetro variable de profundidad de corte (a) 0.5 mm, b) 1 mm, c) 1.5 mm).

Número	Dureza (HV)	Distancia bajo la superficie (mm)
1	233,9	0
2	225,7	0,5
3	203,4	1,5

a)

(Fuente: Propia)

Número	Dureza (HV)	Distancia bajo la superficie (mm)
1	236,79	0
2	228,93	0,5
3	202,2	1,5

b)

Número	Dureza (HV)	Distancia bajo la superficie (mm)
1	241	0
2	227	0,5
3	203	1,5

c)

Tabla 3.11. Variación de la microdureza con respecto a la distancia de indentación para parámetros constantes de revoluciones y avance (1500 RPM, 0.2 mm/rev) y parámetro variable de profundidad de corte (a) 0.5 mm, b) 1 mm, c) 1.5 mm).

Número	Dureza (HV)	Distancia bajo la superficie (mm)
1	230,55	0
2	223,46	0,5
3	208,51	1,5

a)

(Fuente: Propia)

Número	Dureza (HV)	Distancia bajo la superficie (mm)
1	234,7	0
2	220,6	0,5
3	207,1	1,5

b)

Número	Dureza (HV)	Distancia bajo la superficie (mm)
1	238,9	0
2	231,2	0,5
3	212	1,5

c)

3.2.6. Esquematización de la microdureza

De acuerdo a las tablas del apartado anterior se presenta las figuras 3.5, 3.6 y 3.7 para cada nivel de experimentación en donde se observa el comportamiento de la microdureza a lo largo del área transversal de la probeta.

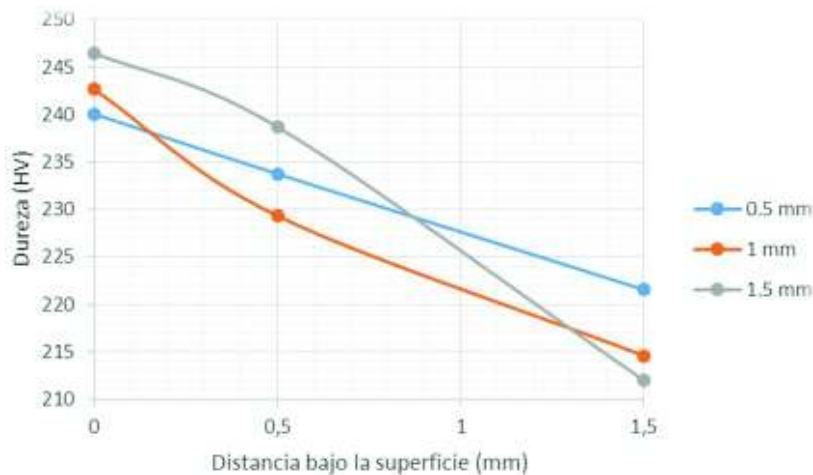


Figura 3.5. Variación de la microdureza con respecto a la distancia de indentación para diferentes profundidades de corte con revoluciones y avance constante. (950 RPM, 0.2 mm/rev)

(Fuente: Propia)

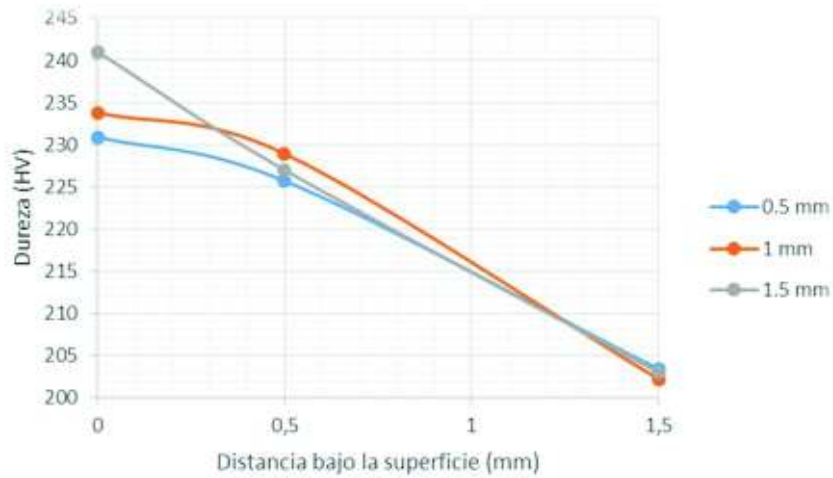


Figura 3.6. Variación de la microdureza con respecto a la distancia de indentación para diferentes profundidades de corte con revoluciones y avance constante. (1200 RPM, 0.2 mm/rev)

(Fuente: Propia)

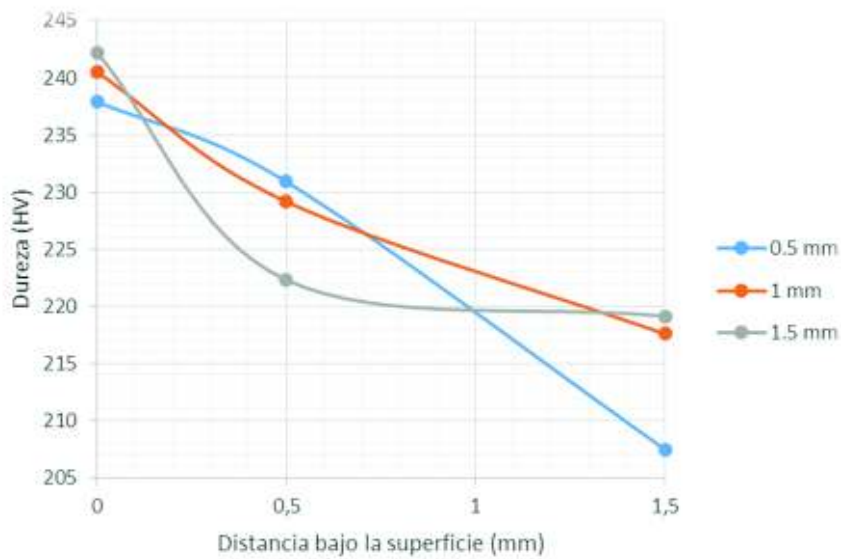


Figura 3.7. Variación de la microdureza con respecto a la distancia de indentación para diferentes profundidades de corte con revoluciones y avance constante. (1500 RPM, 0.2 mm/rev)

(Fuente: Propia)

3.2.7. Ensayo metalográfico

3.2.7.1. Espesor de capa superficial deformada

En la figura 3.8 se muestra como se definió los límites de medición de la capa superficial deformada, en donde se toma en cuenta el alargamiento de los granos que viene a ser la deformación a evaluar.

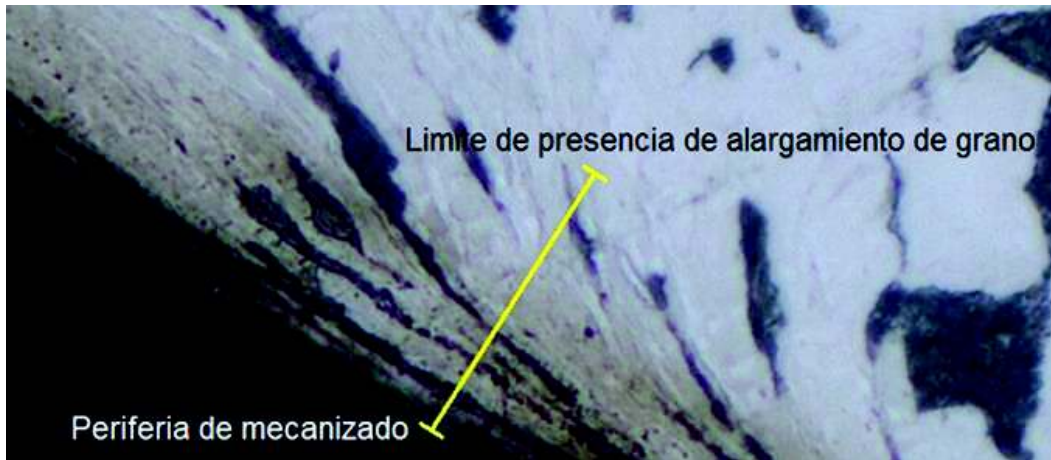


Figura 3.8. Límites de medición de capa superficial deformada
(Fuente: Propia)

En base a los límites definidos y partiendo por la probeta 1 de niveles de parámetros bajos, se presenta las figuras 3.9, 3.10, 3.11, las cuales tienen las mediciones del espesor de capa superficial deformada.

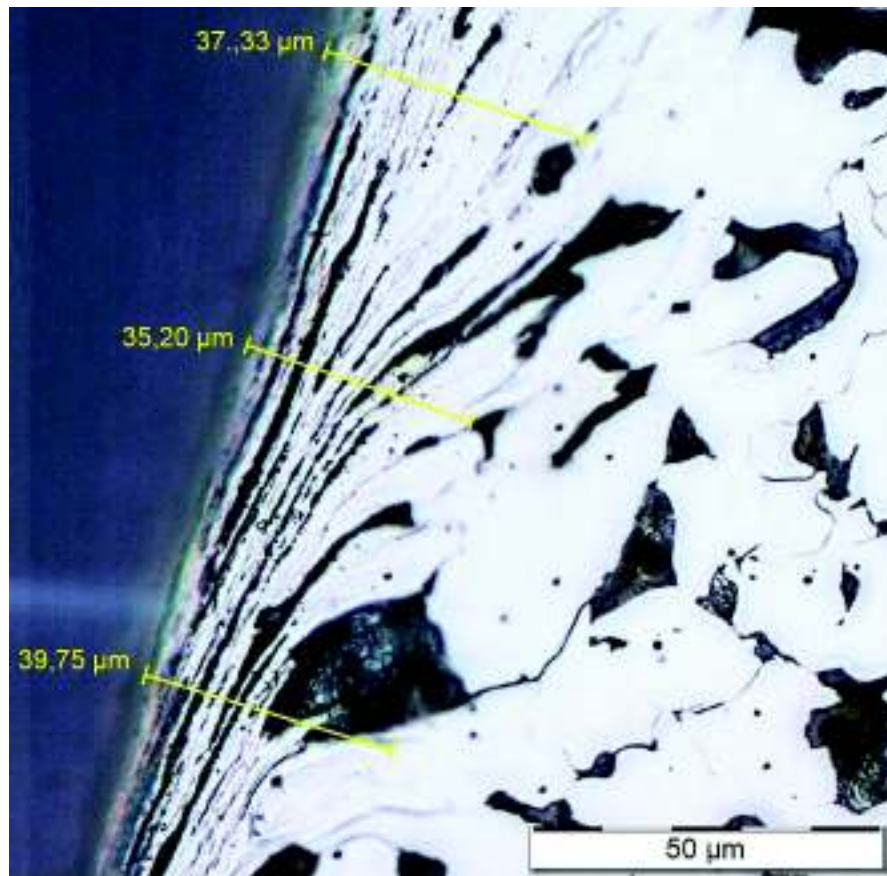


Figura 3.9. Mediciones de la capa superficial deformada para 950 RPM, 0.2 mm/rev y 0.5 mm
(Fuente: Propia)

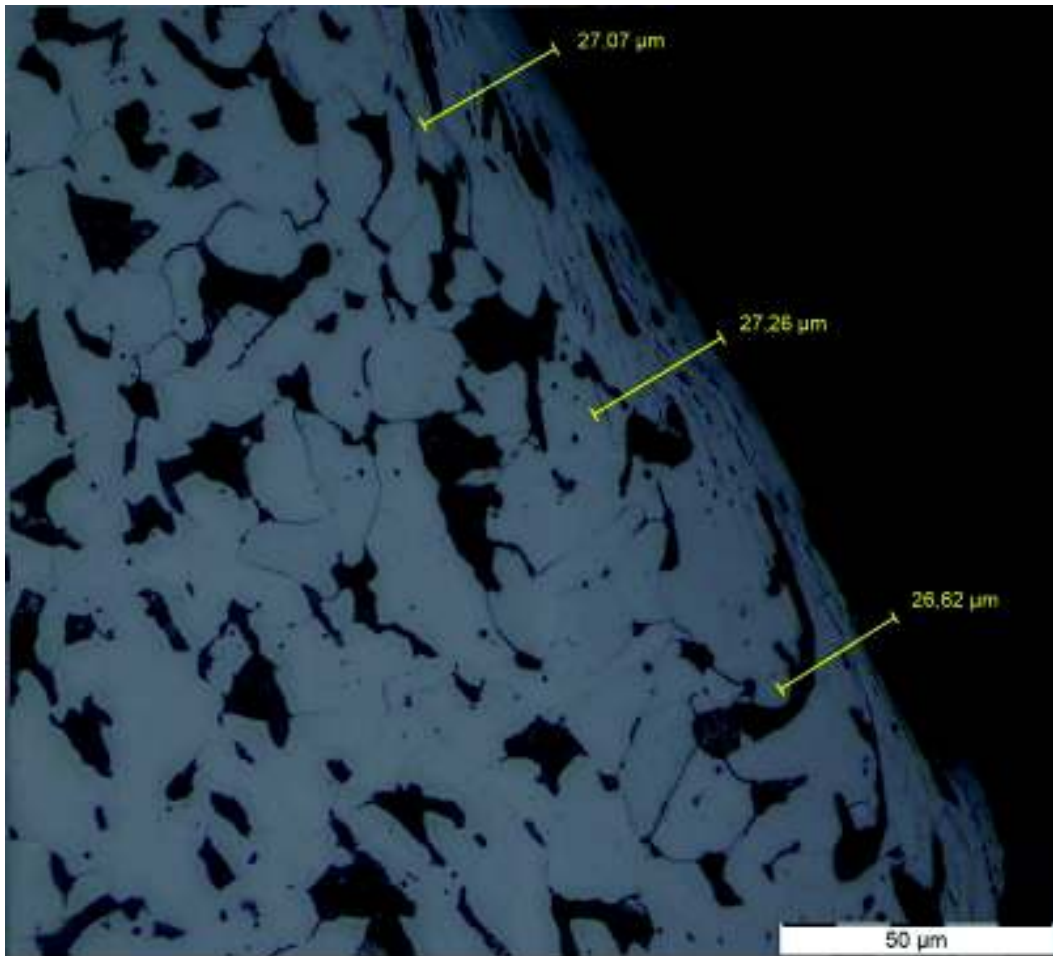


Figura 3.10. Mediciones de la capa superficial deformada para 1200 RPM, 0.2 mm/rev y 0.5 mm
(Fuente: Propia)

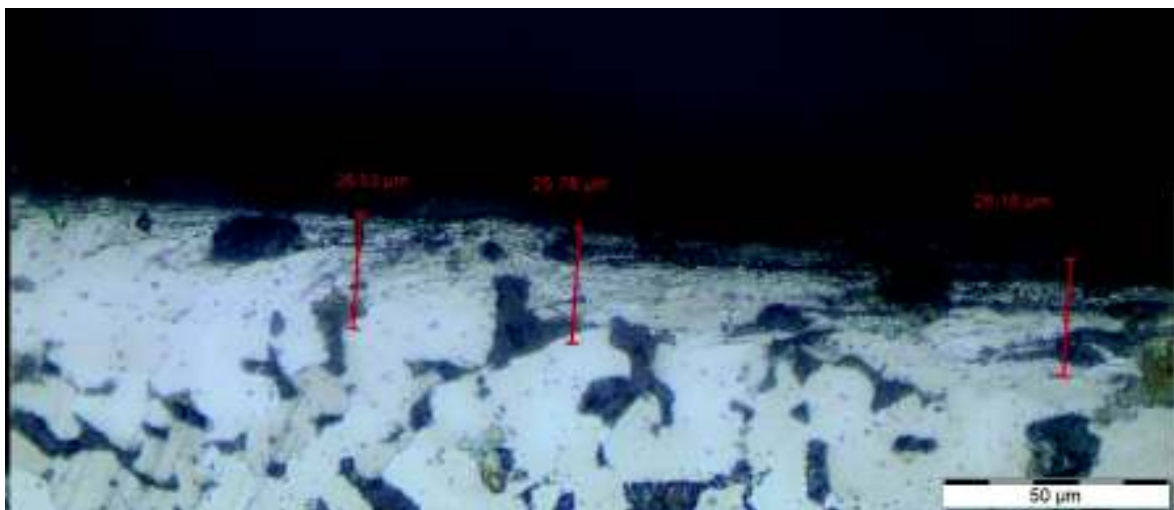


Figura 3.11. Mediciones de la capa superficial deformada para 1500 RPM, 0.2 mm/rev y 0.5 mm
(Fuente: Propia)

3.2.8. Síntesis de resultados principales

Partiendo de los resultados de cada uno de los ensayos realizados, la tabla 3.12 muestra para cada combinación de experimentos, los valores más relevantes de las evaluaciones realizadas para su análisis respectivo.

Tabla 3.12. Comportamientos cuantitativos principales de mecanizado.

PARAMETROS DE MECANIZADO			Rprom (μm)	Microdureza superficial (HV)	Espesor de capa superficial promedio (μm)
RPM	Avance (mm/rev)	Profundidad (mm)			
950	0,2	0,5	1,45	240,06	37,43
950	0,2	1	0,96	242,65	39,13
950	0,2	1,5	1,13	246,49	40,09
950	0,3	0,5	2,19	243,08	38,70
950	0,3	1	2,62	245,73	40,56
950	0,3	1,5	2,01	248,49	41,24
950	0,4	0,5	3,01	246,16	39,91
950	0,4	1	4,00	249,3	41,20
950	0,4	1,5	4,02	251,49	42,19
1200	0,2	0,5	0,93	230,9	27,17
1200	0,2	1	1,18	233,79	28,35
1200	0,2	1,5	2,04	241	29,13
1200	0,3	0,5	2,26	239,99	29,81
1200	0,3	1	1,44	241,3	30,28
1200	0,3	1,5	1,95	244,38	31,95
1200	0,4	0,5	5,15	237,89	39,13
1200	0,4	1	6,08	242,2	40,56
1200	0,4	1,5	6,89	247,9	41,20
1500	0,2	0,5	3,39	230,55	25,99
1500	0,2	1	4,17	234,7	27,74
1500	0,2	1,5	2,22	238,9	28,37
1500	0,3	0,5	2,50	232,15	26,97
1500	0,3	1	3,90	236,89	28,99
1500	0,3	1,5	4,09	240,06	30,19
1500	0,4	0,5	4,02	237,9	27,85
1500	0,4	1	3,02	240,49	29,47
1500	0,4	1,5	2,55	242,2	30,28

(Fuente: Propia)

3.3. Discusión

3.3.1. Comportamiento de la materia prima

Al comparar los resultados ensayados de la tabla 3.1 con los que detalla la norma ASTM A29, se identifica como los elementos principales al carbono (C), manganeso (Mn), fósforo (P) y azufre (S) que se encuentran dentro de los parámetros de la norma. Con esto se verifica que el material usado en la experimentación es de bajo carbono y sus elementos adicionales no presentan cantidades que comprometan a las propiedades mecánicas del acero AISI 1018.

Al observar los resultados obtenidos del ensayo de tracción de la materia prima se tiene una resistencia a la tracción promedio de 626.13 MPa y un porcentaje de elongación promedio de 17.6%, al comparar con la especificación técnica del material (499-695.8 MPa, 20% de elongación máxima) se verifica las propiedades del material, que se hallan dentro de las especificaciones establecidas del acero AISI 1018.

3.3.2. Comportamiento superficial del mecanizado

Los resultados mostrados en las figura 3.2 y las figuras del Anexo VII presentan para los tres niveles de revoluciones (900, 1200 y 1500 RPM) y de profundidad de corte (0.5, 1 y 1.5 mm), un incremento de la rugosidad al incrementar el avance, esto se debe a que la herramienta debe recorrer más rápido la longitud a mecanizarse, esto produce un incremento en la fuerza de avance que necesita para recorrer esta longitud, haciendo que la remoción de material sea más agresiva, ocasionando una superficie rugosa. Se puede observar que existe una relación lineal entre la rugosidad y el avance. Es así que el valor más alto de rugosidad (6.892 μm) se encuentran en un nivel alto de avance y profundidad.

Para reducir la rugosidad superficial, el parámetro de las revoluciones debe estar en un nivel medio, ya que al incrementar las revoluciones se disminuyen las fuerzas de corte debido a que se extrae el material de manera continua y menos exigente, minimizando las vibraciones, como también está relacionado con el aumento del calor, ya que esto permite que la viruta fluya fácilmente al entrar en contacto con la herramienta, lo que permite el afinamiento de la superficie. Es comparable con el análisis de resultados para los parámetros de mecanizado presentados por Pawade [20], el cual afirma que la viruta es la que acumula más calor que el material a altas revoluciones. Para mantener esta disminución de rugosidad superficial, las revoluciones deben estar acompañadas con un nivel bajo de avance de corte, con esto también se consigue la disminución de las fuerzas de corte ya que el recorrido de la herramienta sobre el mecanizado es menos exigente, la afirmación del descenso de las fuerzas de corte tanto para el avance es verificado por el estudio realizado por Cakir [9], ya que justifica los bajos valores de rugosidad en el nivel bajo de avance de corte presentes en su investigación con el descenso de las fuerzas de corte. Las afirmaciones de la influencia tanto de las revoluciones como el avance es comparable con el análisis de resultados del estudio realizado por Agarwal [1], Jayant y Kunar [14], y Suhail [23], los cuales comparten la conclusión de que altos valores de revoluciones y un bajo valor de rugosidad generan bajos valores de fuerza de corte, lo que permite que la superficie sea menos rugosa.

La presencia de la profundidad de corte permite disminuir la rugosidad superficial combinando con altas revoluciones, ya que al remover más material se genera calor, este calor sumado al calor generado por las altas revoluciones permite que fluya de mejor manera la viruta en la herramienta y extrayendo fácilmente a esta, esto se observa en las figuras 3.3 y las figuras del Anexo VII. Aun así el nivel alto de la profundidad de corte está relacionado con un incremento de la fuerza de corte, ya que la herramienta tiene un mayor obstáculo para poder desplazarse, influyendo a la fuerza de avance, provocando que se genere vibraciones perjudicando a la superficie, es por eso que el mejor valor de acabado superficial ($0.934 \mu\text{m}$) se da a un nivel bajo de avance y de profundidad de corte.

3.3.2.1. Comparación entre el modelo matemático-estadístico y la validación

Al relacionar los coeficientes de la matriz de regresión lineal con los coeficientes de la experimentación generados por el software de la tabla 3.8 se observa que el valor de la constante presenta una mínima diferencia del 5%, lo que en términos estadísticos es aceptable. Al observar los valores P del análisis ANOVA de la tabla 3.5 se puede interpretar que el parámetro más influyente dentro del mecanizado es el avance ya que es un valor muy cercano a cero, y en términos estadísticos los valores P que tienden a cero son los más influyentes dentro de la experimentación. El parámetro menos influyente viene a ser la profundidad de corte ya que su valor P está más cercano a uno, y en términos estadísticos los valores P que tienden a uno son los menos influyentes dentro de la experimentación. La figura 3.12 muestra el diagrama de Pareto que relaciona los parámetros y su influencia.

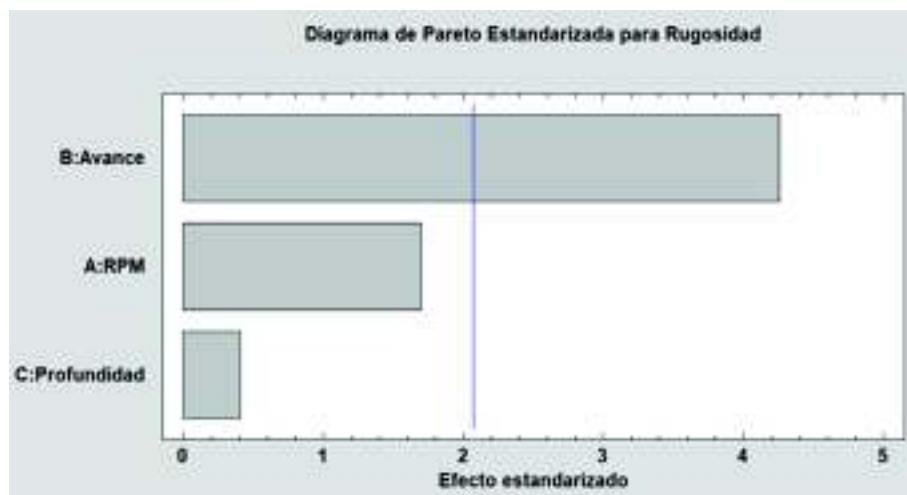


Figura 3.12. Influencia de los parámetros de mecanizado sobre la Rugosidad.

(Fuente: Software STATGRAPHICS)

Al comparar los coeficientes de regresión del estudio realizado por Cakir con los coeficientes generados por el método matemático del presente estudio, no presentó cambios entre estos coeficientes presentados por la tabla 3.8, verificando el modelo obtenido. Como también el análisis ANOVA de la tabla 3.7 para la validación, coloca al avance como el parámetro más influyente, al presentar su valor P muy cercano a cero, afirmando el análisis de resultados presentado por el estudio de Cakir.

3.3.3. Comportamiento microestructural

Los resultados presentados en las tablas 3.9, 3.10 y 3.11, y las tablas del Anexo VIII, como también las figuras del Anexo XI muestran un descenso en la microdureza a lo largo de la sección transversal de la probeta, partiendo desde la capa superficial deformada hasta el material base, teniendo en la capa deformada la zona más dura y el material base la zona más blanda. Para un nivel bajo de revoluciones (950 RPM), en las figuras 1 y 2 del Anexo XI se distingue las variaciones de la microdureza en la zona de la capa superficial. La tabla 3.13 muestra la microdureza en la capa superficial deformada con respecto a la profundidad de corte para diferentes avances.

Tabla 3.13. Variación de la microdureza con respecto a la variación de la profundidad de corte en la capa superficial deformada para revoluciones constantes y diferentes avances. (a) 950 RPM y 0.2 mm/rev, b) 950 RPM y 0.3 mm/rev, c) 950 RPM y 0.4 mm/rev)

Profundidad (mm)	Microdureza (HV)	Profundidad (mm)	Microdureza (HV)	Profundidad (mm)	Microdureza (HV)
0,5	240,06	0,5	243,08	0,5	246,16
1	242,65	1	245,73	1	249,3
1,5	246,49	1,5	248,49	1,5	251,49

a)

b)

c)

(Fuente: Propia)

Se observa que para los tres niveles de avance, al incrementar la profundidad de corte se incrementa la microdureza, esto se debe a que al aumentar la cantidad de material removido, sufre deformación plástica debido a las fuerzas de corte necesarias para remover el mismo, lo que provoca que los granos se estiren y exista un movimiento de las dislocaciones hacia los límites de grano, a medida que se sigue aumentando la profundidad de corte, existe un mayor estiramiento del grano, aumenta la presencia de dislocaciones y el movimiento de estas sea más difícil, lo que endurece el material. Para el nivel medio revoluciones (1200 RPM) se presenta un descenso de la microdureza en la capa superficial deformada con respecto al nivel anterior de revoluciones, esto se debe a que al aumentar las revoluciones, se aumenta la temperatura entre la herramienta y el material (150-300 °C), en ese rango de temperatura el material es más dúctil ya que se encuentra en la zona

de fragilidad azul, provocando que las fuerzas para remover el material disminuyan, disminuyendo a la par la deformación plástica, que se relaciona directamente con la disminución en la microdureza. Aun así se mantiene el incremento de la microdureza al incrementar la profundidad de corte para los tres niveles de avance de corte en este nivel de revoluciones, esto se evidencia en los valores de la tabla 1 del Anexo XII. Para el nivel alto de revoluciones (1500 RPM) se mantiene el descenso de la microdureza al aumentar las revoluciones, como también aumenta la microdureza al aumentar la profundidad de corte para los tres niveles de avance, esto se muestra en la tabla 2 del Anexo XII. El análisis de resultados realizados por Bosheh [8], Gurbuz [13] y Pawade [20] con parámetros de corte similares, muestran un descenso de la microdureza similar al incrementar las revoluciones, en donde los valores más altos de microdureza pertenecen al nivel bajo de revoluciones.

La tabla 3.14 muestra el comportamiento de la microdureza con respecto a la velocidad de avance de corte, se tiene un incremento de la microdureza al incrementar el avance para los tres niveles de profundidad de corte, la presencia de la fuerza de avance influencia en la microdureza, ya que se aumenta el recorrido de la herramienta sobre el material, exigiendo a la herramienta a remover más rápido el material, en consecuencia se incrementa la fuerza de avance, aumentando la deformación plástica sobre el material y obteniendo un material endurecido.

Para los niveles medio y alto de revoluciones (1200 y 1500 RPM) presenta el mismo descenso de la microdureza mostrado en el apartado anterior, al comparar con el nivel bajo de revoluciones, como también se mantiene el incremento de la microdureza al aumentar el avance de corte. Los valores analizados para estos parámetros se encuentran en la tabla 3-4 del Anexo XII.

Tabla 3.14. Variación de la microdureza con respecto a la variación del avance en la capa superficial deformada para revoluciones constantes y diferentes profundidades. (a) 950 RPM y 0.5 mm, b) 950 RPM y 1 mm, c) 950 RPM y 1.5 mm)

Avance (mm/rev)	Microdureza (HV)	Avance (mm/rev)	Microdureza (HV)	Avance (mm/rev)	Microdureza (HV)
0,2	240,06	0,2	242,65	0,2	246,49
0,3	243,08	0,3	245,73	0,3	248,49
0,4	246,16	0,4	249,3	0,4	251,49

a)

b)

c)

(Fuente: Propia)

Analizando los valores de microdureza para el nivel medio y alto de revoluciones (1200 RPM y 1500 RPM respectivamente) presentan convergencias a determinados valores, específicamente a 237 HV, 240 HV y 242 HV, influenciados por la combinación del avance y de la profundidad de corte, verificando lo expuesto anteriormente, esta tendencia fue

estudiada por Gurbuz [13] y Pawade [20], los cuales afirmaron que la profundidad de corte tiene un grado mayor de influencia seguido del avance sobre el aumento de la microdureza en la capa superficial deformada de la probeta. La figura 3.13 esquematiza la tendencia que presenta la microdureza en este caso.

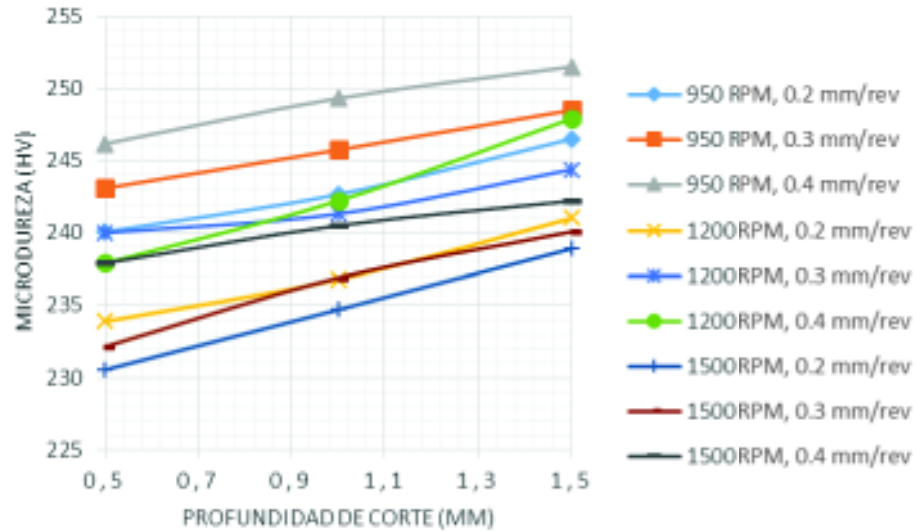


Figura 3.13. Comportamiento de la microdureza con respecto a la profundidad de corte en la capa superficial deformada.

(Fuente: Propia)

En la mayoría de indentaciones se produjo un defecto al momento de realizar la carga sobre la capa deformada ya que no solo se indentaba la capa sino también la resina que recubre la probeta, esto daba como resultado datos erróneos de microdureza, en la figura 3.14 se muestra lo anteriormente descrito.

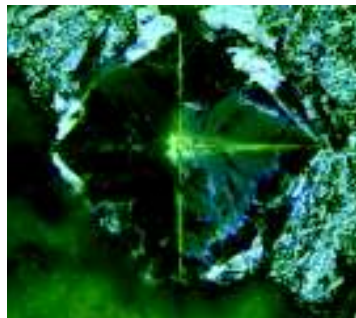


Figura 3.14. Desplazamiento del material y de la resina debido a la indentación sobre el borde del mecanizado.

(Fuente: Propia)

Debido a ello en la mayor parte de las probetas se tuvo que iniciar por debajo de la capa deformada o en el límite de la capa, aun así las microdurezas que presenta la capa y que

presenta su posterior límite de capa no evidencian una variación amplia para el estudio, la figura 3.15 resalta la forma de la indentación.

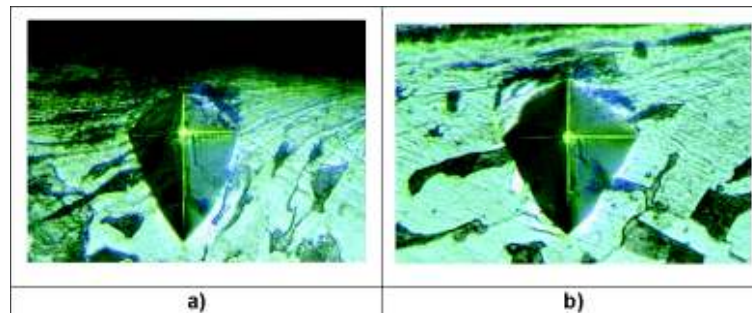


Figura 3.15. Variación de la forma de indentación sobre a) Capa superficial deformada, b) Límite de transición de la superficial y el material base.

(Fuente: Propia)

La ubicación de la indentación también afecta en la medición en el material base, pero lo que más influencia es la presencia de perlita en el material lo que ocasiona que la indentación tenga una reducción de las diagonales, obteniendo un valor mayor de microdureza, que al realizar la indentación sobre la ferrita que es más blanda y de microdureza menor. En la figura 3.16 se muestra la forma de indentación entre la ferrita y la perlita en el acero de experimentación.

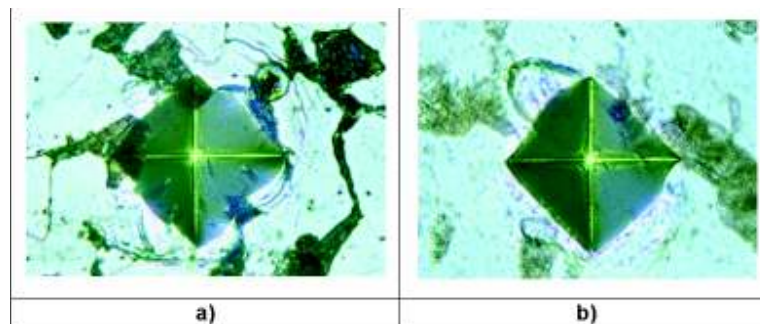


Figura 3.16. Variación de la forma de indentación sobre: a) Superficie acompañada de gran cantidad de perlita, b) Superficie acompañada de gran cantidad de ferrita

(Fuente: Propia)

3.3.4. Comportamiento del espesor de capa superficial deformada

Los resultados mostrados por las tablas 1-9 del Anexo X indican un incremento general del espesor de capa deformada respecto a la variación de profundidad. Para un nivel bajo de revoluciones (950 RPM) y un nivel bajo de avance de corte (0.2 mm/rev), a medida que se aumenta la profundidad de corte, la capa superficial deformada aumenta también, esto se debe a que al remover material, las capas deformadas se comprimen debajo de la

herramienta debido a las fuerzas producidas por la velocidad de corte, a medida que se aumenta la cantidad de material removido, aumenta la fuerza necesaria para remover el material, lo que provoca que mayor cantidad de capas se compriman, generando el aumento del espesor de capa deformada. Al cambiar por los niveles medio y alto de avance de corte (0.3-0.4 mm/rev), el espesor de capa aumenta con respecto al nivel bajo de avance debido al aumento de la fuerza de avance que necesita para que la herramienta recorra más rápido la longitud a mecanizar, manteniendo el comportamiento creciente del espesor de capa al incrementar la profundidad de corte. Para un nivel medio y alto de revoluciones (1200-1500 RPM) y un nivel bajo de avance (0.2 mm/rev), se observa un descenso del espesor de la capa superficial deformada en comparación del nivel anterior de revoluciones, esto se debe al motivo que se mencionó en la sección anterior, el incremento de revoluciones disminuyen las fuerzas de corte, ya que se eleva la temperatura entre la herramienta y el material, permitiendo que el material fluya y se remueva de forma menos exigente, también se observa el incremento del espesor de capa al incrementar la profundidad de corte, manteniendo el comportamiento analizado anteriormente. Con un nivel medio y alto de avance de corte (0.3-0.4 mm/rev), incrementa el espesor de capa en comparación al nivel anterior de avance, aun así el espesor de capa sigue aumentando al aumentar la profundidad de corte. El comportamiento analizado para el nivel bajo de avance se muestra en la figura 3.17. Para el nivel medio y alto de avance, los esquemas se encuentran en el Anexo XIII.

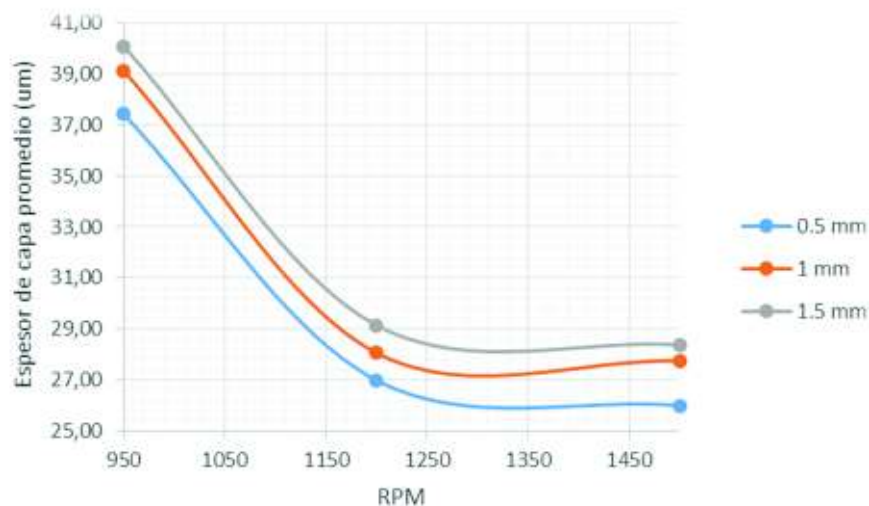


Figura 3.17. Comportamiento del espesor de capa promedio con respecto para diferentes revoluciones y profundidades de corte con avance constante (0.2 mm/rev).

(Fuente: Propia)

Interpretando la figura 3.17, se observa que para los tres niveles de profundidad, se tiene una alta variación de espesor de capa entre el nivel bajo y el nivel medio de revoluciones, mientras que no existen variaciones bruscas del espesor de capa para el nivel medio y alto de revoluciones, se puede ver que la tendencia del descenso del espesor de capa es uniforme, esto se debe al uso de refrigerante en la experimentación, disminuyendo la generación de calor por la fricción entre el material y la herramienta.

El análisis de resultados presentado por Bosheh [8] y Duan [10] muestra un descenso de la capa superficial al aumentar las revoluciones, como también al incrementar la profundidad de corte ocasiona el aumento de la capa superficial. Mientras que el análisis de resultados del estudio de Shi [22] muestra la reducción de la temperatura del material disminuyendo la capa superficial al utilizar refrigeración durante el mecanizado, como también la reducción de la fricción entre el material y la herramienta.

3.3.5. Comportamiento final de la experimentación

Interpretando los datos de la tabla 3.13, primeramente se analizó el comportamiento final manteniendo un nivel bajo de profundidad de corte constante, y colocando como parámetros variables a las revoluciones y al avance de corte, se observa que las revoluciones son influyentes en el descenso de la microdureza y el espesor de capa superficial y en el afinamiento del acabado superficial, al contrario del avance de corte que influencia en el aumento de la rugosidad, microdureza y de la capa superficial de corte. La figura 3.18 muestra la tendencia de los parámetros influyentes a profundidad de corte constante.

De acuerdo a la figura 3.18 se observa que a un nivel bajo de revoluciones y de avance (950 RPM, 0.2 mm/rev) se tiene un valor medio de rugosidad, y altos valores de microdureza y espesor de capa (1.45 μm , 240.06 HV, 37.43 μm), al combinar un nivel medio de revoluciones y un nivel bajo de avance de corte (1200 RPM, 0.2 mm/rev) se tiene una disminución en la rugosidad, microdureza y espesor de capa superficial (0.93 μm , 230 HV, 27,17 μm). Las revoluciones tienen un alto efecto sobre el mecanizado y los comportamientos evaluados manteniendo un nivel bajo de avance y de profundidad de corte, ya que al observar los valores expuestos, el material es removido con una exigencia menor, consiguiendo una superficie y subsuperficie menos afectada por el trabajo realizado sobre esta.

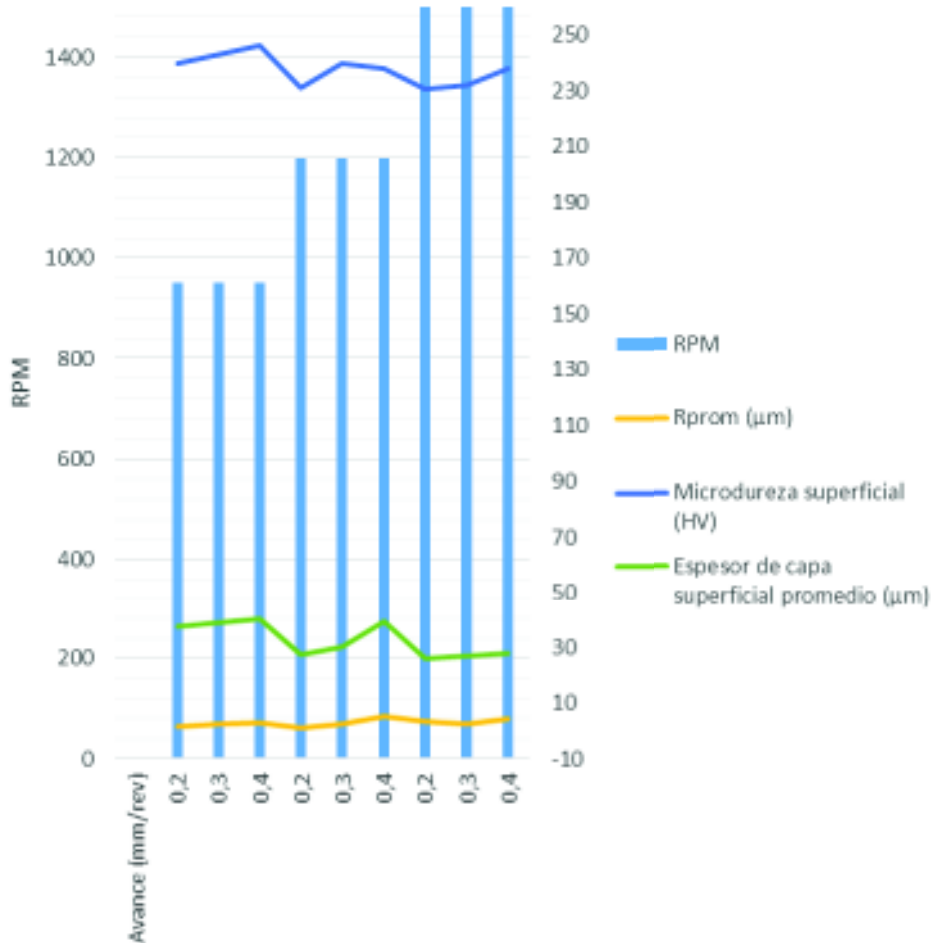


Figura 3.18. Comportamiento de las revoluciones y el avance de corte sobre los comportamientos principales a profundidad de corte constante (0.5 mm).

(Fuente: Propia)

Al mantener en un nivel bajo las revoluciones y parámetros variables de avance y profundidad de corte, las variaciones de avance y profundidad mantienen la influencia creciente sobre la microdureza y el espesor de capa, sin embargo la profundidad de corte mejora el acabado superficial en comparación al avance de corte. La figura 3.19 muestra las influencias descritas sobre los comportamientos a revolución constante.

Respecto a la figura 3.19, al combinar un nivel bajo de avance con un nivel alto de profundidad (0.2 mm/rev, 1.5 mm) se tiene un valor regular de acabado, alto valor de microdureza y espesor de capa (1.13 μm, 246.49 HV, 40.09 μm), al colocar un nivel alto de avance con un nivel alto de profundidad (0.3 mm/rev, 1.5 mm) se tiene una amplia variación de rugosidad, de microdureza y espesor de capa (2.01 μm, 248.49 HV, 41.24 μm). El parámetro influyente sobre el aumento de los tres comportamientos viene a ser la profundidad de corte, debido a que la cantidad de material a remover aumenta, genera una

condición exigente sobre la herramienta y el material, lo que provoca que la superficie y subsuperficie se vea afectada por el trabajo agresivo realizado sobre esta.

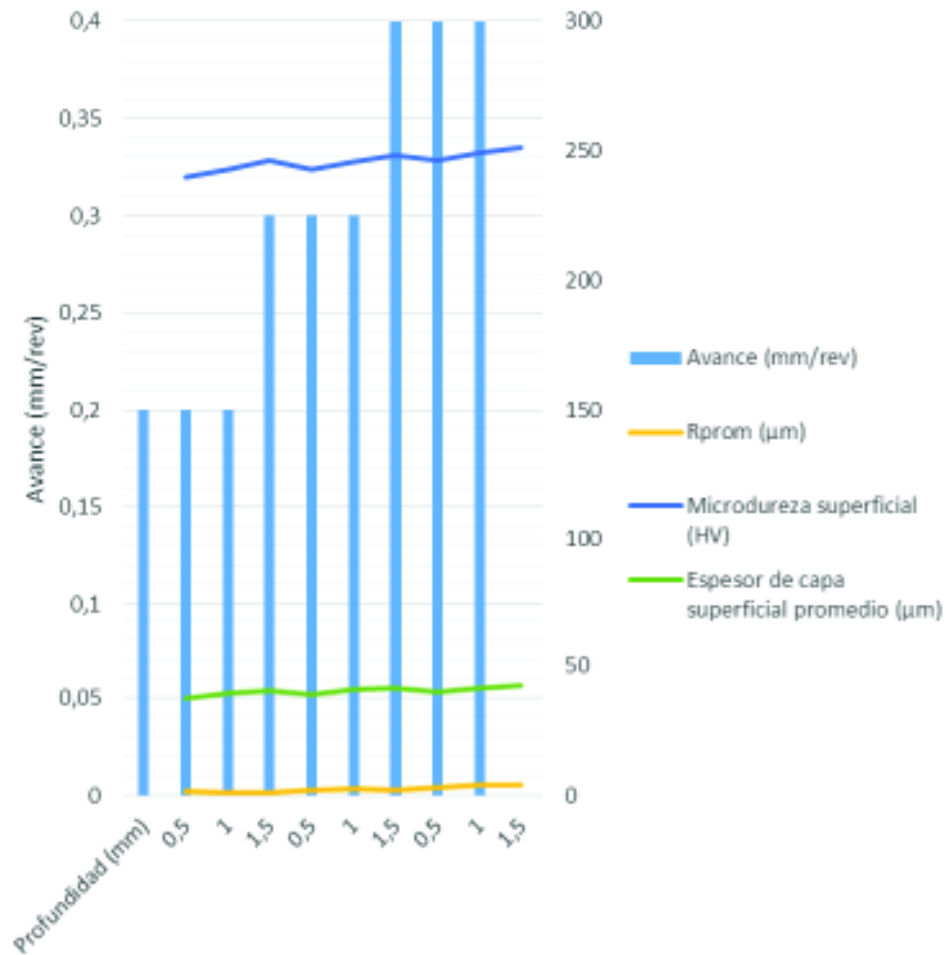


Figura 3.19. Comportamiento del avance y profundidad de corte sobre los comportamientos principales a revoluciones constantes (950 RPM)

(Fuente: Propia)

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

En este estudio se logró alcanzar los objetivos específicos planteados, los cuales son: obtener mediciones de rugosidad de acuerdo a los parámetros de corte seleccionados para el mecanizado, determinar las características metalúrgicas del material mecanizado y determinar la relación de la rugosidad obtenida mediante la experimentación y aplicada a un modelo matemático en base a los parámetros de mecanizado.

El mejor acabado superficial obtenido fue de $0.93 \mu\text{m}$ con los siguientes parámetros de mecanizado de 1200 RPM, 0.2 mm/rev y 0.5 mm, reflejando la influencia del avance y de las revoluciones como parámetros menos exigente para remover material y conseguir una superficie de baja rugosidad.

La fiabilidad presentada por el modelo matemático ajustado a la experimentación mostró un nivel del 5% de confianza entre lo experimental y lo teórico, siendo verificado en el mínimo error que existe entre los coeficientes del modelo matemático en comparación a los coeficientes de validación que se presentó en el estudio.

Al comparar la influencia estadística de los parámetros y la influencia experimental de los parámetros sobre la rugosidad superficial, ambas concluyen que las revoluciones y el avance son los parámetros más influyentes en el acabado debido a sus bajos valores estadísticos y su efecto positivo sobre los comportamientos experimentales.

El mayor valor de microdureza y espesor de capa fueron de 251.49 HV y $42.19 \mu\text{m}$, se presentó para el nivel bajo de revoluciones (950 RPM) con un nivel alto de avance y profundidad de corte (0.4 mm/rev, 1.5 mm). Se observa que la profundidad de corte es la principal influencia en la microdureza ya que su variación es la que permite endurecer mayormente el material y que más material se comprima bajo la herramienta en comparación al efecto de los dos parámetros restantes sobre la microdureza y el espesor de capa.

El uso de refrigerante durante el estudio permite que exista una uniformidad en el comportamiento de la microdureza y del espesor de capa superficial, minimizando cambios bruscos de los valores presentados al variar los niveles de los parámetros de experimentación.

El parámetro de las revoluciones influencia en los tres comportamientos analizados, ya que al aumentar este parámetro, disminuye las fuerzas de mecanizado obteniendo un mejor

acabado, un menor endurecimiento, y el descenso del espesor de capa superficial deformada.

4.2. Recomendaciones

Se puede implementar al estudio parámetros de velocidades de corte de superacabado o de altas revoluciones, con la intención de observar el comportamiento no solo del acabado, sino la posible existencia de cambios en comportamiento de la microestructura, y comparar si se presenta una variación positiva o negativa en los comportamientos expuestos en el estudio.

Dentro del estudio se puede implementar el comportamiento del desgaste de flanco de la herramienta bajo los parámetros de cortes observados, con esto se adiciona un parámetro que presenta su grado de influencia aparte de los parámetros estudiados en el presente proyecto.

Para obtener una verificación matemática no solo del comportamiento de la rugosidad superficial, se puede adicionar un modelo para el comportamiento de la microdureza y del espesor de capa en base a los datos experimentales de estos comportamientos, así se conseguirá una relación total de los parámetros de corte y los tres comportamientos estudiados teóricamente y experimentalmente.

Para futuros estudios de la misma tendencia de investigación se recomienda la utilización de aceros con mayor porcentaje de carbono, para observar la influencia de la variación de la composición química en los comportamientos expuestos en este estudio.

Referencias Bibliográficas

- [1] Agarwal, N. (2012). *Surface Roughness Modeling with Machining Parameters (Speed, Feed and Depth of Cut) in CNC Milling*. MIT Journal of Mechanical Engineering.
- [2] ASM Handbook. (1997). *Machining*.
- [3] ASME. (2009). *ASME B46.1: Surface Texture (Surface Roughness, Waviness and Lay*. Nueva York.
- [4] ASTM, I. (2017). *ASTM A29: Standard Specification for General Requirements for Steel Bars, Carbon and Alloy, Hot Wrought*.
- [5] ASTM, I. (2017). *ASTM A370-17a: Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products*.
- [6] ASTM, I. (2017). *ASTM E384-17: Standard Test Methods for Microindentation Hardness of Materials*.
- [7] Bohman, I. (2017). *Catalogo General*.
- [8] Bosheh, S. (2006). *White layer formation in hard turning H13 tool steel at high cutting speeds using CBN tooling*.
- [9] Cakir, L. (2009). *Mathematical modeling of surface roughness for evaluating the effects of cutting parameters and coating material*.
- [10] Duan, C (2013). *Modeling of white layer thickness in high speed machining of hardened steel based on phase transformation mechanism*.
- [11] Gere, J. (2016). *Mécanica de Materiales*. Mexico: Cengage Learning.
- [12] Groover, M. (2010). *Fundamentals of Modern Manufacturing*. John Wiley.
- [13] Gurbuz, H. (2016). *Investigation of effects of cutting insert rake face forms on surface integrity*.
- [14] Jayant, V. K. (2008). *Prediction of surface roughness in CNC turning operation using Taguchi design of experiments*. Journal of the Institution of Engineers.
- [15] Kalpakjian, S. (2008). *Manufactura, ingeniería y tecnología*. México: Pearson.
- [16] Lescano. (2015). *Influencia de los parámetros de torneado sobre la microdureza superficial, rugosidad y fatiga por flexion rotativa del acero AISI 4340*. Trujillo: Universidad Nacional de Trujillo.

- [17] Leskovar, J. P. (1982). *Influences affecting surface integrity in the cutting process*. Annals of the CIRP.
- [18] Machining Data Handbook. (1980). *Machining Data Handbook*. Ohio.
- [19] Montgomery, D. (2004). *Diseño y Análisis de Experimentos*. Mexico: Limusa.
- [20] Pawade, R. (2008). *Effect of machining parameters and cutting edge geometry on surface integrity of high-speed turned Inconel 718*. International Journal of Machine Tools and Manufacture.
- [21] Sandvick Coromant. (2003). *Modern Metal Cutting*.
- [22] Shi, J. (2006). *Modelling white layer thickness based on the cutting parameters of hard machining*.
- [23] Suhail, H (2010). *Optimization of cutting parameters based on surface roughness and assisrance of workpiece surface temperature in turning process*. American Journal Engineering and Applied Sciences.

ANEXOS

Anexo I.
Código G de mecanizado de experimentación

N10 WORKPIECE(,, "CYLINDER",0,0,-70,-50,35.1)
N20 G291
N30 G21 G40 G90 G95
N40 G54 G00 X80
N50 Z50
N60 T0505
N70 G97 S1500 M3
N80 M8
N90 G00 X40 Z2
N100 G01 Z0 F0.3
N110 X35.1
N111 X32.1
N120 Z-30
N130 G00 X40
N140 M5
N150 M9
N160 G54 G00 X80
N170 Z50
N180 M30

Anexo II.
Informe del ensayo de composición química



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

DEPARTAMENTO DE MATERIALES

LABORATORIO DE FUNDICIÓN

INFORME TÉCNICO

Solicitado por: Ing. Cesar Ayabaca- Sr. Juan Nuñez

Tipo de Trabajo: Espectrometría por chispa

Fecha: 24 de julio del 2017

Realizado por: Ing. Oscar Sotomayor, Ing. Francisco Montalvo

Descripción: Probetas de acero

1. ANTECEDENTES.

Se recibe en el Laboratorio de Fundición de la Escuela Politécnica Nacional seis probetas sueltas.

Se solicita realizar la prueba con la finalidad de determinar los componentes presentes en las muestras entregadas.

2. IDENTIFICACIÓN DE LAS PROBETAS.

Las probetas para el análisis correspondiente son identificadas como se muestra a continuación:

Nombre	Identificación de la probeta
Probetas acero	P1: AISI 1018 N1
	P2: AISI 1018 N2
	P3: AISI 1018 N3
	P4: SAE 4140 N1
	P5: SAE 4140 N2
	P6: SAE 4140 N3





ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE MATERIALES
LABORATORIO DE FUNDICIÓN


3. VALORES OBTENIDOS

El análisis de espectrometría por chispa se realiza empleando el espectrómetro marca BRUKER modelo Q2 ION. Para el análisis se toman 3 mediciones por muestra promediando su valor.

		Muestra					
		P1	P2	P3	P4	P5	P6
Elemento		Valor [%]	Valor [%]	Valor [%]	Valor [%]	Valor [%]	Valor [%]
Carbono	C	0,14	0,157	0,159	0,309	0,326	0,313
Silicio	Si	0,185	0,191	0,191	0,204	0,216	0,22
Manganeso	Mn	0,561	0,575	0,580	0,701	0,714	0,752
Fósforo	P	0,031	0,031	0,030	0,024	0,018	0,02
Azufre	S	0,017	0,017	0,017	0,019	0,022	0,018
Cromo	Cr	0,007	0,008	0,008	1,287	1,412	1,45
Molibdeno	Mo	-	-	-	0,14	0,143	0,146
Niquel	Ni	0,012	0,008	0,080	0,123	0,124	0,127
Cobre	Cu	-	-	-	0,084	0,083	0,083
Aluminio	Al	0,022	0,022	0,022	0,008	0,009	0,007
Cobalto	Co	0,003	0,005	0,004	0,008	0,009	0,01
Boro	B	0,001	0,001	0,001	0,004	0,002	0,001
Hierro	Fe	99,02	98,98	98,98	97,08	96,92	96,85

Ing. Francisco Montalvo

Técnico Responsable



Ing. Oscar Sotomayor

**Jefe del Laboratorio de
Fundición.**

Anexo III.
Informe del ensayo de tracción



INFORME TÉCNICO

LAEV – MAY.18.15.0

Quito, 13 de junio de 2018

TRABAJO SOLICITADO POR: ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
M.Sc. Mario Alberto Cesén Arteaga

Los resultados contenidos en el presente informe corresponden a ensayos realizados en muestras de acero pertenecientes al Sr. Juan Nuñez para el proyecto de titulación "ESTUDIO Y CARACTERIZACIÓN DE LA INTEGRIDAD SUPERFICIAL DE ELEMENTOS FABRICADOS Y MAQUINADOS CON ARRANQUE DE VIRUTA EN EQUIPOS CNC". Las probetas fueron entregadas en el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones de la Escuela Politécnica Nacional.

RESULTADOS

1. **MUESTRAS:** Tres (3) probetas metálicas para ensayo de tracción.

2. **ENSAYO DE TRACCIÓN A MATERIAL BASE**

En la tabla 1 se presenta los resultados del ensayo de tracción realizado.

Tabla 1. Resultados del ensayo de tracción.

Id.	Diámetro promedio	Carga máxima registrada		Limite de fluencia		Resistencia a la tracción		% elongación en 50 mm
		lbf	N	ksi	MPa	ksi	MPa	
T-1	12,65	17.699	78.729	79,1	545,0	90,9	626,4	17,7
T-2	12,61	17.784	79.107	81,1	559,2	91,9	633,4	15,2
T-3	12,63	17.423	77.501	80,1	552,1	89,7	618,6	19,9

	REVISADO POR:	APROBADO POR:
Firma:		
Nombre:	Ing. Jonathan Castro, M.Sc.	Ing. Mario Alberto Cesén Arteaga, M.Sc.
Cargo:	TÉCNICO DOCENTE	JEFE

LABORATORIO DE ANÁLISIS DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES

Anexo IV.
Especificación Técnica del Acero SAE 1018

► Cód. IBCA: SAE 1018 - Tolerancias h10 - h11

Información general

Acero de bajo contenido de carbono.

Análisis típico %	C	Mn	P	S
SAE 1018	0.15 - 0.20	0.60	0.040	0.060
Código de color	Azul			

Aplicaciones

Donde se requiera aplicaciones con cargas mecánicas no muy severas, pero con ciertos grados de tenacidad importantes, como por ejemplo: pernos y tuercas, piezas de máquinas pequeñas, ejes, bujes, pasadores, grapos, etc.

Fácil de cementación con buena profundidad de penetración debido a su alto contenido de manganeso.

Excelente soldabilidad.

Propiedades mecánicas

Suministrado laminado en frío (medidas pequeñas 2 1/2" o forjado (medidas hasta 6"). Los medidas 7", 8", 9" y 10" son suministradas laminadas en caliente o forjado de desbaste.

Diámetro, mm	
Esfuerzo de cedencia (kg/mm ²)	mín 51
Resistencia a la tracción (kg/mm ²)	51 - 71
Elongación, Ab	20 %
Reducción de área, Z	57 %
Dureza (HR)	163

Medidas en stock

Diámetro (mm)	Peso (kg/m)	Diámetro (mm)	Peso (kg/m)	Diámetro (mm)	Peso (kg/m)
1/4	0.2	1 3/8	7.5	4	63.0
5/16	0.4	1 1/2	8.9	4 1/2	86.5
3/8	0.6	1 3/4	12.2	5	99.4
1/2	1.0	2	15.9	5 1/2	120.2
5/8	1.6	2 1/4	20.1	6	143.2
3/4	2.2	2 1/2	24.9	7	194.9
7/8	3.0	2 3/4	30.1	8	254.6
1	4.0	3	35.8	9	322.2
1 1/8	5.0	3 1/4	42.0	10	397.8
1 1/4	6.2	3 1/2	48.7		

* Medidas y pesos sin teóricos IVAN BOHMAN C.A. facturará al peso del material una vez efectuado el corte

Anexo V.
Especificación Técnica del Torno ROMI C420

RMMP - Romi Manual Machining Package (opcional)

Este accesorio permite operar la máquina de forma manual y automática. Existen tres modos de operación según la habilidad del operador:

Modo Manual

El operador mecaniza la pieza como en un torno convencional utilizando el delantal electrónico.

Modo Cíclos

Permite al operador trabajar de forma semiautomática. El completa los campos en una pantalla convencional como avance, rpm y datos del ciclo, aproxima la herramienta manualmente a través del delantal electrónico y ejecuta el ciclo oprimiendo el botón Inicio de Ciclo.

Ciclos como perforado, machucado, ranurado, roscado además de desbaste y acabado pueden ser programados.



Delantal electrónico (opcional)

Existen ciclos fijos y de forma libre para torneado. La pantalla gráfica auxilia durante el rellenado de los campos del ciclo.

Modo Enseñanza

El operador, durante el mecanizado de la primera pieza, guarda paso a paso las etapas del mecanizado para luego ejecutar ese mismo programa más tarde. Las operaciones manuales y los ciclos pueden ser salvados juntos en un mismo programa y guardados en la memoria de la máquina o en el Flash Card.

Nota: Hay pantalla convencional para selección de la pieza y de las herramientas.

Especificaciones Técnicas	Romi C 420	Romi C 510	
Capacidad			
Altura de punta	mm	210	280
Sistema entre puntas	in	0.5 / 1.2	1.6
Diámetro admisible sobre la bancada	mm	430	520
Diámetro admisible sobre el carro transversal	mm	280	280
Diámetro admisible sobre las alas de la mesa	mm	480	480
Recorrido lateral del carro (eje X)	mm	220	280
Recorrido longitudinal del carro (eje Z)	mm	985 / 1.065	1.085
Ranurado			
Anchura	mm	380	540
Altera	mm	380	336
Cabrerá			
Tipo del husillo	ASA	A2-0° - A2-6°	A2-0° - A2-6°
Diámetro del agujero del husillo	mm	53 - 85	85 - 80
Rango de velocidades	rpm	4 a 4.000 - 3 a 3.000	3 a 3.000 - 2 a 2.280
Avances			
Avance rápido longitudinal (eje Z)	m/min	30	34
Avance rápido transversal (eje X)	m/min	30	34
Control de velocidad			
Procesamiento del cuerpo		manual	manual (solo a través de la mesa) (opc)
Accionamiento de la caja		manual (opc)	manual (opc)
		eléctrico o hidráulico (opc)	eléctrico o hidráulico (opc)
Relación: relación de la caja	mm	170	138
Diámetro de la caja	mm	80	80
Cara interna de la caja	Dia	4	4
Paralelismos de cambio rápido (opcional)			
Cara de fijación		7 o 3	3
Sección del soporte de la herramienta			
Cuchilla	mm	25 x 25	25 x 25
Redondo (diámetro)	mm	25	25
Paralelismos toreros (opcional)			
Sección del soporte de la herramienta			
Cuchilla	mm	25 x 25	25 x 25
Redondo (diámetro)	mm	25	25
Paralelismos gang todo (opcional)			
Sección del soporte de la herramienta			
Cuchilla	mm	20 x 25	-
Redondo (diámetro)	mm	25	-
Paralelismos WTD			
Soportes VDI-50 / DIN 0580-50 (opcional)			
Soporte para herramientas accionadas (total)	DIN 0490	-	19-40 (Ø 4 x Ø 25 mm)
Soporte para herramientas accionadas (total)	DIN 0490	-	19-40 (Ø 4 x Ø 25 mm)
Sección del mango de la herramienta			
Cuchilla	mm	-	32 x 32
Redondo (diámetro)	mm	-	41
Torre manual controlada con			
Integración en 8 posiciones (opcional)			
Sección del mango de la herramienta			
Cuchilla	mm	25 x 25	-
Redondo (diámetro)	mm	25	-
Torre eléctrica octogonal			
de eje horizontal (opcional)			
Número de posiciones / herramientas		8 / 8	8 / 8
Tiempo de giro estación / espacio	s	0,6	0,6
Tiempo de giro 180° de la terna	s	1,5	1,5
Sección del mango de la herramienta			
Cuchilla	mm	25 x 25	25 x 25
Redondo (diámetro)	mm	25	30
Potencia instalada			
Motor principal ca (30 mm)	Pg / kW	10 / 7,5	10 / 7,1
Potencia total instalada	WVA	15	28
Área ocupada (*)			
entre puntas 1,5 m	m	2,08 x 1,24	-
entre puntas 1,0 m	m	1,18 x 1,24	-
entre puntas 1,5 m	m	-	1,75 x 1,88
Peso líquido aproximado			
entre puntas 1,5 m	kg	2.900	-
entre puntas 1,0 m	kg	2.900	-
entre puntas 1,5 m	kg	-	3.750

(*) Sin transportador de virutas

Anexo VI.
Especificación Técnica del Rugosímetro Mitutoyo

Anexo VII.
Tabulación de los datos de rugosidad.

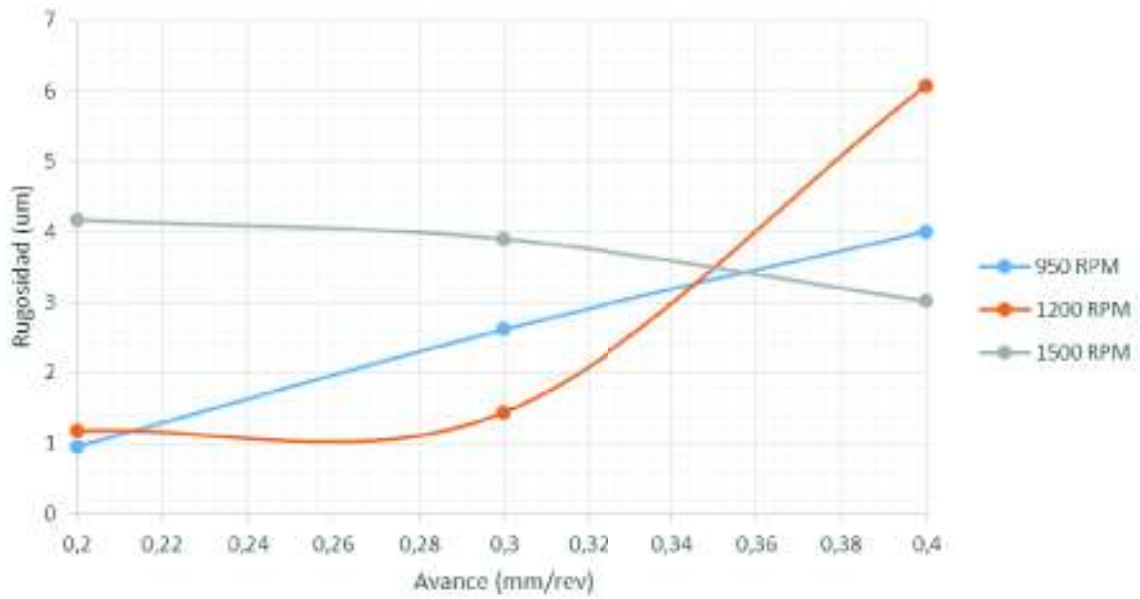


Ilustración 1. Variación de la rugosidad con respecto al avance para diferentes velocidades de corte y profundidad constante (1 mm).

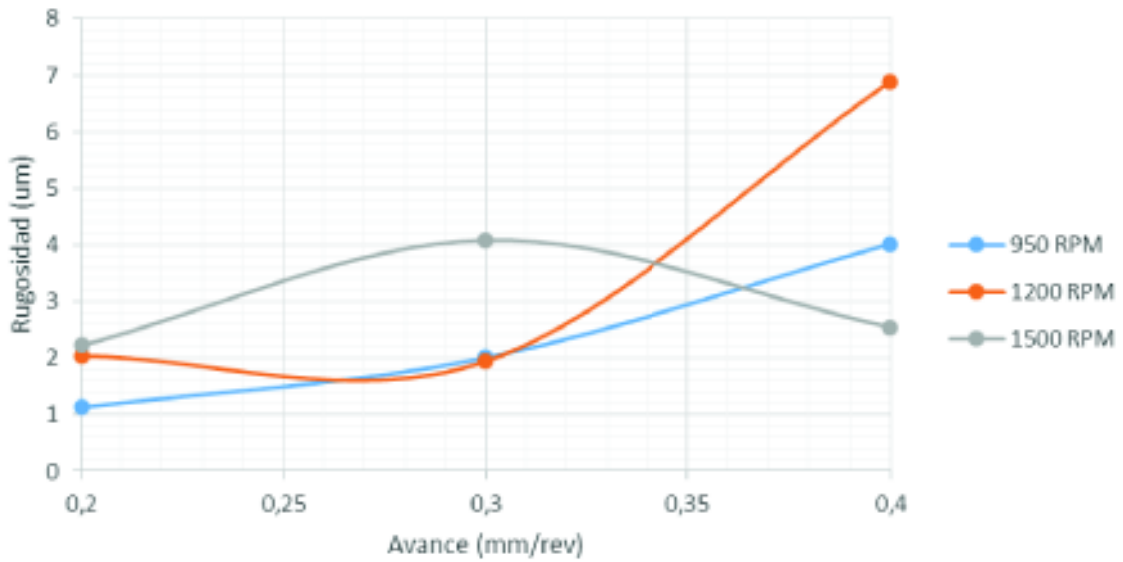


Ilustración 2. Variación de la rugosidad con respecto al avance para diferentes velocidades de corte y profundidad constante (1.5 mm).

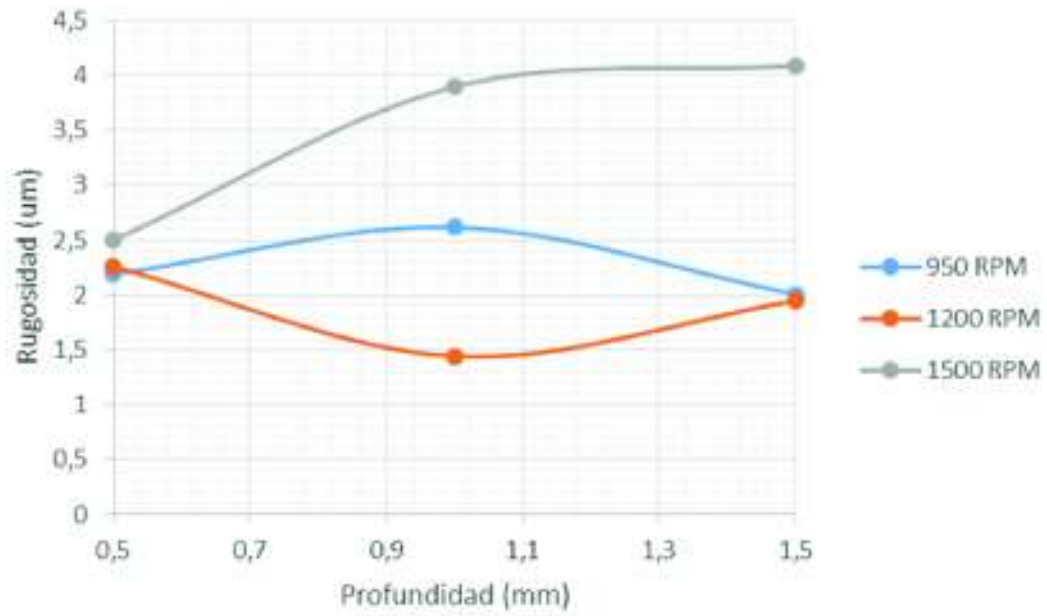


Ilustración 3. Variación de la rugosidad con respecto a la profundidad de corte para velocidades de corte y avance constante (0.3 mm/rev).

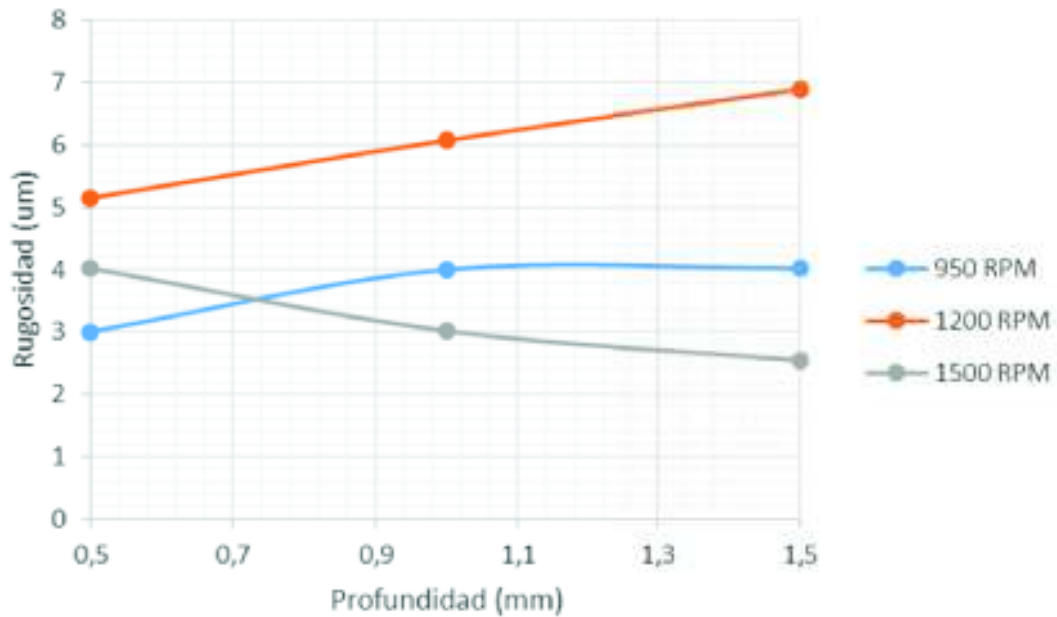


Ilustración 4. Variación de la rugosidad con respecto a la profundidad de corte para velocidades de corte y avance constante (0.4 mm/rev).

Anexo VIII.
Mediciones de microdureza.

Tabla 1. Variación de la Microdureza con respecto a la distancia de indentación para parámetros constantes de revoluciones y avance (950 RPM, 0.3 mm/rev) y parámetro variable de profundidad de corte (a) 0.5 mm, b) 1 mm, c) 1.5 mm).

Número	Dureza (HV)	Distancia bajo la superficie (mm)
1	243,08	0
2	227,35	0,5
3	229,59	1,5

a)

(Fuente: Propia)

Número	Dureza (HV)	Distancia bajo la superficie (mm)
1	245,73	0
2	224,31	0,5
3	221,78	1,5

b)

Número	Dureza (HV)	Distancia bajo la superficie (mm)
1	248,49	0
2	220,71	0,5
3	212	1,5

c)

Tabla 2. Variación de la Microdureza con respecto a la distancia de indentación para parámetros constantes de revoluciones y avance (950 RPM, 0.4 mm/rev) y parámetro variable de profundidad de corte (a) 0.5 mm, b) 1 mm, c) 1.5 mm).

Número	Dureza (HV)	Distancia bajo la superficie (mm)
1	246,16	0
2	234,19	0,5
3	225,01	1,5

a)

(Fuente: Propia)

Número	Dureza (HV)	Distancia bajo la superficie (mm)
1	249,3	0
2	226,57	0,5
3	222,41	1,5

b)

Número	Dureza (HV)	Distancia bajo la superficie (mm)
1	251,49	0
2	238,71	0,5
3	212	1,5

c)

Tabla 3. Variación de la Microdureza con respecto a la distancia de indentación para parámetros constantes de revoluciones y avance (1200 RPM, 0.3 mm/rev) y parámetro variable de profundidad de corte (a) 0.5 mm, b) 1 mm, c) 1.5 mm).

Número	Dureza (HV)	Distancia bajo la superficie (mm)
1	239,99	0
2	228,1	0,5
3	219,28	1,5

a)

(Fuente: Propia)

Número	Dureza (HV)	Distancia bajo la superficie (mm)
1	241,3	0
2	226,82	0,5
3	211,8	1,5

b)

Número	Dureza (HV)	Distancia bajo la superficie (mm)
1	244,38	0
2	225,38	0,5
3	209,34	1,5

c)

Tabla 4. Variación de la Microdureza con respecto a la distancia de indentación para parámetros constantes de revoluciones y avance (1200 RPM, 0.4 mm/rev) y parámetro variable de profundidad de corte (a) 0.5 mm, b) 1 mm, c) 1.5 mm).

Número	Dureza (HV)	Distancia bajo la superficie (mm)
1	237,89	0
2	224,41	0,5
3	207,3	1,5

a)

(Fuente: Propia)

Número	Dureza (HV)	Distancia bajo la superficie (mm)
1	242,2	0
2	228,31	0,5
3	209,14	1,5

b)

Número	Dureza (HV)	Distancia bajo la superficie (mm)
1	247,9	0
2	230,4	0,5
3	210	1,5

c)

Tabla 5. Variación de la Microdureza con respecto a la distancia de indentación para parámetros constantes de revoluciones y avance (1500 RPM, 0.3 mm/rev) y parámetro variable de profundidad de corte (a) 0.5 mm, b) 1 mm, c) 1.5 mm).

Número	Dureza (HV)	Distancia bajo la superficie (mm)	Número	Dureza (HV)	Distancia bajo la superficie (mm)	Número	Dureza (HV)	Distancia bajo la superficie (mm)
1	232,15	0	1	236,89	0	1	240,06	0
2	228,4	0,5	2	234,41	0,5	2	232,92	0,5
3	215,24	1,5	3	227,3	1,5	3	214,18	1,5

a)

b)

c)

(Fuente: Propia)

Tabla 6. Variación de la Microdureza con respecto a la distancia de indentación para parámetros constantes de revoluciones y avance (1500 RPM, 0.4 mm/rev) y parámetro variable de profundidad de corte (a) 0.5 mm, b) 1 mm, c) 1.5 mm).

Número	Dureza (HV)	Distancia bajo la superficie (mm)	Número	Dureza (HV)	Distancia bajo la superficie (mm)	Número	Dureza (HV)	Distancia bajo la superficie (mm)
1	237,9	0	1	240,49	0	1	242,2	0
2	230,9	0,5	2	229,16	0,5	2	222,31	0,5
3	207,48	1,5	3	217,59	1,5	3	219,14	1,5

a)

b)

c)

(Fuente: Propia)

Anexo IX.
Tabulación de los datos de microdureza de la sección
transversal.

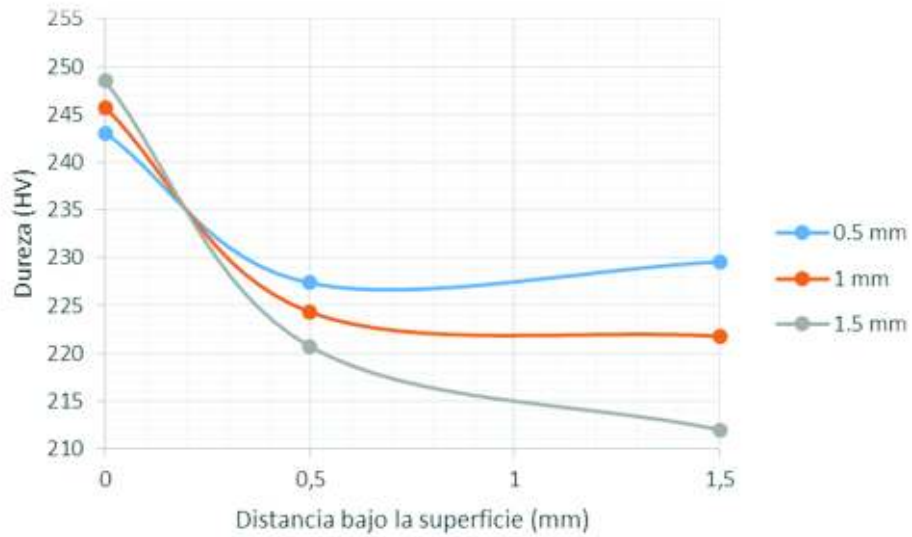


Ilustración 1. Variación de la microdureza con respecto a la distancia de indentación para diferentes profundidades de corte con revoluciones y avance constante. (950 RPM, 0.3 mm/rev)

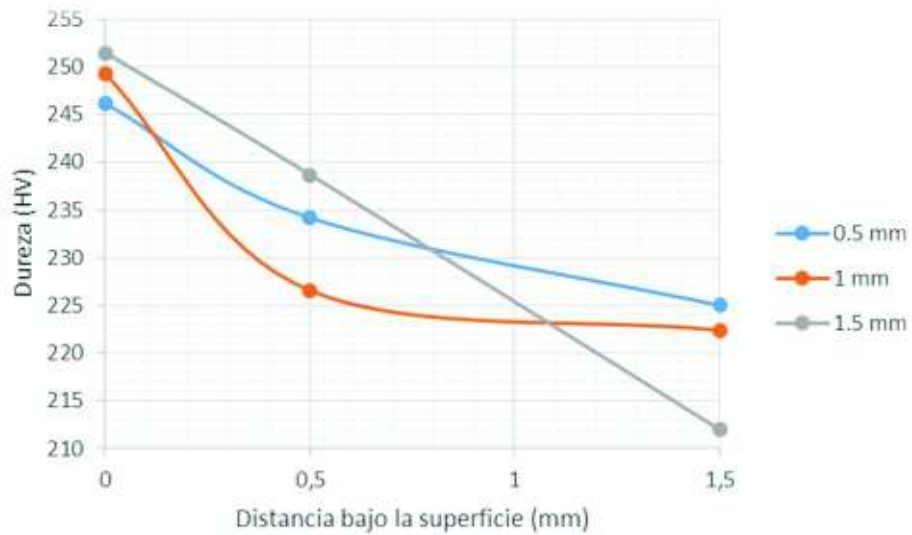


Ilustración 2. Variación de la microdureza con respecto a la distancia de indentación para diferentes profundidades de corte con revoluciones y avance constante. (950 RPM, 0.4 mm/rev)

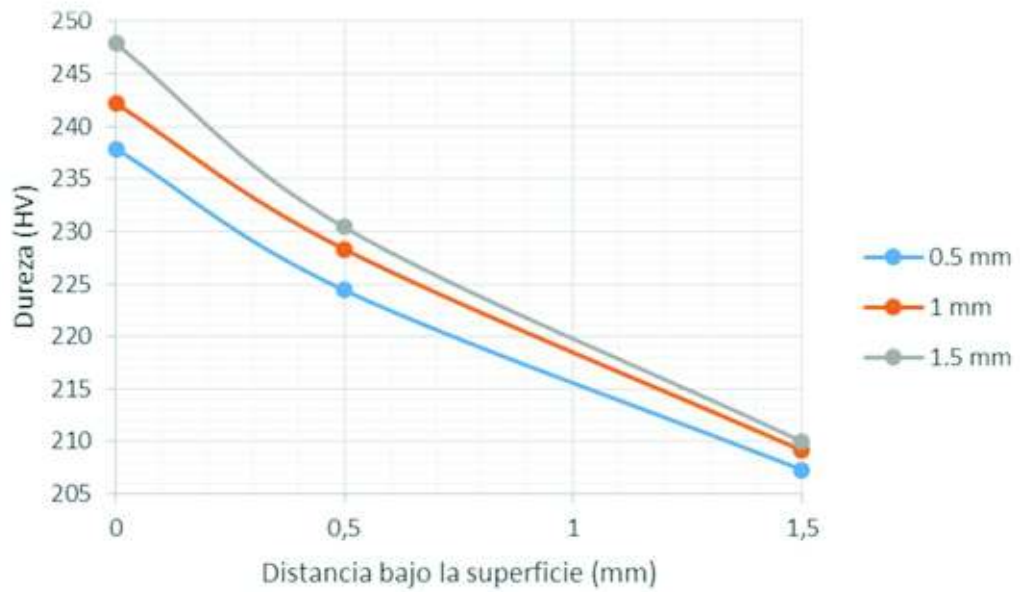


Ilustración 3. Variación de la microdureza con respecto a la distancia de indentación para diferentes profundidades de corte con revoluciones y avance constante. (1200 RPM, 0.3 mm/rev)

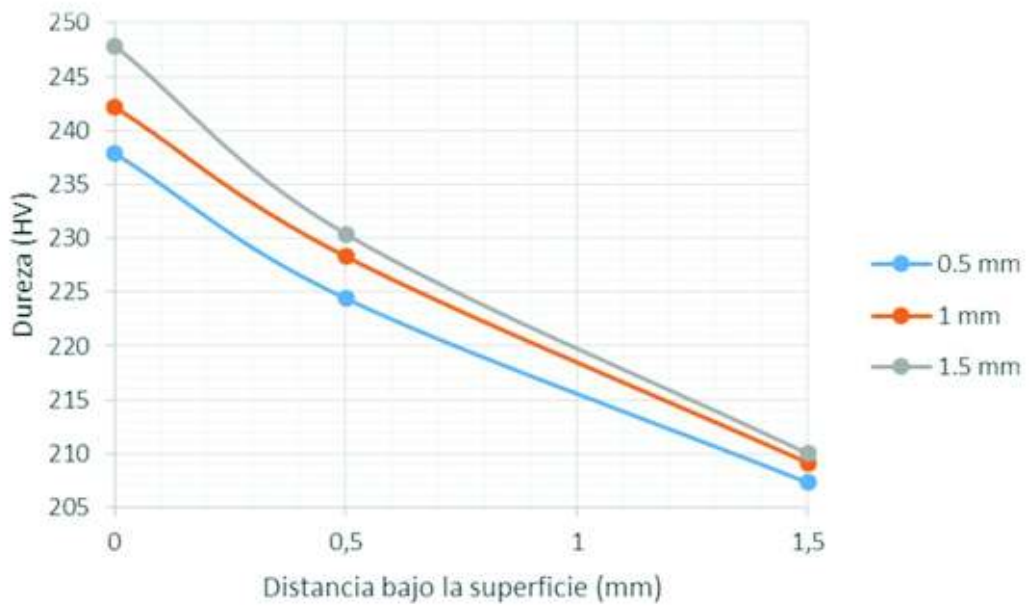


Ilustración 4. Variación de la microdureza con respecto a la distancia de indentación para diferentes profundidades de corte con revoluciones y avance constante. (1200 RPM, 0.4 mm/rev)

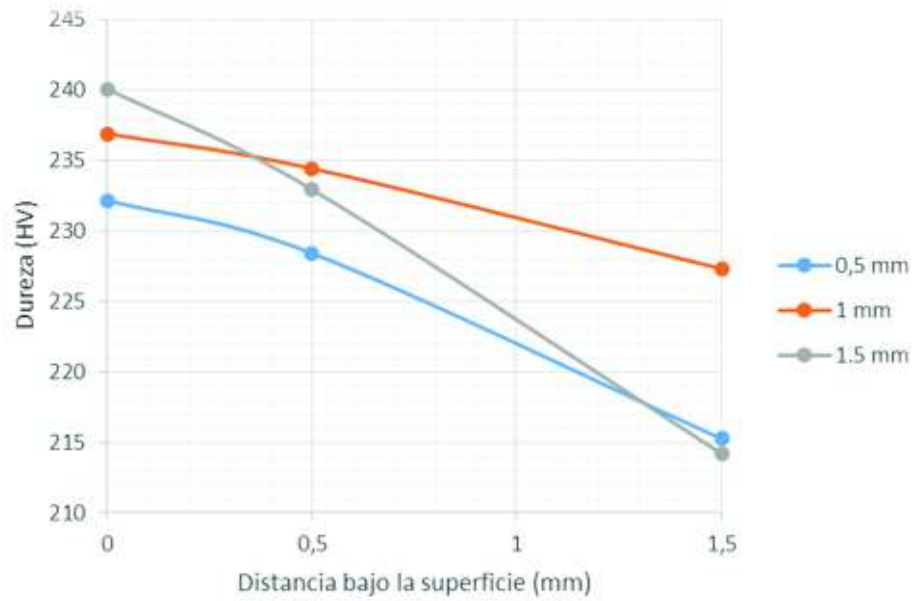


Ilustración 5. Variación de la microdureza con respecto a la distancia de indentación para diferentes profundidades de corte con revoluciones y avance constante. (1500 RPM, 0.3 mm/rev)

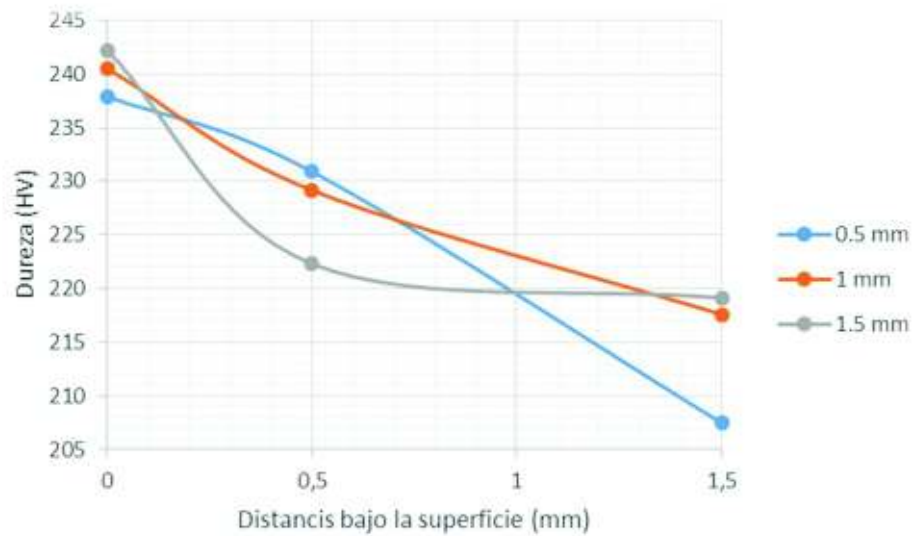


Ilustración 6. Variación de la microdureza con respecto a la distancia de indentación para diferentes profundidades de corte con revoluciones y avance constante. (1500 RPM, 0.4 mm/rev)

Anexo X.
Mediciones de espesor de capa superficial deformada.

Tabla 1. Espesor de capa superficial deformada para parámetros constantes de revoluciones y avance (950 RPM, 0.2 mm/rev) y parámetro variable de profundidad de corte. (a) 0.5 mm, b) 1 mm, c) 1.5 mm)

Medición	Espesor de capa deformada (um)	Medición	Espesor de capa deformada (um)	Medición	Espesor de capa deformada (um)
1	37,33	1	39,46	1	40,04
2	35,2	2	38,64	2	30,03
3	39,75	3	39,15	3	41,2
Promedio	37,43	Promedio	39,08	Promedio	40,09

a)
(Fuente: Propia)

b)

c)

Tabla 2. Espesor de capa superficial deformada para parámetros constantes de revoluciones y avance (950 RPM, 0.3 mm/rev) y parámetro variable de profundidad de corte. (a) 0.5 mm, b) 1 mm, c) 1.5 mm)

Medición	Espesor de capa deformada (um)	Medición	Espesor de capa deformada (um)	Medición	Espesor de capa deformada (um)
1	25,7	1	27,39	1	27,72
2	26,3	2	27,08	2	27,95
3	26,21	3	27,26	3	27,88
Promedio	26,07	Promedio	27,24	Promedio	27,85

a)
(Fuente: Propia)

b)

c)

Tabla 3. Espesor de capa superficial deformada para parámetros constantes de revoluciones y avance (950 RPM, 0.4 mm/rev) y parámetro variable de profundidad de corte. (a) 0.5 mm, b) 1 mm, c) 1.5 mm)

Medición	Espesor de capa deformada (um)	Medición	Espesor de capa deformada (um)	Medición	Espesor de capa deformada (um)
1	26,07	1	27,43	1	27,73
2	26,32	2	27,67	2	27,8
3	26,7	3	27,5	3	27,69
Promedio	26,36	Promedio	27,53	Promedio	27,74

a)
(Fuente: Propia)

b)

c)

Tabla 4. Espesor de capa superficial deformada para parámetros constantes de revoluciones y avance (1200 RPM, 0.2 mm/rev) y parámetro variable de profundidad de corte. (a) 0.5 mm, b) 1 mm, c) 1.5 mm)

Medición	Espesor de capa deformada (um)	Medición	Espesor de capa deformada (um)	Medición	Espesor de capa deformada (um)
1	27,07	1	28,37	1	28,86
2	27,26	2	27,73	2	28,44
3	26,62	3	28,08	3	30,14
Promedio	26,98	Promedio	28,06	Promedio	29,15

a)
(Fuente: Propia)

b)

c)

Tabla 5. Espesor de capa superficial deformada para parámetros constantes de revoluciones y avance (1200 RPM, 0.3 mm/rev) y parámetro variable de profundidad de corte. (a) 0.5 mm, b) 1 mm, c) 1.5 mm)

Medición	Espesor de capa deformada (um)	Medición	Espesor de capa deformada (um)	Medición	Espesor de capa deformada (um)
1	27,18	1	28,13	1	29,07
2	26,93	2	28,53	2	28,89

3	27,39	3	28,4	3	29
Promedio	27,17	Promedio	28,35	Promedio	28,99

a)

b)

c)

(Fuente: Propia)

Tabla 6. Espesor de capa superficial deformada para parámetros constantes de revoluciones y avance (1200 RPM, 0.4 mm/rev) y parámetro variable de profundidad de corte. (a) 0.5 mm, b) 1 mm, c) 1.5 mm)

Medición	Espesor de capa deformada (um)	Medición	Espesor de capa deformada (um)	Medición	Espesor de capa deformada (um)
1	26,9	1	28,24	1	29,48
2	27,48	2	28,19	2	29,17
3	27,05	3	28,37	3	28,74
Promedio	27,14	Promedio	28,27	Promedio	29,13

a)

b)

c)

(Fuente: Propia)

Tabla 7. Espesor de capa superficial deformada para parámetros constantes de revoluciones y avance (1500 RPM, 0.2 mm/rev) y parámetro variable de profundidad de corte. (a) 0.5 mm, b) 1 mm, c) 1.5 mm)

Medición	Espesor de capa deformada (um)	Medición	Espesor de capa deformada (um)	Medición	Espesor de capa deformada (um)
1	25,78	1	27,73	1	28,24
2	26,16	2	27,8	2	28,5
3	26,03	3	27,69	3	28,37
Promedio	25,99	Promedio	27,74	Promedio	29,37

a)

b)

c)

(Fuente: Propia)

Tabla 8. Espesor de capa superficial deformada para parámetros constantes de revoluciones y avance (1500 RPM, 0.3 mm/rev) y parámetro variable de profundidad de corte. (a) 0.5 mm, b) 1 mm, c) 1.5 mm)

Medición	Espesor de capa deformada (um)	Medición	Espesor de capa deformada (um)	Medición	Espesor de capa deformada (um)
1	27,81	1	29,45	1	31
2	28,23	2	29,44	2	31,13
3	28,49	3	29,51	3	30,43
Promedio	28,18	Promedio	29,47	Promedio	30,85

a)

b)

c)

(Fuente: Propia)

Tabla 9. Espesor de capa superficial deformada para parámetros constantes de revoluciones y avance (1500 RPM, 0.4 mm/rev) y parámetro variable de profundidad de corte. (a) 0.5 mm, b) 1 mm, c) 1.5 mm)

Medición	Espesor de capa deformada (um)	Medición	Espesor de capa deformada (um)	Medición	Espesor de capa deformada (um)
1	28,59	1	29,31	1	30,45
2	28,38	2	29,33	2	30,16
3	28,26	3	29,46	3	30,23
Promedio	28,41	Promedio	29,37	Promedio	30,28

a)

b)

c)

(Fuente: Propia)

Anexo XI.
Metalografías de la capa superficial deformada.

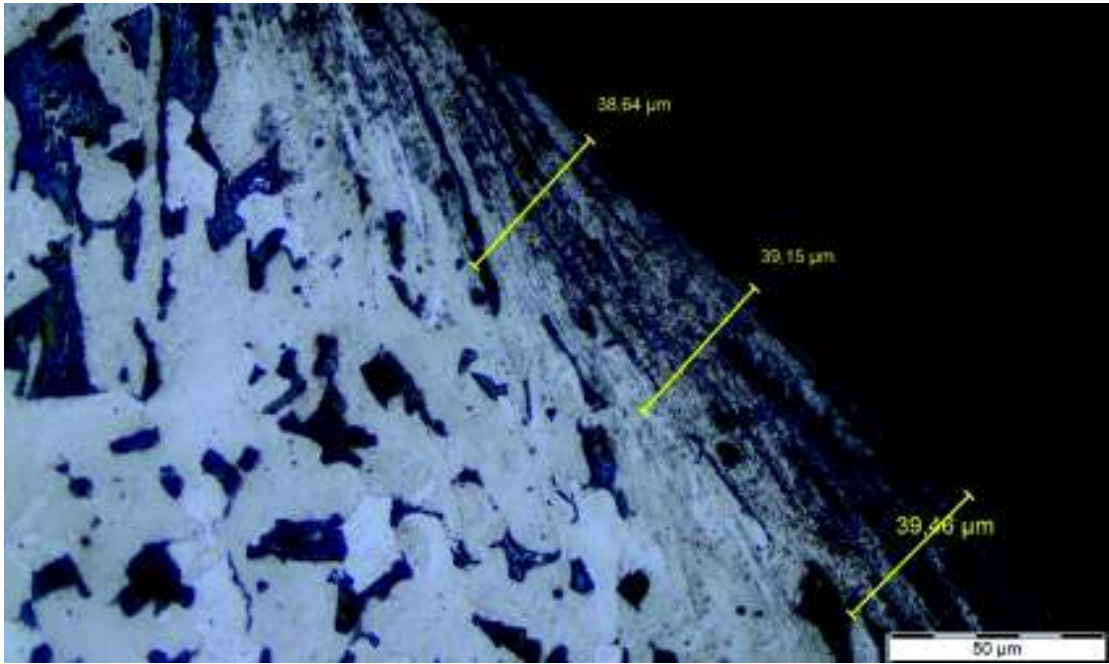


Ilustración 1. Medición de la capa superficial deformada para 950 RPM, 0.2 mm/rev y 1 mm.

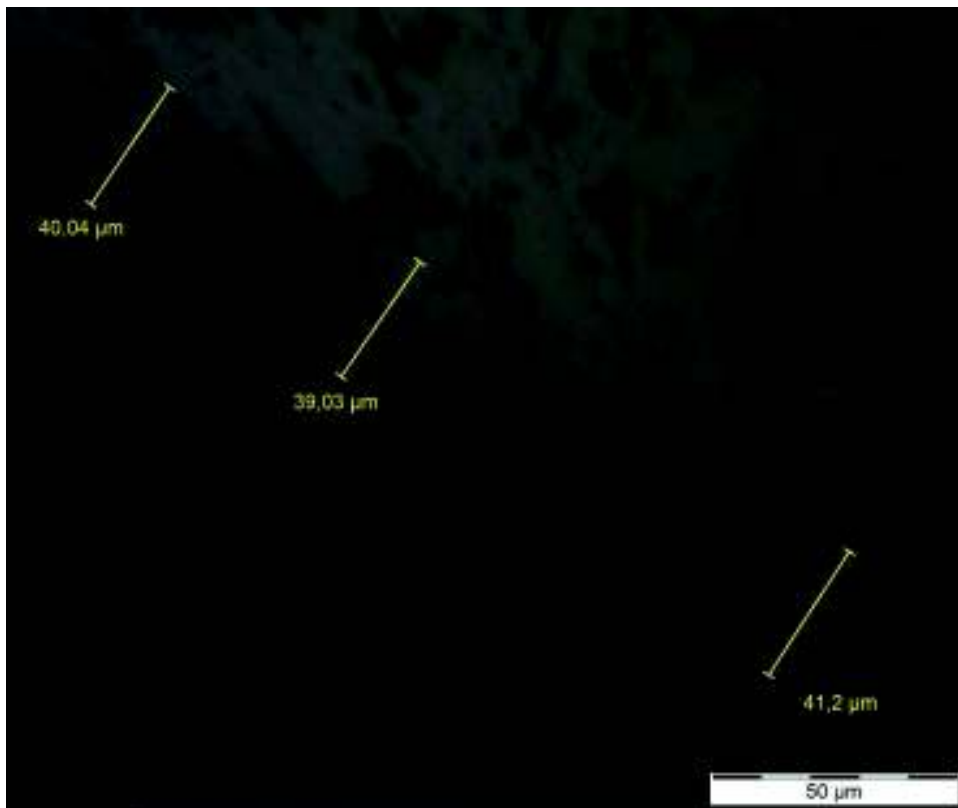


Ilustración 2. Medición de la capa superficial deformada para 950 RPM, 0.2 mm/rev y 1.5 mm.

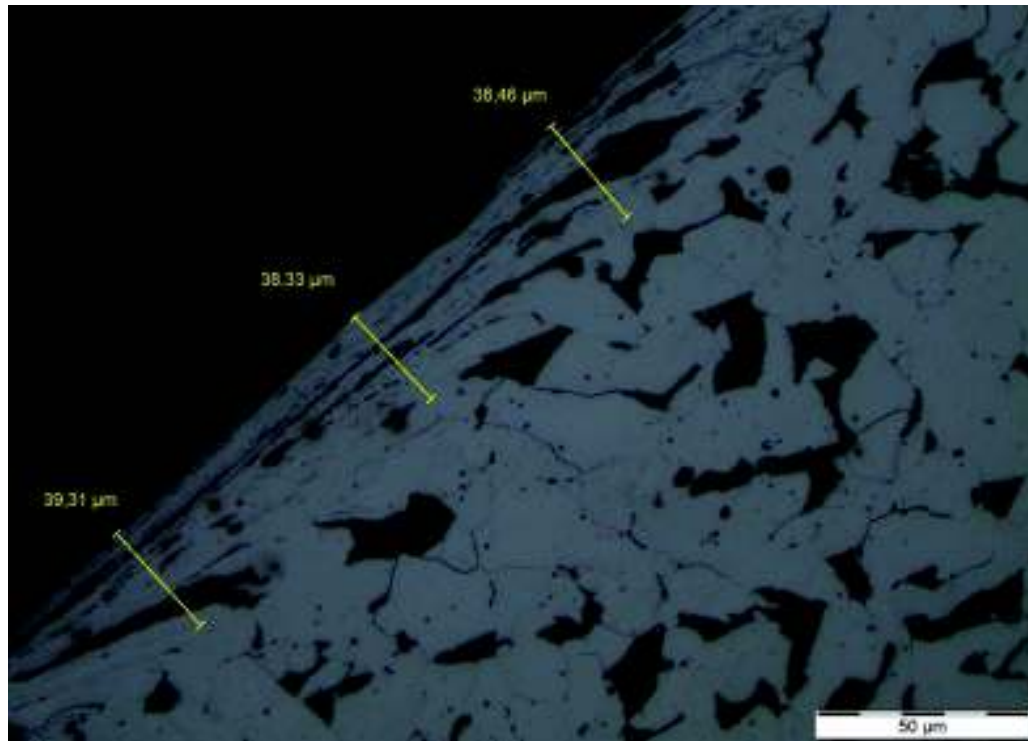


Ilustración 3. Medición de la capa superficial deformada para 950 RPM, 0.3 mm/rev y 0.5 mm.

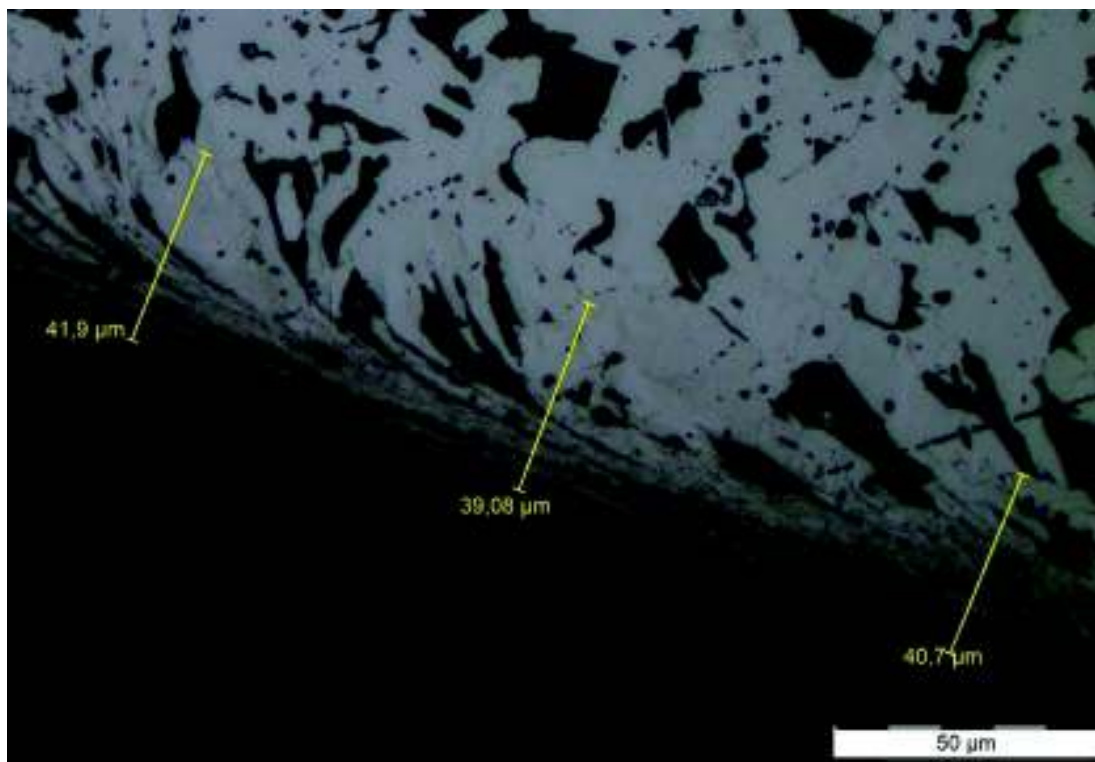


Ilustración 4. Medición de la capa superficial deformada para 950 RPM, 0.3 mm/rev y 1 mm.

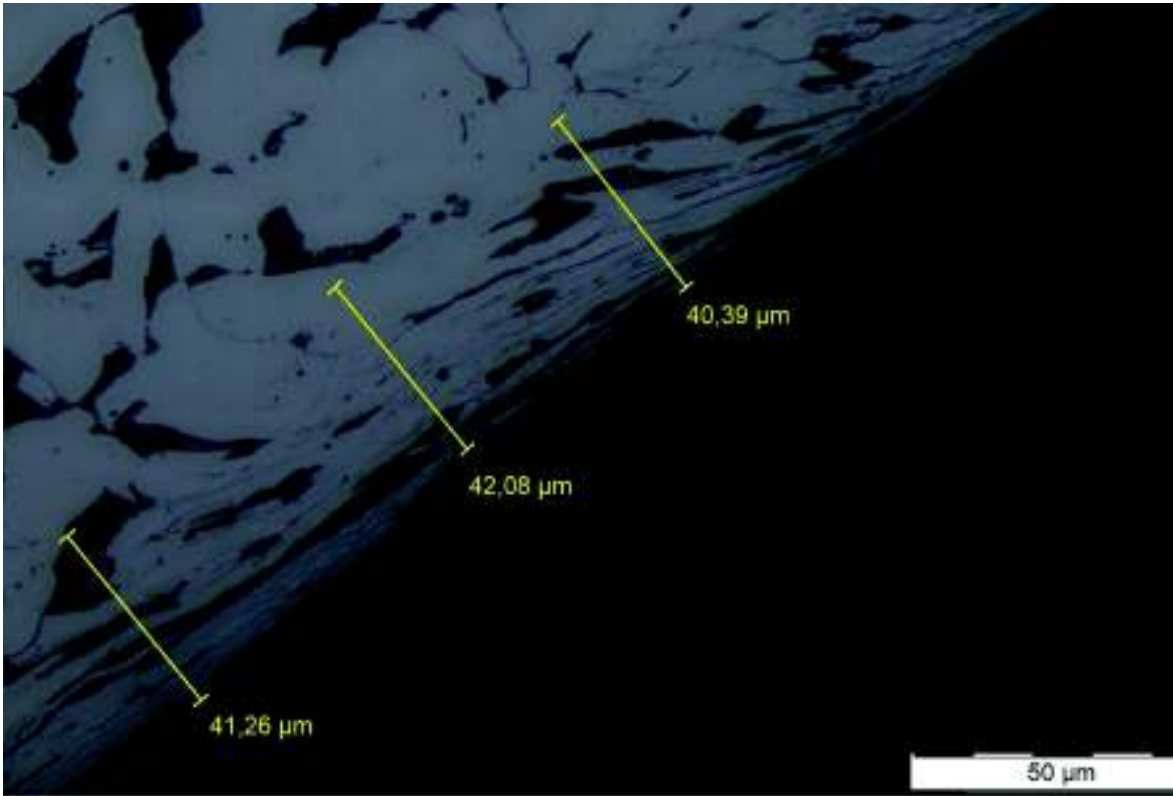


Ilustración 5. Medición de la capa superficial deformada para 950 RPM, 0.3 mm/rev y 1.5 mm.

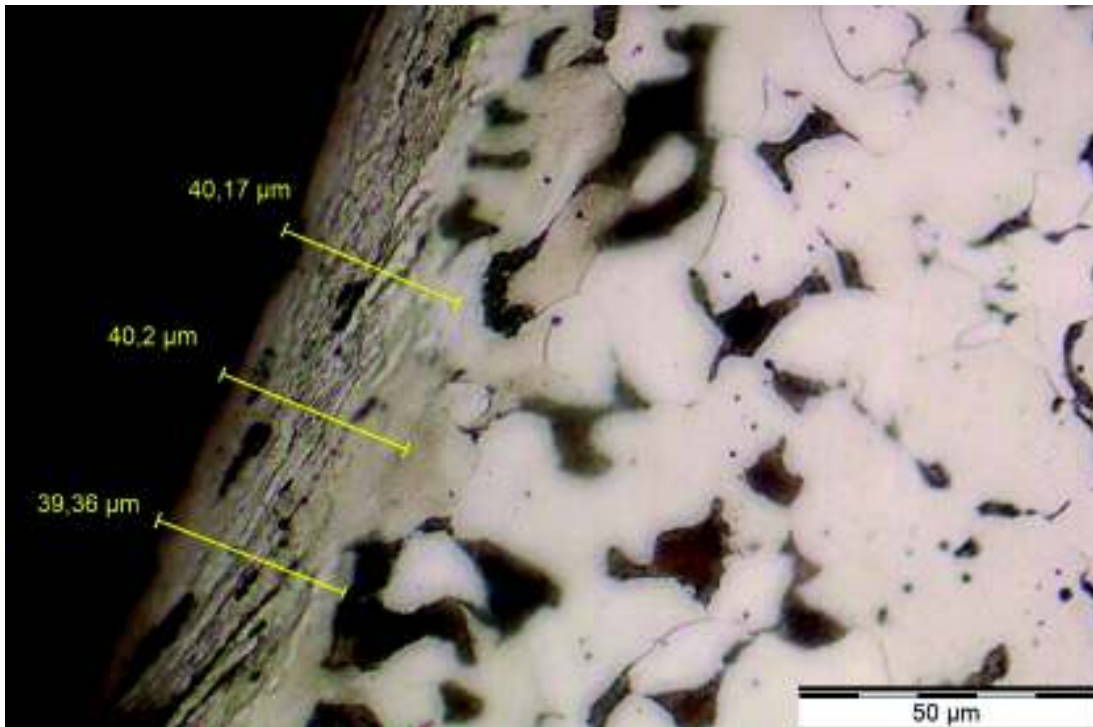


Ilustración 6. Medición de la capa superficial deformada para 950 RPM, 0.4 mm/rev y 0.5 mm.

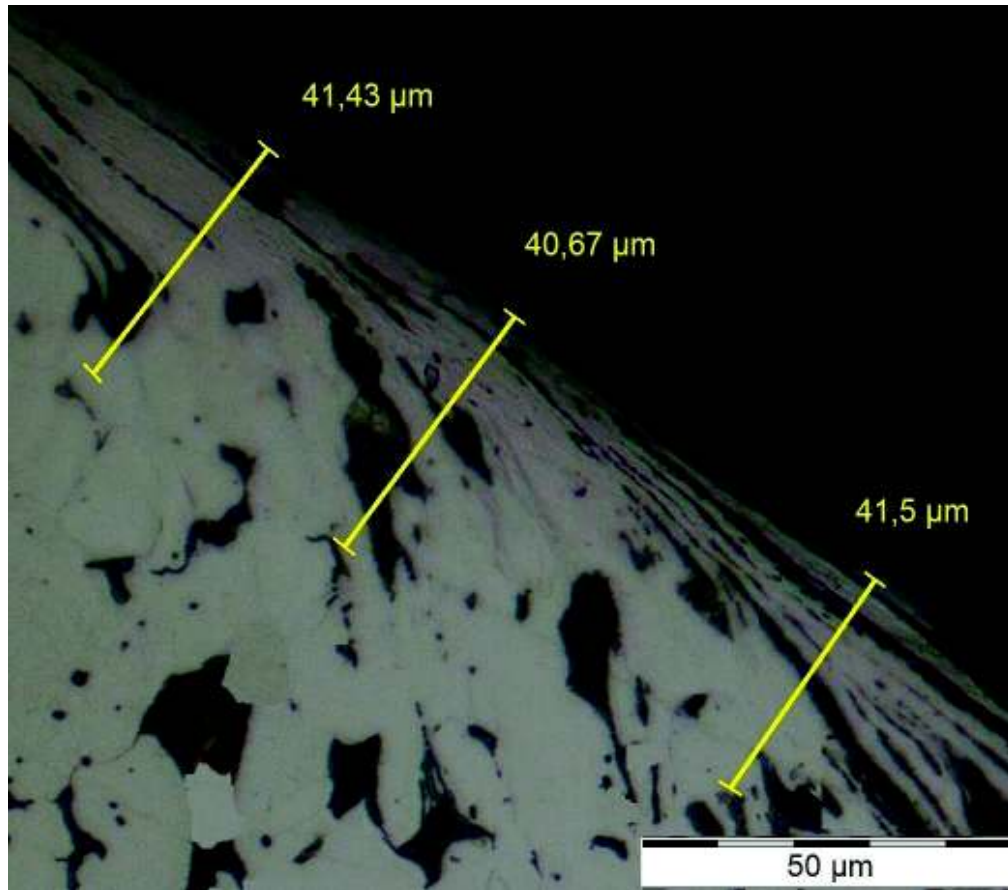


Ilustración 7. Medición de la capa superficial deformada para 950 RPM, 0.4 mm/rev y 1 mm.

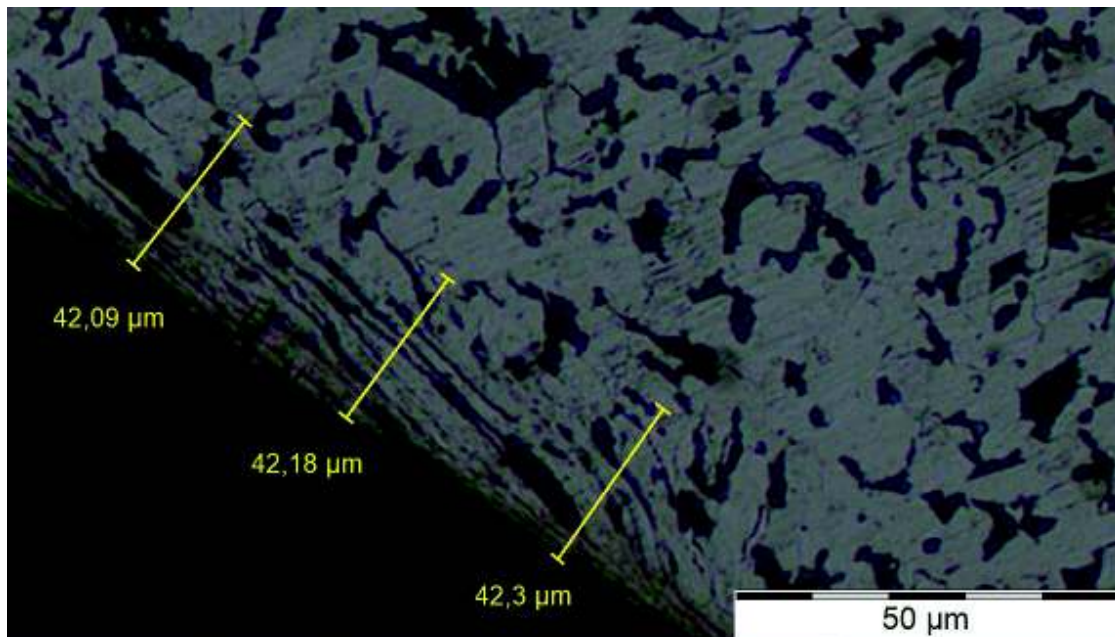


Ilustración 9. Medición de la capa superficial deformada para 950 RPM, 0.4 mm/rev y 1.5 mm.

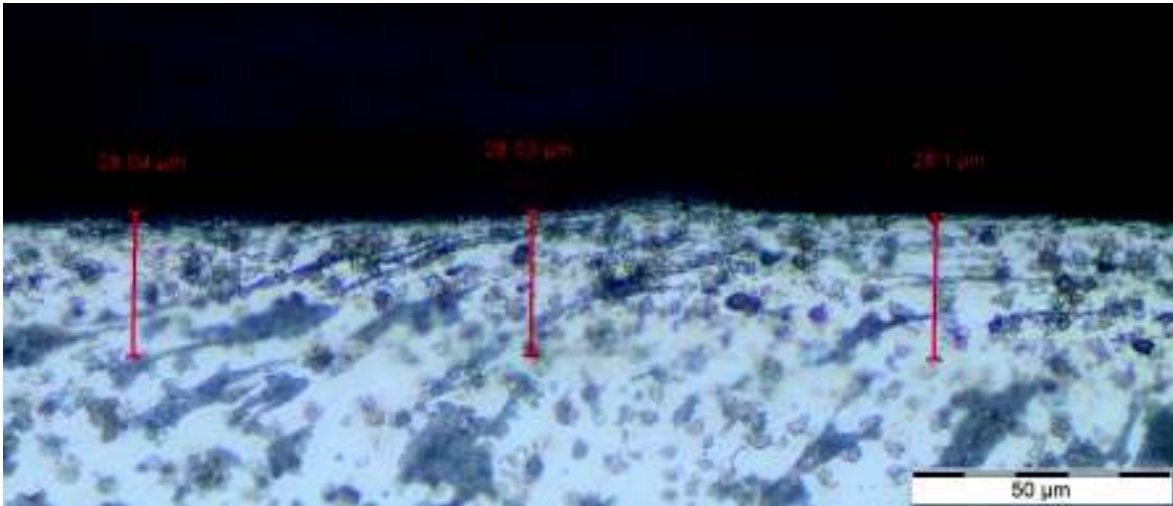


Ilustración 10. Medición de la capa superficial deformada para 1200 RPM, 0.2 mm/rev y 1 mm.

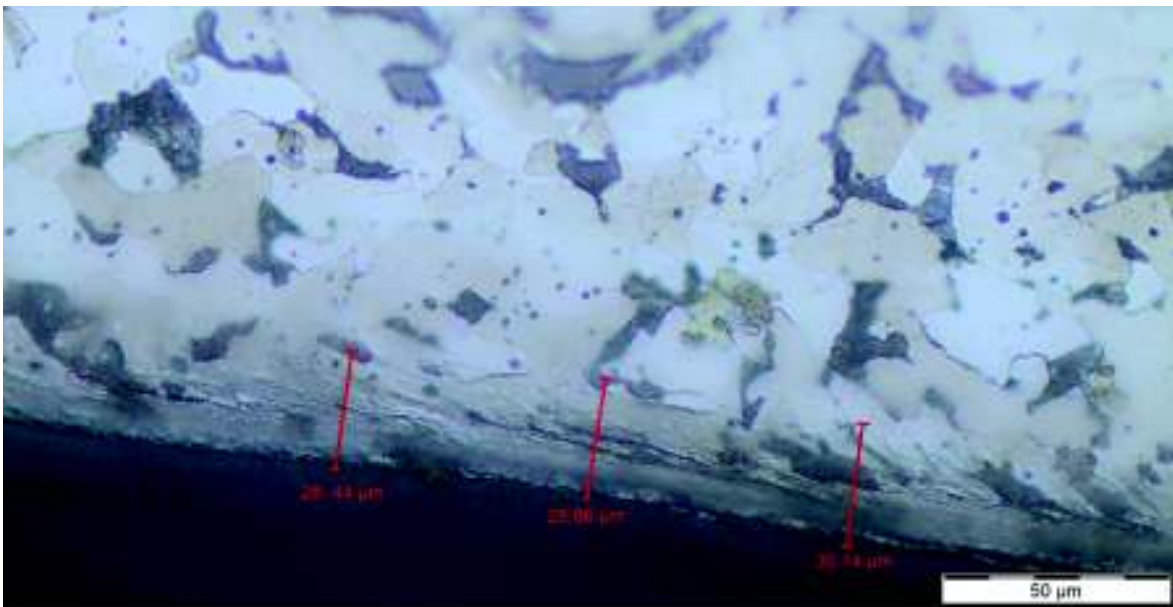


Ilustración 11. Medición de la capa superficial deformada para 1200 RPM, 0.2 mm/rev y 1.5 mm.

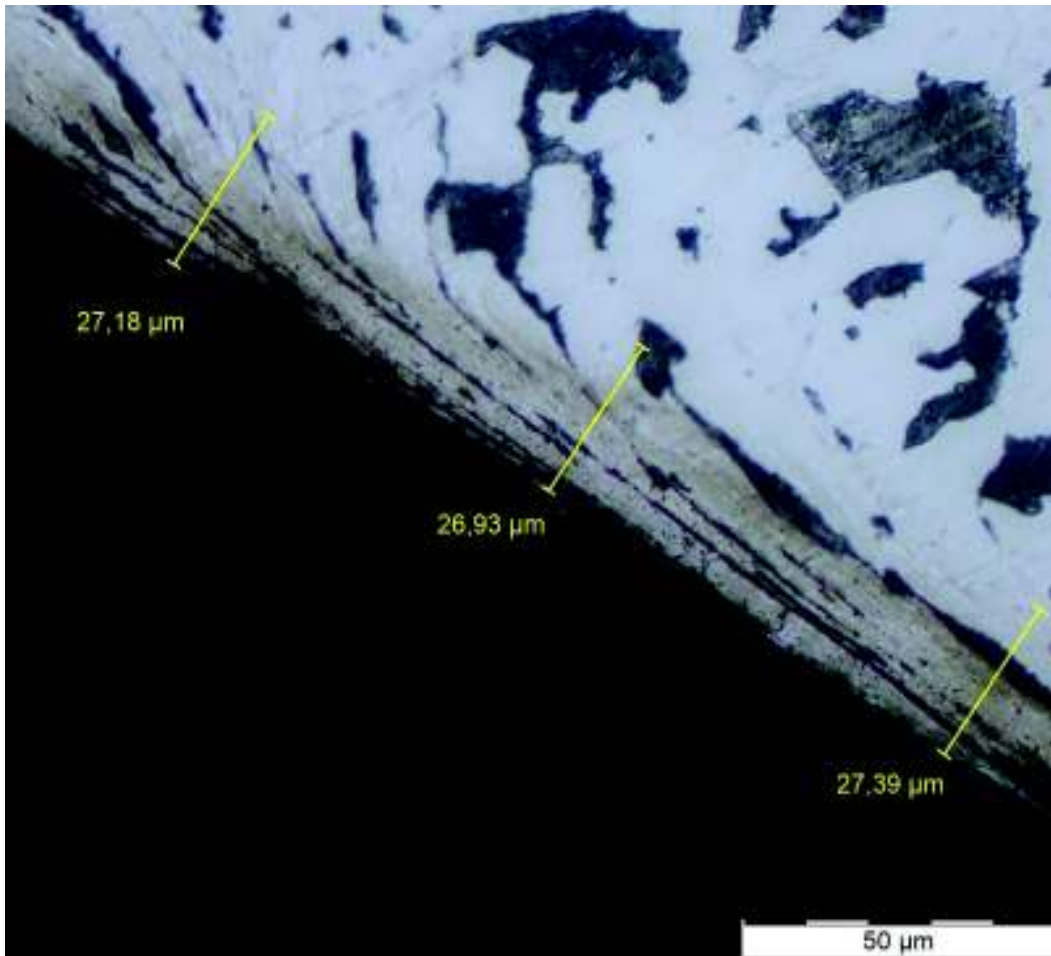


Ilustración 12. Medición de la capa superficial deformada para 1200 RPM, 0.3 mm/rev y 0.5 mm.

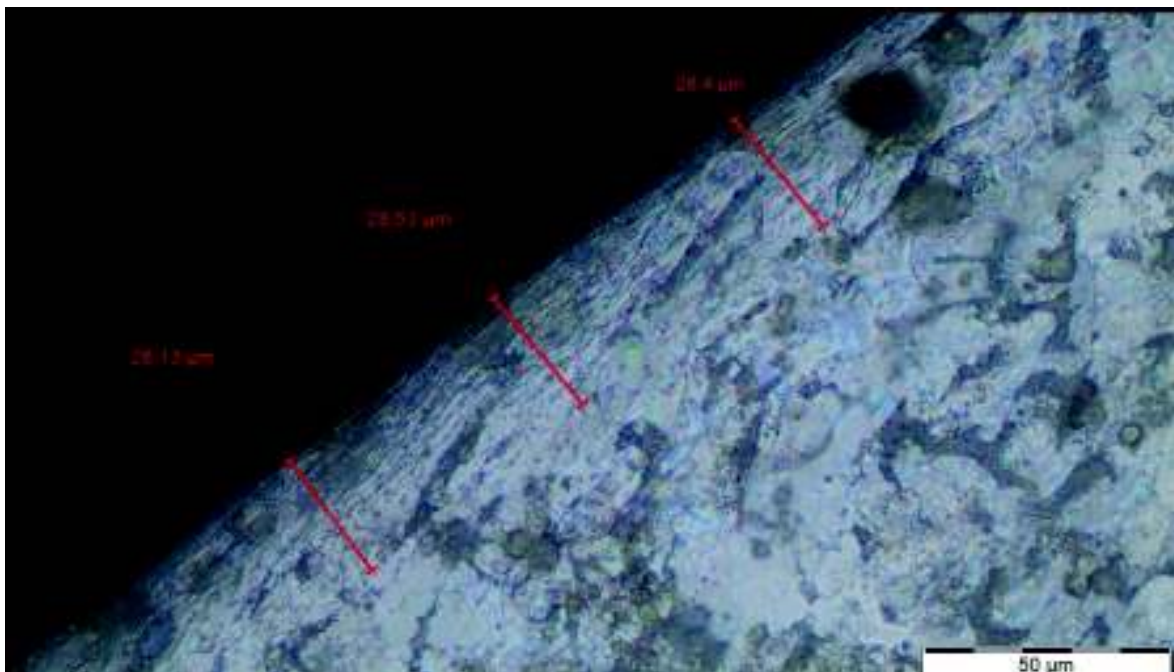


Ilustración 13. Medición de la capa superficial deformada para 1200 RPM, 0.3 mm/rev y 1 mm.

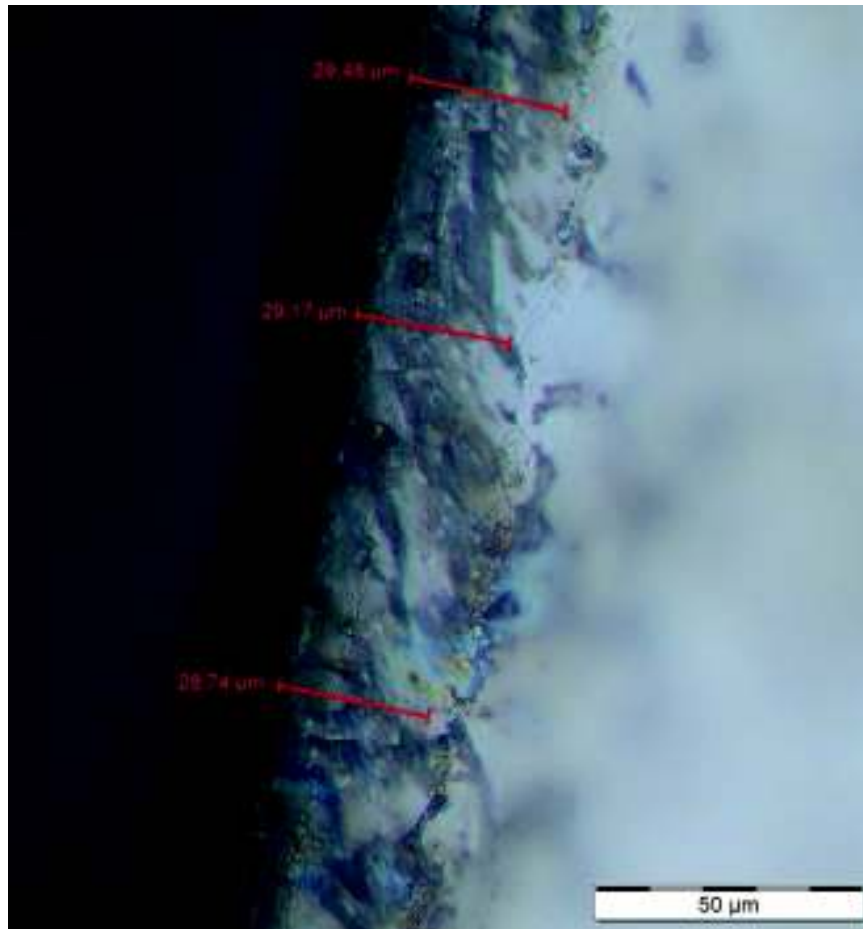


Ilustración 14. Medición de la capa superficial deformada para 1200 RPM, 0.3 mm/rev y 1.5 mm.

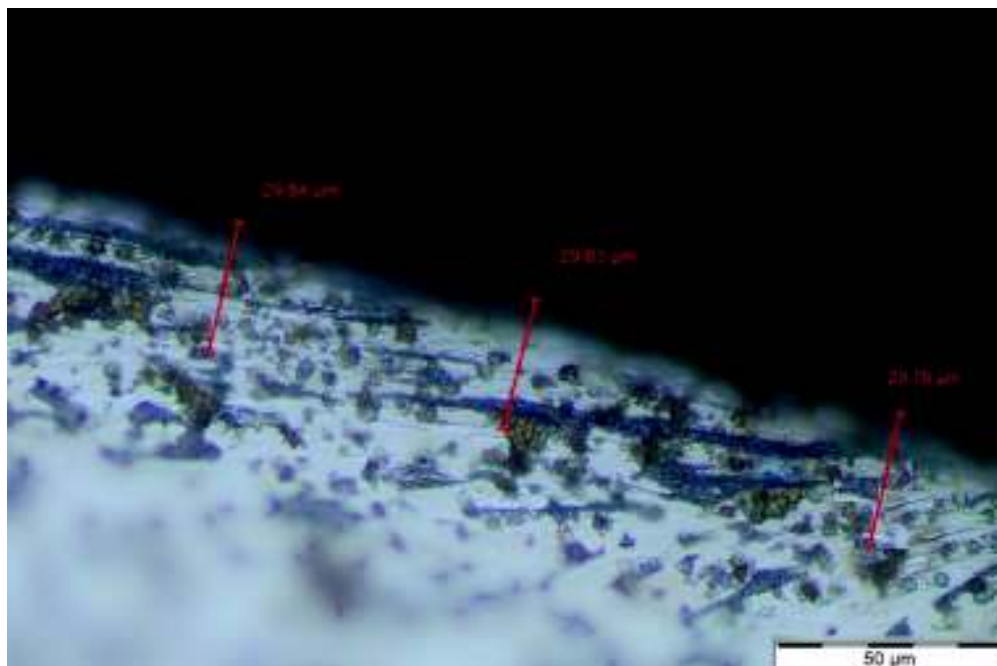


Ilustración 15. Medición de la capa superficial deformada para 1200 RPM, 0.4 mm/rev y 0.5 mm.

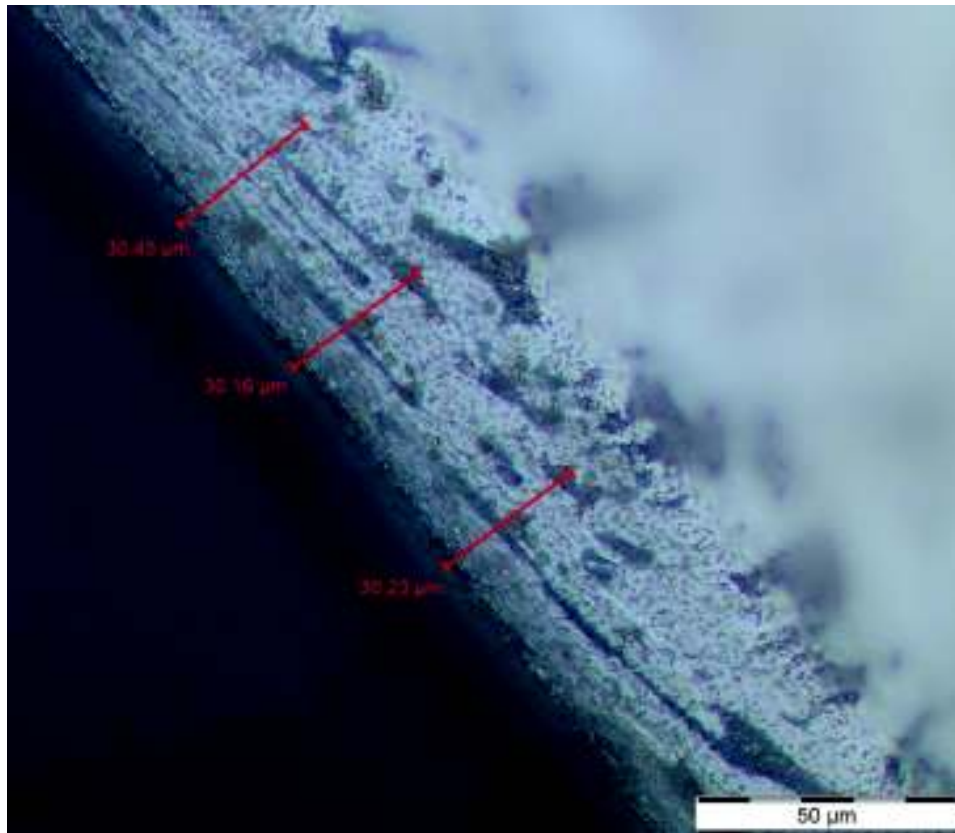


Ilustración 16. Medición de la capa superficial deformada para 1200 RPM, 0.4 mm/rev y 1 mm.

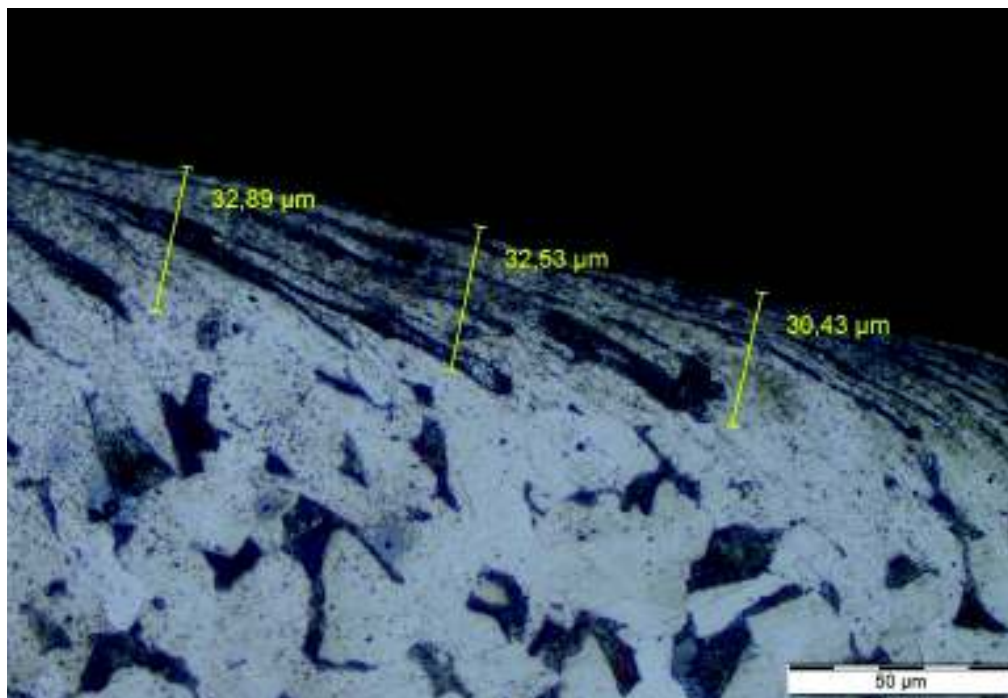


Ilustración 17. Medición de la capa superficial deformada para 1200 RPM, 0.4 mm/rev y 1.5 mm.

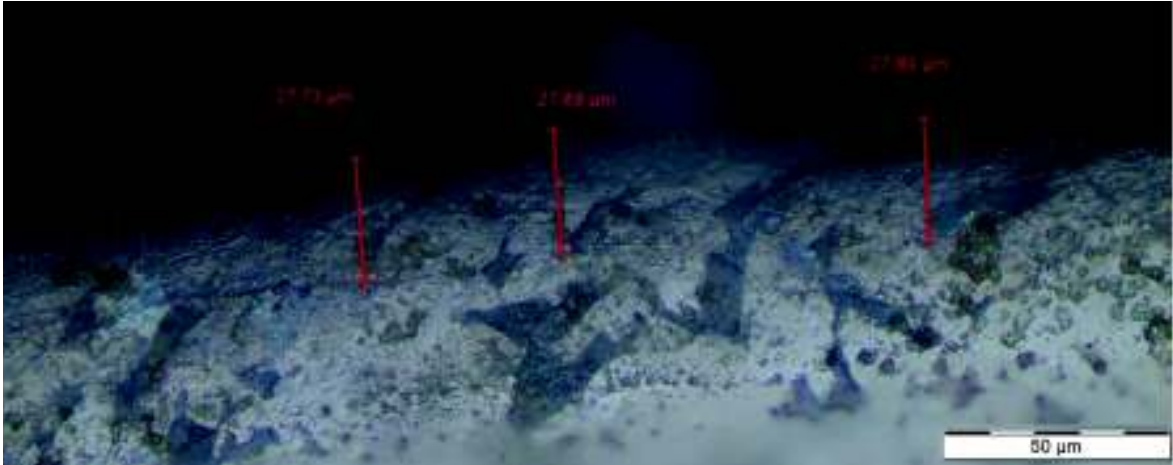


Ilustración 18. Medición de la capa superficial deformada para 1500 RPM, 0.2 mm/rev y 1 mm.

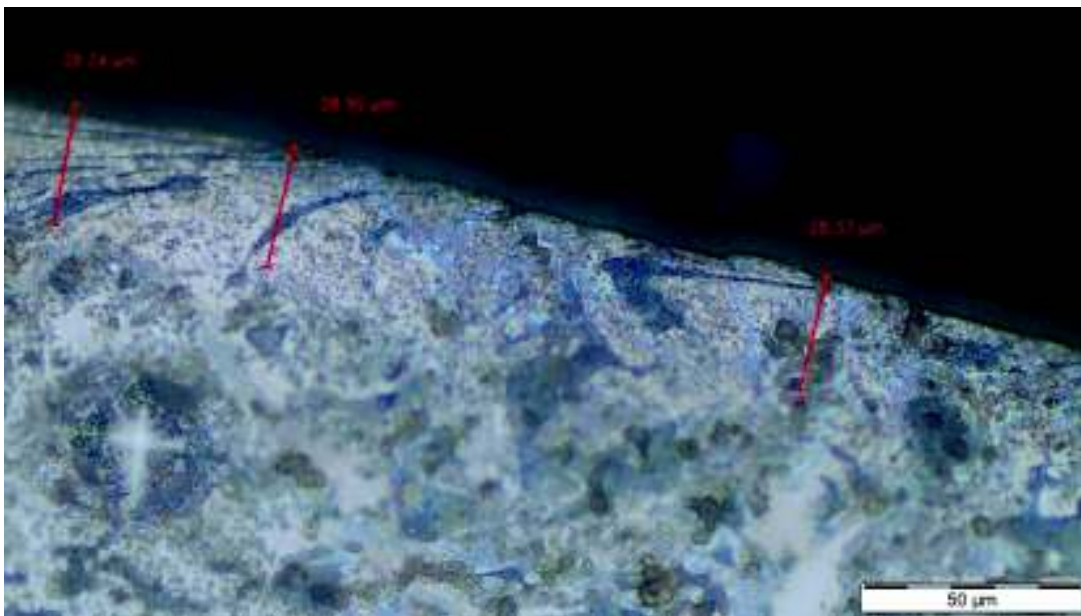


Ilustración 19. Medición de la capa superficial deformada para 1500 RPM, 0.2 mm/rev y 1.5 mm.

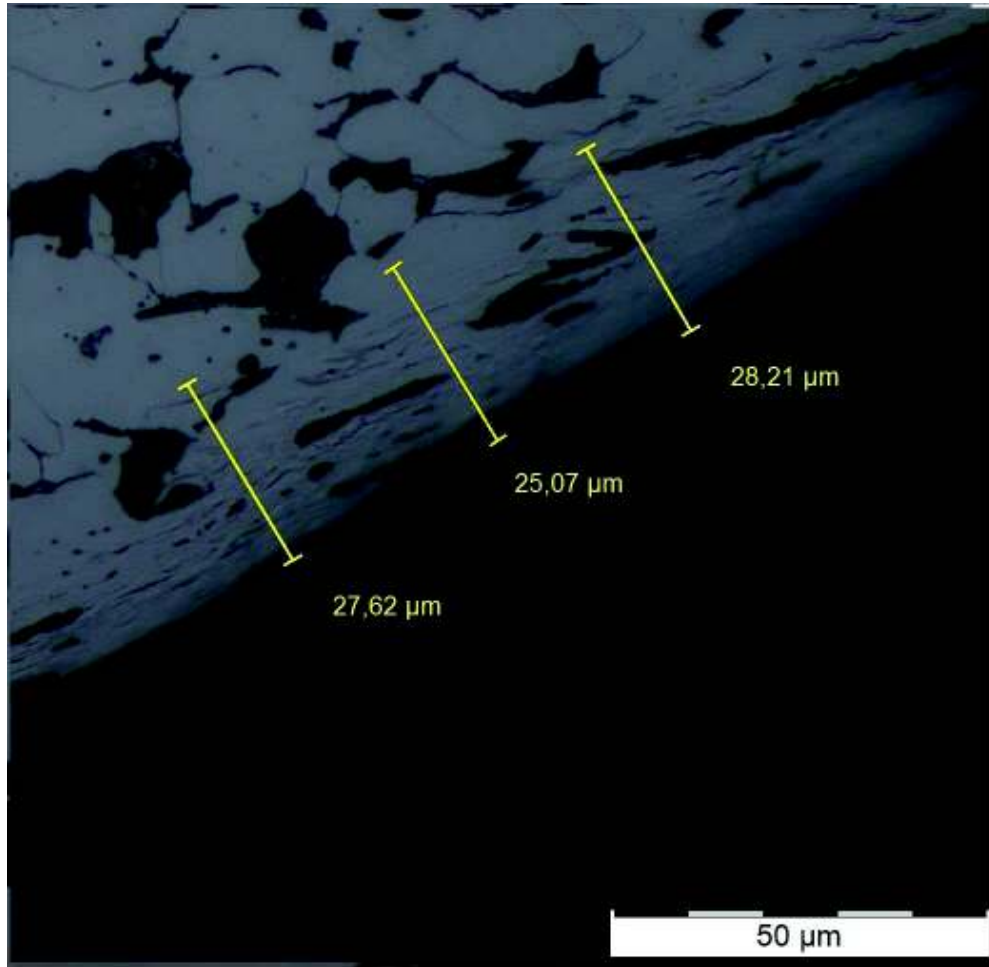


Ilustración 20. Medición de la capa superficial deformada para 1500 RPM, 0.3 mm/rev y 0.5 mm.

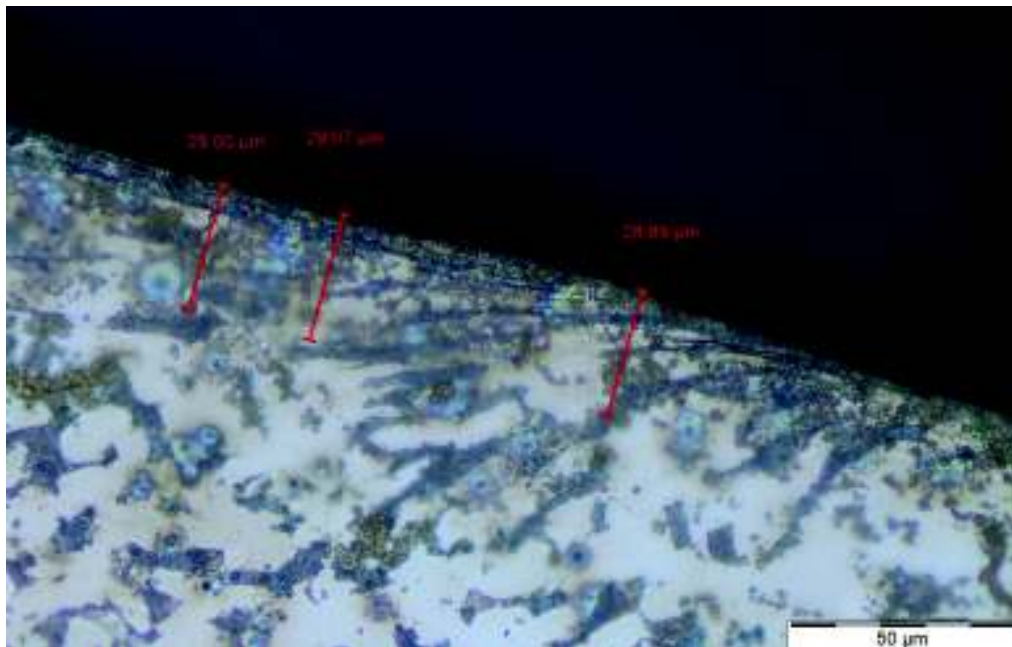


Ilustración 21. Medición de la capa superficial deformada para 1500 RPM, 0.3 mm/rev y 1 mm.



Ilustración 22. Medición de la capa superficial deformada para 1200 RPM, 0.3 mm/rev y 1.5 mm.

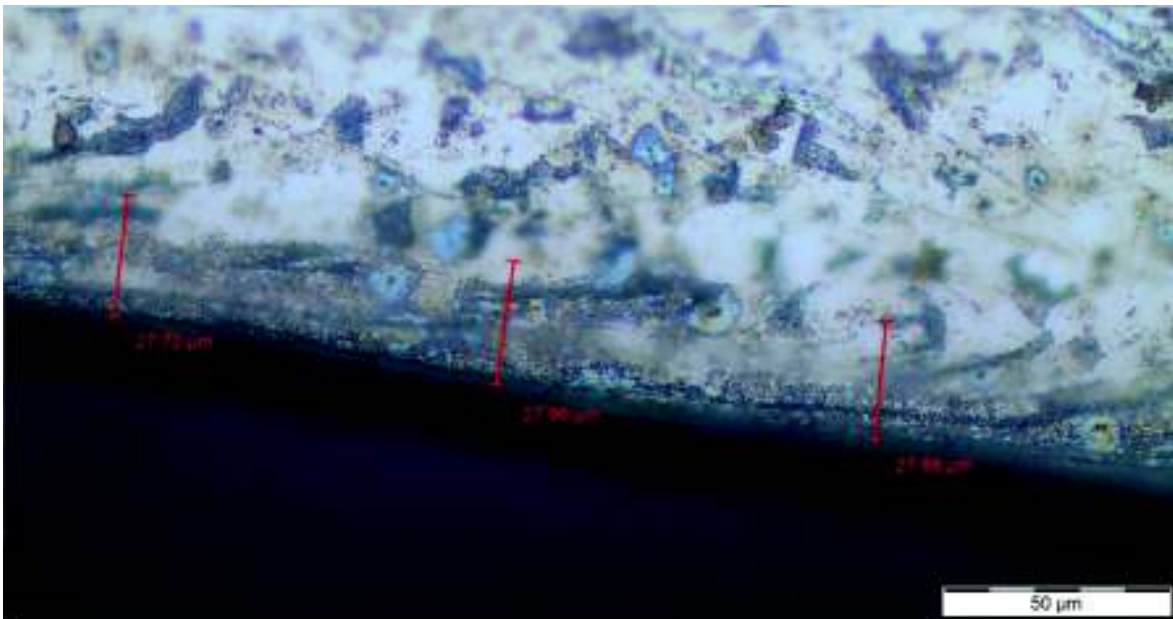


Ilustración 23. Medición de la capa superficial deformada para 1500 RPM, 0.4 mm/rev y 0.5 mm.

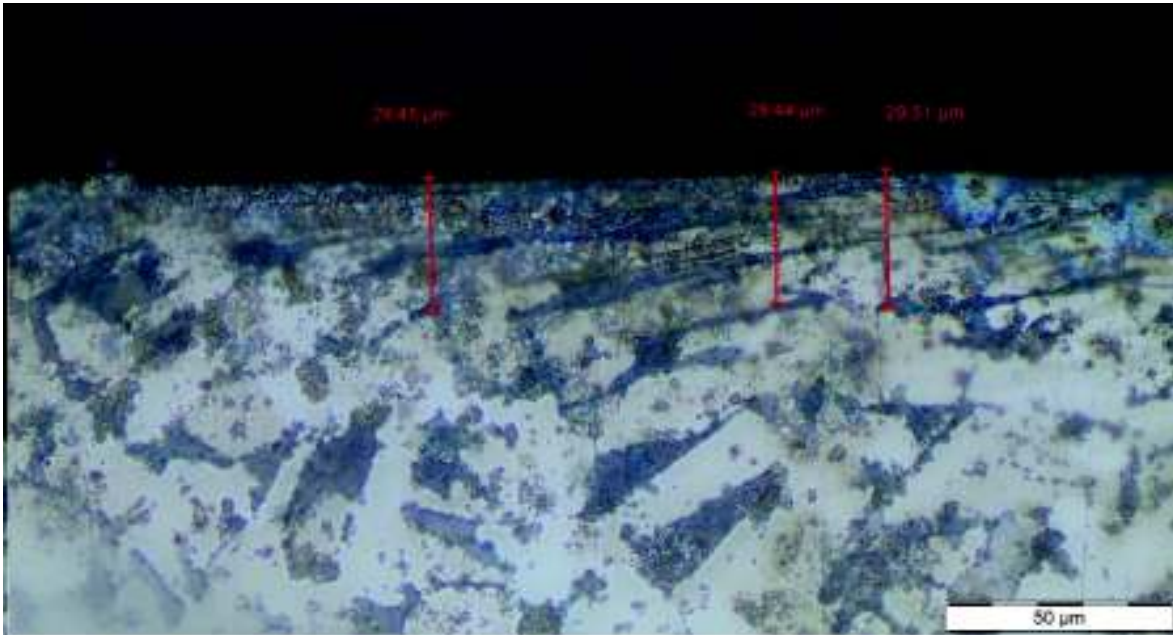


Ilustración 24. Medición de la capa superficial deformada para 1500 RPM, 0.4 mm/rev y 1 mm.

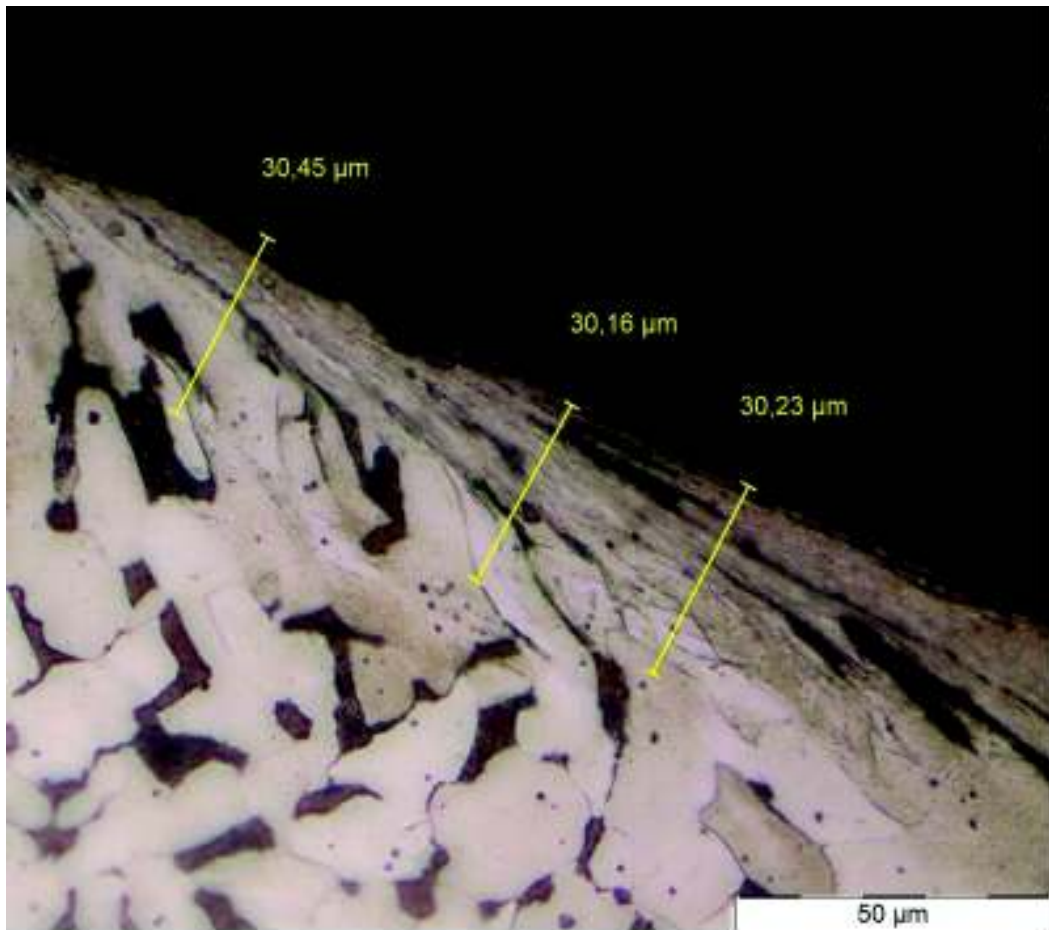


Ilustración 25. Medición de la capa superficial deformada para 1500 RPM, 0.4 mm/rev y 1.5 mm.

Anexo XII.
Mediciones de la microdureza sobre la capa superficial
deformada.

Tabla 1. Variación de la microdureza con respecto a la profundidad de corte en la capa superficial deformada para revoluciones constantes (1200 RPM) y diferentes avances. (a) 0.2 mm/rev, b) 0.3 mm/rev, c) 0.4 mm/rev)

Profundidad (mm)	Dureza (HV)
0,5	233,9
1	236,79
1,5	241

a)

(Fuente: Propia)

Profundidad (mm)	Dureza (HV)
0,5	239,99
1	241,3
1,5	244,38

b)

Profundidad (mm)	Dureza (HV)
0,5	237,89
1	242,2
1,5	247,9

c)

Tabla 2. Variación de la microdureza con respecto a la profundidad de corte en la capa superficial deformada para revoluciones constantes (1500 RPM) y diferentes avances. (a) 0.2 mm/rev, b) 0.3 mm/rev, c) 0.4 mm/rev)

Profundidad (mm)	Dureza (HV)
0,5	230,55
1	234,7
1,5	238,9

a)

(Fuente: Propia)

Profundidad (mm)	Dureza (HV)
0,5	232,15
1	236,89
1,5	240,06

b)

Profundidad (mm)	Dureza (HV)
0,5	237,9
1	240,49
1,5	242,2

c)

Tabla 3. Variación de la microdureza con respecto al avance en la capa superficial deformada para revoluciones constantes (1200 RPM) y diferentes profundidades. (a) 0.5 mm, b) 1 mm, c) 1.5 mm)

Avance (mm/rev)	Dureza (HV)
0,2	230,9
0,3	239,99
0,4	237,89

a)

(Fuente: Propia)

Avance (mm/rev)	Dureza (HV)
0,2	233,79
0,3	241,3
0,4	242,2

b)

Avance (mm/rev)	Dureza (HV)
0,2	241
0,3	244,38
0,4	247,9

c)

Tabla 4. Variación de la microdureza con respecto al avance en la capa superficial deformada para revoluciones constantes (1500 RPM) y diferentes profundidades. (a) 0.5 mm, b) 1 mm, c) 1.5 mm)

Avance (mm/rev)	Dureza (HV)
0,2	237,9
0,3	240,45
0,4	242,3

a)

(Fuente: Propia)

Avance (mm/rev)	Dureza (HV)
0,2	240,49
0,3	243,08
0,4	245,73

b)

Avance (mm/rev)	Dureza (HV)
0,2	242,2
0,3	246,59
0,4	247,3

c)

Anexo XIII.

Tabulación del espesor de capa superficial deformada promedio.

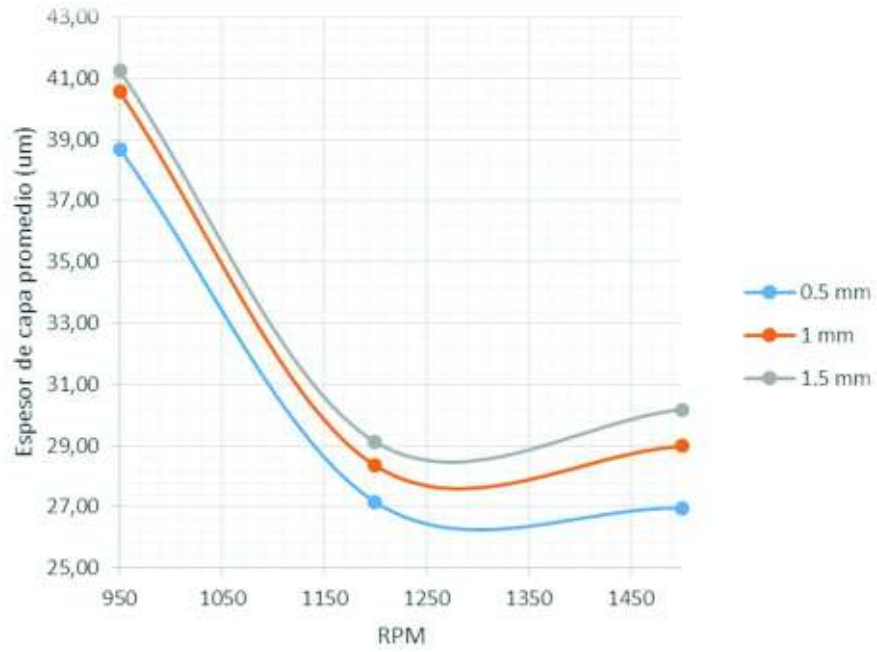


Ilustración 1. Comportamiento del espesor de capa promedio con respecto para diferentes revoluciones y profundidades de corte con avance constante (0.3 mm/rev).

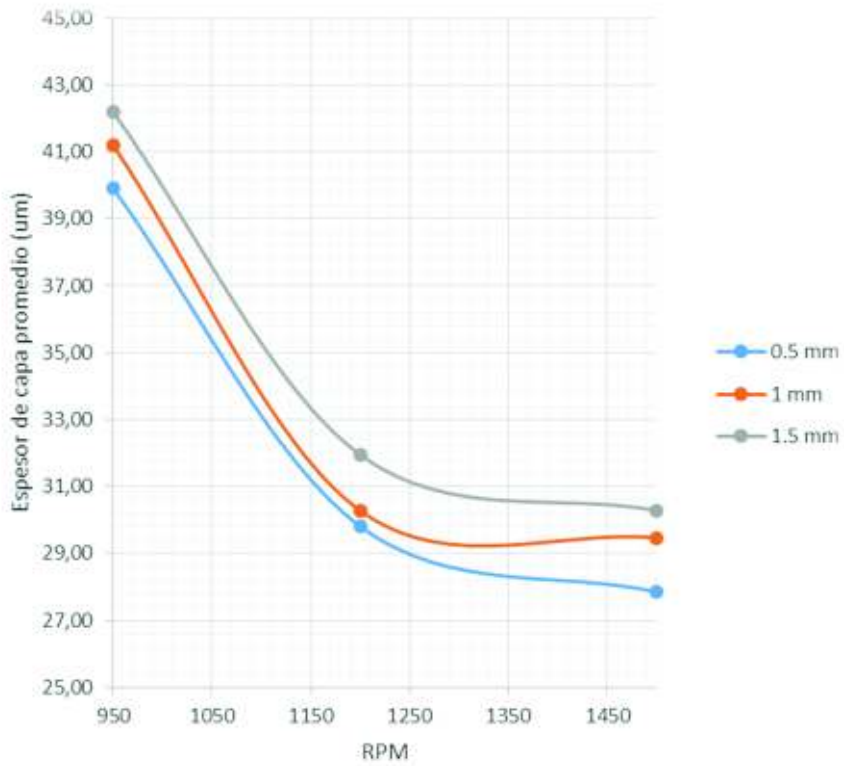


Ilustración 2. Comportamiento del espesor de capa promedio con respecto para diferentes revoluciones y profundidades de corte con avance constante (0.4 mm/rev).