ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

ESTUDIO DE LA INTEGRIDAD SUPERFICIAL DEL ACERO AISI 420 MAQUINADO MEDIANTE PROCESO DE RECTIFICADO

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

DELGADO NARVAEZ JOHN JAIRO
john.delgado@epn.edu.ec

LÓPEZ ANCHALI ANDRÉS MAURICIO
andres.lopez@epn.edu.ec

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

Quito, febrero 2020

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por **JOHN JAIRO DELGADO NARVAEZ** y **ANDRÉS MAURICIO LÓPEZ ANCHALI**, bajo mi supervisión.

Ing. Díaz Campoverde Carlos Wime, M.Sc.

DIRECTOR DE PROYECTO

DECLARACIÓN

Nosotros, **JOHN JAIRO DELGADO NARVAEZ** y **ANDRÉS MAURICIO LÓPEZ ANCHALI**, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos nuestros 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.

_____

John Jairo Delgado Narváez

_____

Andrés Mauricio López Anchali

DEDICATORIA

John Delgado

A mis padres, Humberto y Rosa, como una ofrenda de gratitud por su esfuerzo y permitir que este sueño se haga realidad.
A mi hermana, Jessica, por su apoyo incondicional en todas mis metas y objetivos.
A mis amigos, Evelyn, Johanna, Jonathan y Javier por ser una parte valiosa de mi vida.

"Pon todo lo que hagas en manos del Señor, y tus planes tendrán éxito."
Proverbios 16:3

DEDICATORIA

Andrés López

A mis padres, Rafael y Marcia, por haberme formado como la persona quien soy ahora, cada uno de mis logros se los debo a ustedes y en especial este, ya que, por su apoyo y esfuerzo, hicieron que este sueño se haga realidad.
A mis hermanos, Stalin y Alisson, por ser las personas que me inspiran a ser mejor cada día y mostrarles que con esfuerzo podemos alcanzar nuestras metas.
A mi gran familia por todo su apoyo y confianza a lo largo de toda mi formación académica.

"Todos los triunfos nacen cuando nos atrevemos a comenzar".
Eugene Ware.

AGRADECIMIENTO

A Dios, por permitirme haber conocido a un Dios genuino durante mi vida universitaria, estoy tan agradecido con Él por abrir puertas donde se cerraron y poner delante de mí a personas y amigos que me llevarían a cumplir este sueño, gracias por ser mi guía, mi fuente de vida, refugio y enseñarme que todo lo puedo en Cristo que me fortalece.

A mis padres Humberto y Rosa, por permitirme cumplir un sueño que ha sido de todos, este logro les pertenece por su esfuerzo de cada día en su trabajo, los amo y honro porque son quienes me han enseñado el valor de obtener las cosas en la vida. Gracias a ustedes por formarme como la persona que soy y sin su apoyo esto no hubiera sido posible.

A mi hermana Jessica, por ser mi compañera, amiga, confidente y cómplice durante mi vida académica, agradezco a Dios por tu vida y ser mi razón para superarme cada día. Te quiero mucho y gracias por tus palabras de apoyo.

A mis amigos de la Universidad, en especial a Andreita, Kelly, Gaby, Paul, Diego, David, Bryan, Jeff, Xavier, Josué, Marjorie, Martín y Liss por todos los momentos vividos dentro y fuera de aulas.

A mi compañero de tesis Andrés, que más que un compañero se ha llegado a convertir en un gran amigo y hermano en tiempos de necesidad, gracias por ser paciente, comprensivo en momentos difíciles y por todo tu apoyo para la realización de este proyecto.

A mi director de tesis Ing. Carlos Díaz, por su confianza, guía y motivación tanto para la realización de este proyecto como en el transcurso de la carrera a manera de mi tutor académico.

Un agradecimiento especial a la Ing. Cristina Almeida, que aún sin conocerme depositó su confianza en mí para alcanzar este sueño, gracias por esa oportunidad de oro y nunca cerrar las puertas para un consejo. Me ha demostrado la bondad de su corazón y que las buenas personas están hechas de acero inolvidable.

A la Facultad de Ingeniería Mecánica donde me formaron como un profesional.

Al personal encargado del Laboratorio de Metalografía Desgaste y Falla por su ayuda con la parte experimental de este proyecto y su apoyo para culminar el mismo.

A mis amigos de Comunidad de Fe, en especial a Evelyn C., Johanna S., Jonathan A., Javier C., Vanessa C. y Henry R. que de alguna manera u otra, me han demostrado que en todo tiempo ama el amigo y es como un hermano en tiempo de angustia.

John Delgado

AGRADECIMIENTO

A Dios y a la Virgen del Quinche por haberme otorgado la vida y fortaleza para culminar este proyecto, además de haberme otorgado una familia maravillosa, quienes han creído en mí siempre, dándome ejemplo de superación, humildad y sacrificio; enseñándome a valorar todo lo que tengo.

A mis padres Rafael y Marcia que, sobre todas las adversidades siempre lucharon para que este sueño se haga realidad, siendo ustedes los principales motores de mis sueños y mis expectativas, apoyándome en cada decisión personal y profesional.

A mis hermanos, Stalin, por ser más que mi hermano, mi amigo, confidente y cómplice, eres ese apoyo que en momentos difíciles, siempre está ahí para salir adelante. Alisson, por ser esa personita que, con su inocencia y gracia, siempre nos haces sonreír; ambos son esa inspiración que me ha hecho mejorar cada día.

A la niña de mis ojos, por dejarme entrar en tu vida y brindarme todo ese apoyo incondicional en mi vida y durante el desarrollo de este proyecto, gracias por la paciencia, al aguantar todo mi malgenio cuando más estresado estaba, por consentirme cuando pasamos gratos momentos juntos y por no dejarme vencer. ¡Lo logramos amor te amo!

A mis hermanos de vida, Dany, Henry, Dennis y Álvaro, gracias por sus consejos y apoyo incondicional para no dejarme vencer cuando más lo necesitaba, gracias por los gratos momentos dentro y fuera de las aulas. Gracias por su amistad y hermandad.

Un agradecimiento muy especial para el Ing. Carlos Díaz M.Sc. por el apoyo brindado en la realización de este proyecto, por sus enseñanzas, confianza, consejos y su amistad incondicional. De igual manera a la Ing. Patricia Proaño MSc. por su amistad, confianza y la oportunidad que me brindó para adquirir conocimientos prácticos y científicos dentro del Laboratorio de Metalografía, Desgaste y Falla de la EPN.

Agradecer a Don Rene y a cada una de las personas, amigos que conocí a lo largo de mi estadía dentro del LMDF, con quienes compartí gratos momentos.

A mi compañero de tesis John, por su amistad y colaboración en la realización de este proyecto.

A mis amigas, Jazmín, Mishell, Katty y Andrea, gracias por su amistad incondicional y por los momentos compartidos dentro y fuera de las aulas, de igual manera a mis amigos Tebo, Michael y Ronnie gracias por su amistad y el apoyo en momentos difíciles.

Andrés López

ÍNDICE

CERTIFICACIÓN i
DECLARACIÓN ii
DEDICATORIA iii
DEDICATORIA iv
AGRADECIMIENTO v
AGRADECIMIENTO vi
RESUMEN xiv
ABSTRACT xv
INTRODUCCIÓN 1
Objetivo general 1
Objetivos específicos 1
1. MARCO TEÓRICO 2
1.1. Aceros inoxidables 2
1.1.1. Aceros inoxidables serie AISI 400 2
1.1.2. Microestructura del acero AISI 420 3
1.1.3. Diagrama Trasformación-Tiempo-Temperatura del acero AISI 420 4
1.1.4. Maquinabilidad del acero inoxidable martensítico AISI 420 5
1.1.5. Procesos de corrosión en el acero AISI 420 5
1.1.5.1. Tipos de corrosión 6
1.1.5.1.1. Corrosión por picadura 7
1.1.5.1.2. Morfología de la corrosión por picaduras 8
1.1.5.1.3. Medición de la profundidad de la picadura 9
1.2. Procesos de maquinado 10
1.2.1. Procesos de remoción de material 11
1.2.1.1. Procesos abrasivos 11
1.3. Rectificado 11

1.3.1. Tipos de rectificado 11
1.3.1.1. Rectificado de superficies cilíndricas 11
1.3.1.1.1. Rectificado cilíndrico de exteriores 11
1.3.1.1.2. Rectificado cilíndrico de interiores 12
1.3.1.1.3. Rectificado cilíndrico sin centros 12
1.3.1.2. Rectificado de superficies planas 12
1.3.1.2.1. Rectificado tangencial 12
1.3.1.2.2. Rectificado frontal 13
1.3.2. Parámetros del rectificado 14
1.3.3. Herramienta de corte abrasiva 15
1.3.3.1. Material abrasivo 16
1.3.3.2. Tamaño del grano abrasivo 16
1.3.3.3. Grado de dureza 16
1.3.3.4. Estructura o porosidad 17
1.3.3.5. Material de unión o aglutinante 17
1.3.3.6. Designación normalizada 17
1.3.4. Efectos superficiales del rectificado 18
1.3.4.1. Temperatura 19
1.3.4.2. Quemado. 19
1.3.4.3. Agrietamiento por calor 19
1.3.4.4. Esfuerzos residuales 19
1.4. Acabado superficial 20
1.5. Proceso de medición de rugosidad 22
1.5.1. Parámetros de rugosidad 24
1.5.1.1. Definición de Z(x) 24
1.5.1.2. Rugosidad promedio (Ra) 25
1.5.1.3. Definición de Rq (RMS) 25
1.5.1.4. Altura máxima del perfil (Rp) 26

1.5.1.5. Altura máxima promedio del perfil máximo (Rpm) 27
1.5.1.6. Profundidad máxima del valle del perfil (Rv) 27
1.5.1.7. Altura máxima del perfil (Rt) 27
1.5.1.8. Altura máxima promedio del perfil (Rz) 27
1.5.1.9. Profundidad máxima de rugosidad (Rmax) 27
2. METODOLOGÍA 28
2.1. Proceso de rectificado tangencial 28
2.1.1. Preparación del material 28
2.1.2. Parámetros de rectificado 28
2.1.3. Equipos para el proceso de rectificado 29
2.1.4. Selección de la herramienta de corte 30
2.1.5. Procedimiento del proceso de rectificado 30
2.2. Caracterización superficial 32
2.2.1. Ensayo de rugosidad 33
2.2.1.1. Probetas para ensayo de rugosidad 33
2.2.1.2. Equipo para ensayo de rugosidad 34
2.2.1.3. Procedimiento para ensayo de rugosidad 35
2.3. Análisis metalográfico 35
2.3.1. Probetas para análisis metalográfico 35
2.3.2. Equipo para análisis metalográfico 36
2.3.3. Procedimiento para análisis metalográfico 38
2.4. Ensayo de microdureza 39
2.4.1. Probetas para ensayo de microdureza 39
2.4.2. Equipo para ensayo de microdureza 39
2.4.3. Procedimiento para ensayo de microdureza 40
2.5. Ensayo de corrosión 40
2.5.1. Probetas para el ensayo de corrosión 41
2.5.2. Corrosión acelerada 41

2.5.3. Velocidad de corrosión 41
2.5.4. Equipo para el ensayo de corrosión 42
2.5.5. Procedimiento para el ensayo de corrosión 43
3. RESULTADOS Y DISCUSIONES 45
3.1. Resultados 45
3.1.1. Proceso de rectificado 45
3.1.2. Ensayo de rugosidad 48
3.1.3. Metalografías material y subsuperficie rectificada 52
3.1.4. Microdureza en zonas generadas por el rectificado 55
3.1.5. Ensayo de corrosión acelerada 57
3.1.6. Ensayo de rugosidad en superficie corroída 58
3.2. Discusión 59
3.2.1. Proceso de rectificado 59
3.2.2. Ensayo de rugosidad 62
3.2.3. Metalografías material y subsuperficie rectificada 64
3.2.4. Microdureza en zonas generadas por el rectificado. 65
3.2.5. Análisis de corrosión 69
3.2.6. Análisis de pérdida de masa 70
3.2.7. Ensayo de rugosidad en superficie corroída 71
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 75
4.1. Conclusiones 75
4.2. Recomendaciones 76
Referencias Bibliográficas 77
Anexos 81
ANEXO I. ..... **¡Error! Marcador no definido.**
ANEXO II. ..... **¡Error! Marcador no definido.**
ANEXO III. ..... **¡Error! Marcador no definido.**
ANEXO IV. ..... **¡Error! Marcador no definido.**

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Composición química de los aceros inoxidables martensíticos AISI 420. 2
Tabla 2.1. Parámetros de rectificado. 29
Tabla 2.2. Especificaciones técnicas de los equipos para el proceso de rectificado. 29
Tabla 2.3. Selección de discos del rectificado. 30
Tabla 2.4. Codificación para identificación de probetas. 31
Tabla 2.5. Especificaciones técnicas del rugosímetro. 34
Tabla 2.6. Especificaciones técnicas de la máquina desbastadora de lija de disco. 36
Tabla 2.7. Especificaciones técnicas del equipo de preparación y pulido de muestras. 37
Tabla 2.8. Especificaciones técnicas del microscopio metalográfico. 38
Tabla 2.9. Especificaciones del equipo para ensayo de microdureza. 40
Tabla 2.10. Especificaciones técnicas de la balanza digital. 43
Tabla 3.1. Temperaturas alcanzadas en el rectificado grueso. 45
Tabla 3.2. Temperaturas alcanzadas en el rectificado medio. 46
Tabla 3.3. Temperaturas alcanzadas en el rectificado fino. 46
Tabla 3.4. Resumen estadístico de medición de temperaturas en las probetas. 46
Tabla 3.5. Superficies obtenidas en el rectificado grueso con los diferentes discos. 47
Tabla 3.6. Rugosidad en el rectificado grueso. 50
Tabla 3.7. Rugosidad en el rectificado medio. 50
Tabla 3.8. Rugosidad en el rectificado fino. 51
Tabla 3.9. Resumen de datos estadísticos de rugosidad. 51
Tabla 3.10. Metalografía acero AISI 420 en sus dos sentidos. 52
Tabla 3.11. Micrografía de superficies rectificadas con disco medio. 53
Tabla 3.12. Mediciones de distancia de zona de deformación. 55
Tabla 3.13. Datos de microdureza y distancias de indentación. 56
Tabla 3.14. Resultado de ensayo de corrosión. 57
Tabla 3.15. Pérdida de masa y profundidad de picadura de las probetas corroídas. 58
Tabla 3.16. Rugosidad en superficie rectificada sometida a corrosión. 59
Tabla 3.17. Incremento de rugosidad posterior al ensayo de corrosión. 74

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Microestructura del acero inoxidable martensítico AISI 420, con granos de ferrita y carburos de cromo dispersos en la matriz. 500x. 3
Figura 1.2. Diagrama TTT AISI 420. 4
Figura 1.3. Vista esquemática de cinco modos intrínsecos de corrosión. 7
Figura 1.4. Producción de corrosión por picadura. 8
Figura 1.5. Morfología de la picadura. 9
Figura 1.6. Clasificación de los procesos de remoción de material. 10
Figura 1.7. Rectificado de superficies cilíndricas: a) exteriores, b) interiores, c) sin centros. 12
Figura 1.8. a) Proceso de rectificado tangencial, b) Esquema de una rectificadora tangencial. 13
Figura 1.9. a) Proceso de rectificado frontal, b) Esquema de una rectificadora frontal. 14
Figura 1.10. Esquema de los parámetros del rectificado tangencial. 14
Figura 1.11. Esquema del modelo físico de un disco o muela de rectificado. 15
Figura 1.12. Sistema de identificación de los discos abrasivos convencionales. 18
Figura 1.13. Especificación de los discos de rectificado marca Norton. 18
Figura 1.14. Esquema de las características de una superficie según el código ASME B46. 20
Figura 1.15. Rugosidades de superficies obtenidas en diversos procesos. 21
Figura 1.16. Esquema que ilustra los conceptos de rugosidad. 23
Figura 1.17. a) Perfil sin filtrar y línea media filtrada, b) Perfil de rugosidad. 24
Figura 1.18. Ilustración para el cálculo de la rugosidad promedio (Ra). 25
Figura 1.19. Parámetros Rt, Rp y Rv. 26
Figura 1.20. Perfil de superficie que contiene dos longitudes de muestreo, l_1 y l_2, y los parámetros Rpi y Rti. 26
Figura 1.21. Ilustración de los parámetros Rt y Rmax. 27
Figura 2.1. Dimensiones de las probetas: a) rectificado medio y fino, b) rectificado grueso. 31
Figura 2.2. Medición de temperatura; a) durante el proceso, b) al finalizar el proceso. 32
Figura 2.3. Ubicación correcta de la cámara termográfica respecto al punto de medición. 32
Figura 2.4. Principio de funcionamiento de sonda del rugosímetro. 33
Figura 2.5. Esquema de áreas de referencia en la probeta. 34
Figura 2.6. Probetas para análisis metalográfico. 36

Figura 2.7. Reactivo químico: Agua regia. 37
Figura 2.8. Probetas: a) Dimensiones, b) Protección de caras que no intervienen en el estudio, c) Ubicación para el ensayo. 41
Figura 2.9. Ubicación de las probetas en recipiente. 42
Figura 2.10. Ensayo corrosión: a) Probetas, b) Inicio, c) Final, d) Resultado, e) Probetas para análisis metalográfico. 44
Figura 3.1. Medición termográfica durante el proceso de rectificado (probeta 951). 45
Figura 3.2. Medición de rugosidades. 48
Figura 3.3. Muestreo de datos de rugosidad en probetas. 49
Figura 3.4. Perfil de evaluación de la probeta 951. 49
Figura 3.5. Mapeo de Microdureza Probeta 862 a) Primera parte b) Segunda parte c) Distancias. 56
Figura 3.6. Diagrama de caja de la variación de temperatura durante el proceso de rectificado. 60
Figura 3.7. Tendencia de temperatura vs. profundidad de pasada. 61
Figura 3.8. Diagrama rugosidad vs. proceso de rectificado. 62
Figura 3.9. Tendencia de tamaño de grano vs. rugosidad. 63
Figura 3.10. Profundidad de pasada vs. rugosidad, considerando el tipo de disco de rectificado. 63
Figura 3.11. Microestructura del acero AISI 420 a) acero utilizado para trabajo sin maquinar, b) acero martensítico. 64
Figura 3.12. Microestructura acero AISI 420 rectificado a) profundidad de deformación, b) perfiles de deformación. 65
Figura 3.13. Diagrama de caja microdureza en zonas de deformación. 66
Figura 3.14.Tendencia de microdureza vs. distancia de indentación. 67
Figura 3.15. Tendencia microdureza vs. tamaño de grano disco de rectificado. 67
Figura 3.16. Tendencia microdureza vs. profundidad de pasada. 68
Figura 3.17. Tendencia microdureza vs. rugosidad superficie rectificada. 69
Figura 3.18. Pérdida de masa debido a la corrosión por picadura. 70
Figura 3.19. Profundidad de picadura generada por la corrosión. 71
Figura 3.20. Tendencia pérdida de masa vs. profundidad de picadura. 71
Figura 3.21. Rugosidad antes y después del ensayo de corrosión (disco grueso). 72
Figura 3.22. Rugosidad antes y después del ensayo de corrosión (disco medio). 73
Figura 3.23. Rugosidad antes y después del ensayo de corrosión (disco fino). 74

RESUMEN

El presente estudio se enfoca en estudiar la integridad superficial del acero inoxidable martensítico AISI 420, considerando su sentido de laminación longitudinal y transversal, con la variación de los parámetros del rectificado tangencial, tales como profundidad de pasada y granulometría del disco de rectificado, manteniendo constante la velocidad de corte y avance.

El proceso experimental se lo realizó en una rectificadora tangencial, a una velocidad de corte constante de 2400 rpm y una velocidad de avance de 8 m/min, variando la profundidad de pasada (0,020, 0,010 y 0,005 (mm)) y granulometría del disco de rectificado: 60 disco fino, 46 disco medio y 24 disco grueso. Se genera un perfil topográfico que mediante un ensayo de rugosidad se determina la calidad de la superficie rectificada, un análisis metalográfico determina las deformaciones en la subsuperficie del material y un ensayo de microdureza revela un aumento de la resistencia a la deformación plástica del acero.

Además, se realizó un ensayo de corrosión acelerada en la superficie rectificada, considerando peso inicial y final, para determinar la pérdida de masa por corrosión, donde es evidente corrosión por picadura. Se registra un incremento de la rugosidad en las probetas expuestas a corrosión al repetir el ensayo de rugosidad.

El estudio demuestra que el acabado superficial obtenido con los distintos discos de rectificado influye en la integridad superficial del acero AISI 420, afectando directamente en sus propiedades mecánicas. Obteniendo mejor calidad superficial al rectificar con un disco fino A60NVS, y una profundidad de pasada de 0,005 mm.

Palabras clave: rectificado, acabado superficial, integridad superficial, AISI 420, corrosión.

ABSTRACT

The present study focuses on studying the surface integrity of AISI 420 martensitic stainless steel, deeming its longitudinal and transverse rolling direction, with the variation of tangential grinding parameters, such as depth of cut and grinding wheel grain size, keeping the cutting and feed rate constant.

The experimental process was performed in a tangential grinding machine, with a constant cutting speed of 2400 rpm and a feed rate of 8 m/min, with the variation of the depth of cut (0.020, 0.010 and 0.005 (mm)), and grinding wheel grain size, which is: 60 for fine grinding wheel, 46 for middle grinding wheel and 24 for coarse grinding wheel. A topographic profile is generated which, by means of a roughness test the quality of the grinding surface is determined, a metallographic analysis determines the deformations in the subsurface of the material and a microhardness test shows an increase in the plastic deformation resistance of steel.

Furthermore, an accelerated corrosion test was performed on the grinding surface, deeming its initial and final weight, to determine the loss of mass due to corrosion, where pitting corrosion is evident. An increase in roughness is recorded in samples exposed to corrosion when the roughness test is performed again.

The study shows that the surface finish obtained with the different grinding wheel influences the surface integrity of AISI 420 steel, directly affecting its mechanical properties. Better surface quality is getting when the grinding process is with a fine grinding wheel A60NVS and depth of cut 0,005 mm.

Keywords: grinding, surface finishing, surface integrity, AISI 420, corrosion.

ESTUDIO DE LA INTEGRIDAD SUPERFICIAL DEL ACERO AISI 420 MAQUINADO MEDIANTE PROCESO DE RECTIFICADO

INTRODUCCIÓN

Los aceros inoxidables martensíticos AISI 420 son aceros que debido a sus buenas propiedades mecánicas, físicas y químicas como: resistencia a la tensión, resistencia a la abrasión, resistencia a la fatiga, moderada resistencia a la corrosión, termofluencia y resistencia al calor, se utilizan para realizar ejes, engranes, resortes, piezas para válvulas, instrumental quirúrgico y dental, alabes de turbina, partes de bombas, cuchillería, moldes para inyección de vidrio o plástico, entre otras aplicaciones. Donde el acabado superficial del acero AISI 420 es primordial e influye en el trabajo operativo de este acero; un acabado superficial inapropiado resulta por los inadecuados parámetros de fabricación, presentes en los procesos de maquinado.

El estudio se lo realiza con el fin de demostrar que el acabado superficial del acero AISI 420 obtenido a través del proceso de rectificado influye en sus propiedades mecánicas, microestructurales y subsuperficiales, que, mediante la variación de los parámetros de rectificado, profundidad pasada y granulometría de la herramienta de corte (manteniendo constante la velocidad de corte y avance), se obtienen distintas rugosidades en la superficie rectificada, para analizar la integridad superficial de este acero.

Objetivo general

Estudiar la integridad superficial del acero AISI 420 maquinado mediante proceso de rectificado.

Objetivos específicos

- Realizar el proceso de rectificado tangencial en el acero AISI 420 con la variación de discos abrasivos y las variables que intervienen en el proceso.
- Realizar la caracterización de las superficies rectificadas.
- Analizar la variación del acabado superficial provocado por los discos abrasivos empleados en el proceso de rectificado.
- Efectuar el ensayo de rugosidad y microdureza en las probetas de acero AISI 420.
- Realizar el análisis y discusión de resultados.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Aceros inoxidables

Los aceros inoxidables son aleaciones de Fe-C con un contenido de cromo del 12 % al 17 % y carbono del 0,15 % a 1 %, con una alta resistencia a la corrosión debido a la formación espontánea de una película pasiva de óxido de cromo en la superficie. Dicha película es rápidamente restaurada en presencia del oxígeno, y así daños por abrasión, corte o mecanizado son reparados de forma instantánea. (Hernández & Romero, 2016).

La estructura martensítica se obtiene por medio del tratamiento térmico del temple, que transforma la austenita en martensita sin difusión, con el objeto de endurecer y aumentar la resistencia del acero. Por lo general, se requiere precalentar este acero antes del templado, para evitar grietas o fracturas al proporcionar un gradiente de temperatura alto, el precalentamiento dependerá del espesor de la pieza.

1.1.1. Aceros inoxidables serie AISI 400

En esta serie se encuentran los aceros inoxidables martensíticos AISI 420, que son aceros con alto contenido de carbono, lo que les permite alcanzar durezas de hasta 500 HB y una mayor resistencia al desgaste, además presenta resistencia a la corrosión por agua y ciertos químicos. Es un acero magnético, que presenta una alta capacidad para ser maquinado, pero debido a su alto contenido de carbono es de baja soldabilidad. Se utiliza para fabricar instrumentos quirúrgicos y dentales, hojas de cuchillos, moldes para vidrio y plástico, herramientas, entre otras. Su composición química se presenta en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1. Composición química de los aceros inoxidables martensíticos AISI 420.

Elemento	Símbolo	Porcentaje (%)	Elemento	Símbolo	Porcentaje (%)
Carbono	C	0,250	Azufre	S	0,027
Silicio	Si	0,573	Cobre	Cu	0,004
Manganeso	Mn	0,336	Aluminio	Al	0,006
Cromo	Cr	12,25	Cobalto	Co	0,005
Molibdeno	Mo	0,005	Titanio	Ti	0,001
Níquel	Ni	0,092	Vanadio	V	0,029
Fósforo	P	0,073	Hierro	Fe	86,240

(Fuente: Acuña & Lozada, 2013)

1.1.2. Microestructura del acero AISI 420

El carbono en los aceros inoxidables martensíticos se encuentra en una concentración tal que permite la formación de austenita a altas temperaturas, la cual durante el enfriamiento o solidificación se transforma en martensita. En los aceros AISI 420 la estructura cristalina martensítica, es una fase muy dura con una solución sólida sobresaturada de carbono en hierro ferrítico. Por lo general, todos los aceros inoxidables martensíticos pueden ser endurecibles por tratamiento térmico de temple, lo que aumenta la resistencia al desgaste y a la corrosión. Sin embargo, debido al alto contenido de cromo pueden ser enfriados en aire desde temperaturas sobre los 815 °C, en cambio otros son enfriados en aceite o agua, debido a su bajo contenido de carbono.

Luego del temple, se administra un tratamiento de revenido a baja temperatura (entre 150 °C y 400 °C) para aliviar las tensiones. El revenido se aplica a aceros con bajos contenidos de carbono en un rango de 550 °C a 750 °C, durante 1 a 4 horas. Se debe evitar el calentamiento entre 450 °C y 600 °C, pues ello afecta la tenacidad y la resistencia a la corrosión. Para una completa recuperación de las propiedades, el tratamiento de recocido se hace en el intervalo de 725 °C a 915 °C. (Nunura & Lecaros, 2015).

En la Figura 1.1 se muestra la microestructura que presenta el acero inoxidable martensítico AISI 420 antes de un tratamiento térmico de temple, donde se aprecia los granos de ferrita y carburos de cromo que se forman durante el proceso de solidificación. Estos carburos, en caso de que se encuentren alineados, es probable que la tenacidad se vea afectada, ya que favorecen el crecimiento de grietas y la posterior ruptura del material, por tal razón es ideal que se encuentren esferoidizados y distribuidos de manera dispersa.

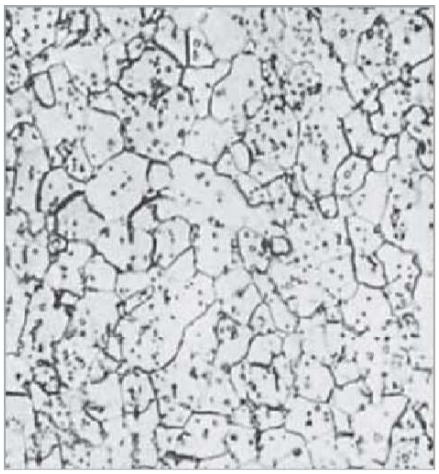


Figura 1.1. Microestructura del acero inoxidable martensítico AISI 420, con granos de ferrita y carburos de cromo dispersos en la matriz. 500x.
(Fuente: Nunura & Lecaros, 2015)

1.1.3. Diagrama Trasformación-Tiempo-Temperatura del acero AISI 420

Los diagramas de transformación-tiempo-temperatura (diagramas TTT) o mejor conocidos como diagramas de transformación isotérmica (diagramas IT), son gráficas que permiten predecir la microestructura y el tratamiento térmico a utilizar en los aceros, para obtener las propiedades mecánicas deseadas. Además, se puede analizar la evolución de la transformación de la austenita a lo largo del tiempo, manteniendo una temperatura constante. En consecuencia, los diagramas TTT expresan en una gráfica de tiempo-temperatura, el tiempo necesario para que inicie y finalice la transformación de la austenita, cuando se mantienen a una determinada temperatura. Por lo general, los diagramas TTT de los aceros tienen forma de curvas, donde la nariz de la curva representa la temperatura a la que la reacción ocurre con mayor rapidez.

En la Figura 1.2 se muestra el diagrama TTT del acero martensítico AISI 420, de donde la presencia de cromo desplaza la curva hacia la derecha, favoreciendo la templabilidad y la formación de martensita con tasas de enfriamiento lentas, como por ejemplo al aire libre, sin producir microfisuras, aumento de tensiones residuales, ni alteraciones dimensionales. (Nunura & Lecaros, 2015). Cabe mencionar que la precipitación de la martensita ocurrirá cuando se cumpla que, la temperatura de inicio de formación de la martensita M_s 300 °C llegue a la temperatura del final de la formación de la martensita M_f 205 °C; por ende, para evitar la precipitación de la fase martensítica, no debe acontecer esta condición.

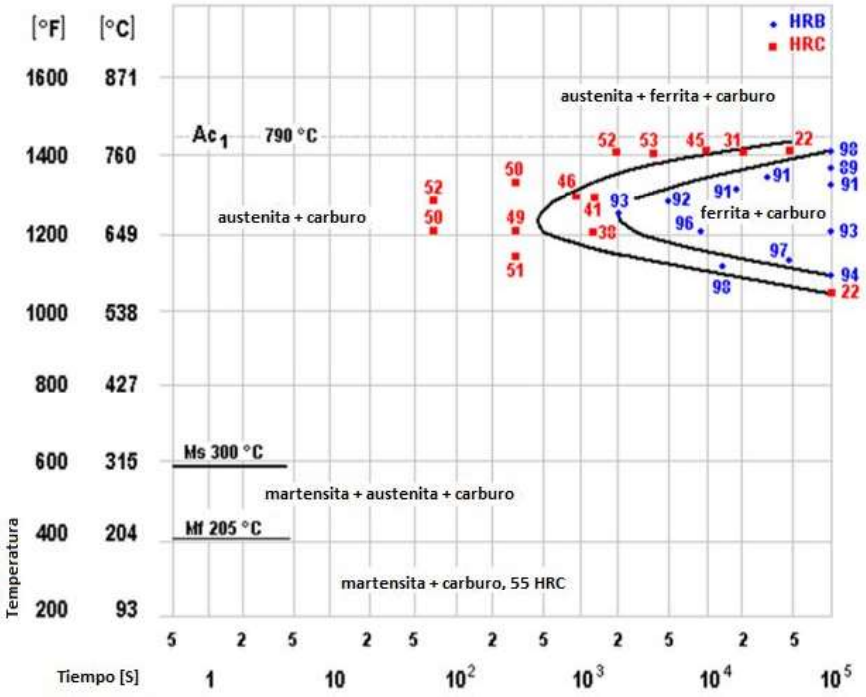


Figura 1.2. Diagrama TTT AISI 420.

(Fuente: Lucefin Group, 2018)

1.1.4. Maquinabilidad del acero inoxidable martensítico AISI 420

La maquinabilidad se define como la facilidad relativa con la que un material puede maquinarse usando las herramientas y los parámetros de corte adecuados. Aunque la maquinabilidad depende del material, existen criterios que resultan del buen desempeño del maquinado, como son el acabado superficial y la integridad superficial, que dependen de la vida útil de la herramienta, la fuerza y potencia requeridas.

Las propiedades mecánicas más importantes que influyen en la maquinabilidad son la dureza, la resistencia mecánica y la resistencia a la corrosión, debido a que si se incrementa la dureza, aumenta la resistencia al desgaste abrasivo, disminuyendo así la vida útil de la herramienta de corte, por otra parte al aumentar la resistencia del material, las fuerzas de corte, la energía específica y la temperatura de corte se incrementan, por tal razón se dificulta maquinar el material; además que al modificar la superficie de fábrica de un materia en un bruto disminuye su resistencia a la corrosión.

La composición química de un acero inoxidable tiene un efecto importante sobre el material de la herramienta de corte y la maquinabilidad, por ejemplo, el cromo, el molibdeno y el tungsteno forman carburos en el acero lo cual reduce la maquinabilidad, al igual que el manganeso y el níquel que añaden resistencia y tenacidad al acero, pero reducen la maquinabilidad. Existen ciertos elementos que se añaden para mejorar la maquinabilidad como el plomo, azufre y fósforo, los cuales actúan como lubricantes sólidos, elevadores de esfuerzo en la zona de maquinado y refuerzos de la ferrita, respectivamente, para proporcionar un mejor acabado superficial.

Los aceros martensíticos de la serie 400 son abrasivos, tienden a formar bordes acumulados y requieren herramientas de corte con alta resistencia en caliente y resistencia a la craterización (movimiento de átomos a través de la interfaz herramienta-viruta). (Kalpakjian & Schmid, 2008).

Los aceros inoxidables martensíticos AISI 420 tienen un índice de maquinabilidad del 45%, valor obtenido en un ensayo de maquinabilidad al compararlo con un acero B1112 como material base. (Irestal Group, 2019).

1.1.5. Procesos de corrosión en el acero AISI 420

La corrosión se define como el deterioro de un material, que por lo general es un metal, disminuyendo sus propiedades debido a una reacción con el medio ambiente. La razón por la cual los metales se corroen es porque tienden a regresar a su estado natural. Esto es

debido a que durante el proceso de refinación del acero, la energía que se imparte durante este proceso, se encuentra disponible como energía libre o mejor conocida como energía libre de Gibbs ($-\Delta G°$), la cual impulsa la reacción de corrosión (reacción electroquímica) cuando el acero se coloca en un medio electrolítico. Un electrolito es un líquido que contiene iones y está en la capacidad de conducir una corriente eléctrica a través del intercambio de electrones.

El proceso de corrosión en su mayoría se produce por reacciones electroquímicas, conocidas como reacciones de oxidación/reducción, las cuales ocurren mediante el intercambio de electrones y se producen en sitios específicos, como son los ánodos para la oxidación y cátodos para la reducción. Es decir, que los electrones se transfieren del ánodo y viajan a través de un camino metálico hasta el cátodo (debido la diferencia de energía entre los mismos), donde se consumen en una reacción de reducción, mientras que en el ánodo se tiene una reacción de oxidación. El electrolito en este caso cierra el circuito eléctrico, proporciona los reactivos necesarios para la reacción y permite el flujo de iones.

La presencia de zonas anódicas y catódicas en la superficie de un acero inoxidable se debe a distintos factores como: la estructura cristalina, la composición química, medio ambiente, pH (medida de acidez o alcalinidad de una solución acuosa), la temperatura, la cantidad de oxígeno, entre otros.

El acero inoxidable martensítico AISI 420 tiene como característica la alta resistencia a la corrosión por su alto contenido de cromo, siendo este el elemento que da paso a la formación espontánea de una película pasiva de óxido de cromo en la superficie, dicha película se restaura en presencia del oxígeno. El proceso de rectificado o el decapado pueden llegar a destruir la película pasiva en las superficies de los aceros inoxidables, la norma ASTM G48 recomienda someter a los aceros inoxidables a una pasividad al aire libre por 24 horas luego de estos procesos, para minimizar la destrucción y restaurar la película pasiva.

1.1.5.1. Tipos de corrosión

Los diferentes tipos de corrosión que se pueden presentar en un metal, dependen en su mayoría del tipo de ambiente corrosivo: ambientes atmosféricos, ambientes de suelo y ambientes de alta temperatura, por lo cual se puede clasificar la corrosión, de forma general, en las siguientes categorías:

a) Corrosión generalizada

b) Corrosión localizada

Corrosión por picaduras

Corrosión por fisuras

Corrosión filiforme

c) Agrietamiento ambiental

Agrietamiento por corrosión bajo tensión (SCC, por sus siglas en inglés), que puede ser transgranular o intergranular.

Agrietamiento inducido por hidrógeno.

Agrietamiento por sulfuros bajo esfuerzos.

Fragilización por metales líquidos.

Fatiga por corrosión.

d) Corrosión asistida por el flujo

Corrosión-erosión

Corrosión por impacto

Cavitación

e) Corrosión galvánica

f) Corrosión por fricción

g) Oxidación/corrosión por alta temperatura.

En la Figura 1.3 se muestran algunos tipos de corrosión, que pueden encontrarse presentes en un metal.

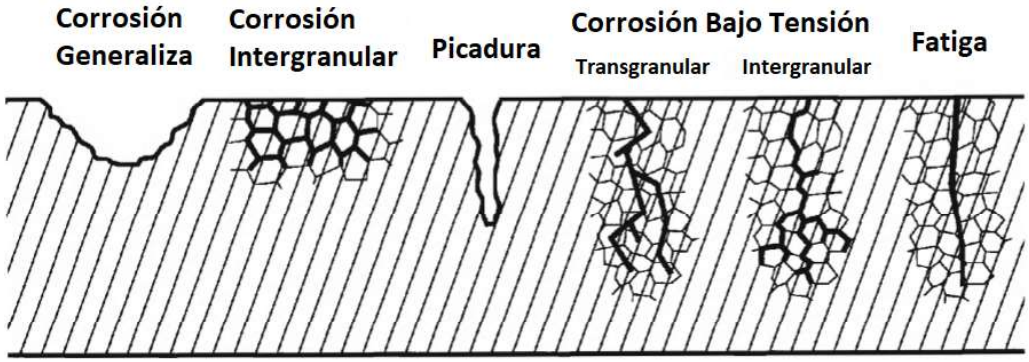


Figura 1.3. Vista esquemática de cinco modos intrínsecos de corrosión.
(Fuente: Uhlig & Revie, 2011)

1.1.5.1.1. Corrosión por picadura

La corrosión por picadura es un tipo de corrosión localizada que ocurre en sitios discretos o regiones específicas sobre la superficie de un metal. La picadura es un ataque corrosivo profundo y diminuto, que se inicia en un metal cuando se produce la ruptura de la película superficial protectora o recubrimientos; en el caso de los aceros inoxidables ocurre cuando

se destruye la película pasiva de óxido de cromo (en los puntos más débiles) y revela libremente la superficie del acero.

La producción de picaduras ocurre con frecuencia cuando se instala una celda de concentración (diferencia de potencial creado por una diferencia de ambiente entre diferentes áreas del mismo metal) entre el interior de la picadura y la superficie externa. En consecuencia, se establece un ánodo dentro de la picadura y un cátodo en las superficies circundantes, donde la corriente eléctrica resultante del diferencial de potencial circula a través del agua o por la humedad del acero (Figura 1.4).

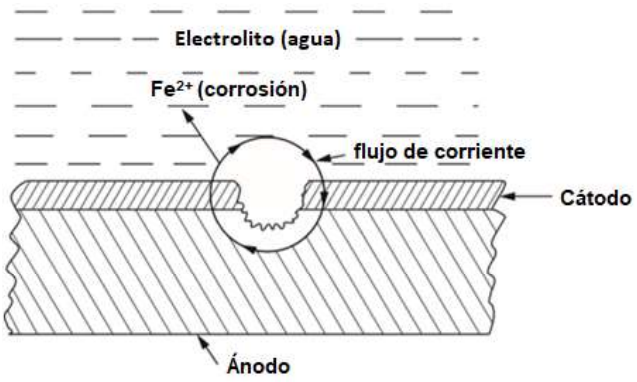


Figura 1.4. Producción de corrosión por picadura.
(Fuente: Schweitzer, 2010)

1.1.5.1.2. Morfología de la corrosión por picaduras

Existen diferentes formas de picaduras, las cuales pueden variar en profundidad, tamaño y orientación, como se presenta en la Figura 1.5.

Un examen visual de la superficie afectada por la corrosión por picadura pocas veces proporciona información de la corrosión en la subsuperficie, por lo que a menudo es necesario analizar una sección transversal de la picadura para observar su forma real y determinar su profundidad.

El desempeño en el área de corrosión por picaduras por lo general se mide mediante la regla de oro, la cual es el número equivalente de resistencia a la picadura (PREN, por sus siglas en inglés) que indica cualitativamente la resistencia a las picaduras en un acero inoxidable. El PREN se basa en una fórmula empírica, definida por el contenido de cromo (Cr), molibdeno (Mo), wolframio (W) y nitrógeno (N), como se indica en la ecuación 1.1:

$$PREN = \%Cr + 3{,}3(\%Mo + 0{,}5\,W) + x(\%N) \qquad (Ec.\ 1.1.)$$

Número equivalente de resistencia la picadura.
(Fuente: Roberge, 2000)

Donde, *x* puede ser 16 para aceros inoxidables dúplex y 30 para aleaciones austeníticas.

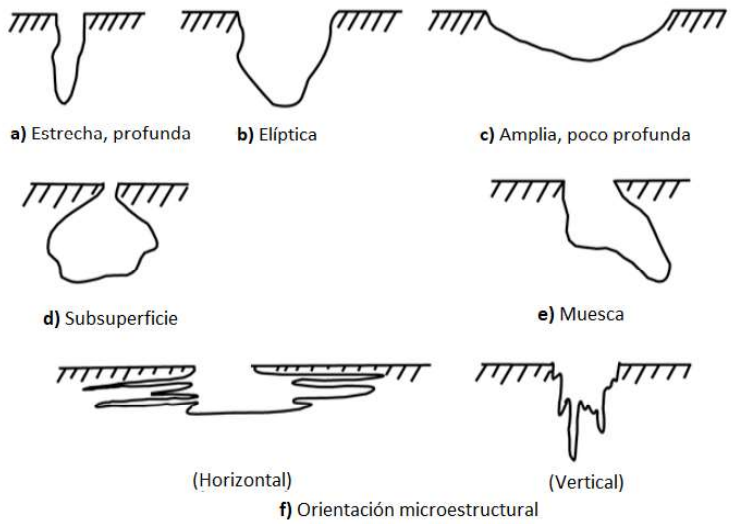


Figura 1.5. Morfología de la picadura.
(Fuente: Norma ASTM G-46, 2018)

Un valor de PREN alto indica por lo general una mayor resistencia a la corrosión, pero no existe un PREN que indique una resistencia completa a la corrosión en cualquier ambiente.

1.1.5.1.3. Medición de la profundidad de la picadura

Es importante poder determinar el tamaño y la profundidad de las picaduras, por lo valioso que representa la aplicación de un acero inoxidable martensítico en un servicio donde es necesario predecir la vida restante de este material. Por lo tanto, existen varios métodos para la medición de la profundidad de las picaduras, una de estas es la utilización de un microscopio o método de microscopía calibrada.

En la medición de picaduras por medio de un microscopio calibrado (rango de aumento de 50 a 500x con una perilla calibrada de enfoque fino, 1 división = 0,001 mm), se ubica primero una sola picadura en la superficie del acero y se centra debajo de la lente del objetivo del microscopio a baja magnificación (por ejemplo, 50x). Luego, se aumenta la ampliación de la lente del microscopio hasta que el área de la picadura cubra la mayor parte del área vista, seguidamente se enfoca la superficie que circunda a la picadura utilizando primero los botones de enfoque grueso y luego el del microscopio. Se graba la lectura inicial de la perilla de enfoque fino y se vuelva a centrar en el fondo de la picadura con la perilla de enfoque fino, para finalmente grabar la lectura final. La diferencia entre las lecturas inicial y final en la perilla de enfoque fino es la profundidad de la picadura.
Si se desea obtener mediciones adicionales o hasta que se obtenga una duplicación satisfactoria se debe repetir los pasos anteriores.

1.2. Procesos de maquinado

Los procesos de maquinado son un grupo de operaciones que consisten en dar forma geométrica, dimensión y el acabado requerido a una pieza de trabajo o pieza en bruto, mediante la remoción del material o arranque de viruta. El desprendimiento de material se produce por una herramienta de corte, la cual trabaja en conjunto con máquinas potentes y robustas; de tal manera se puede llegar a obtener piezas mecánicas de alta precisión y con superficies que presentan un buen acabado.

Los procesos de maquinado se llevan a cabo mediante el uso de máquinas herramientas automáticas, semiautomáticas o manuales, las cuales permiten poner en marcha los diferentes procesos de remoción de material. En la Figura 1.6 se muestran los procesos de remoción de material.

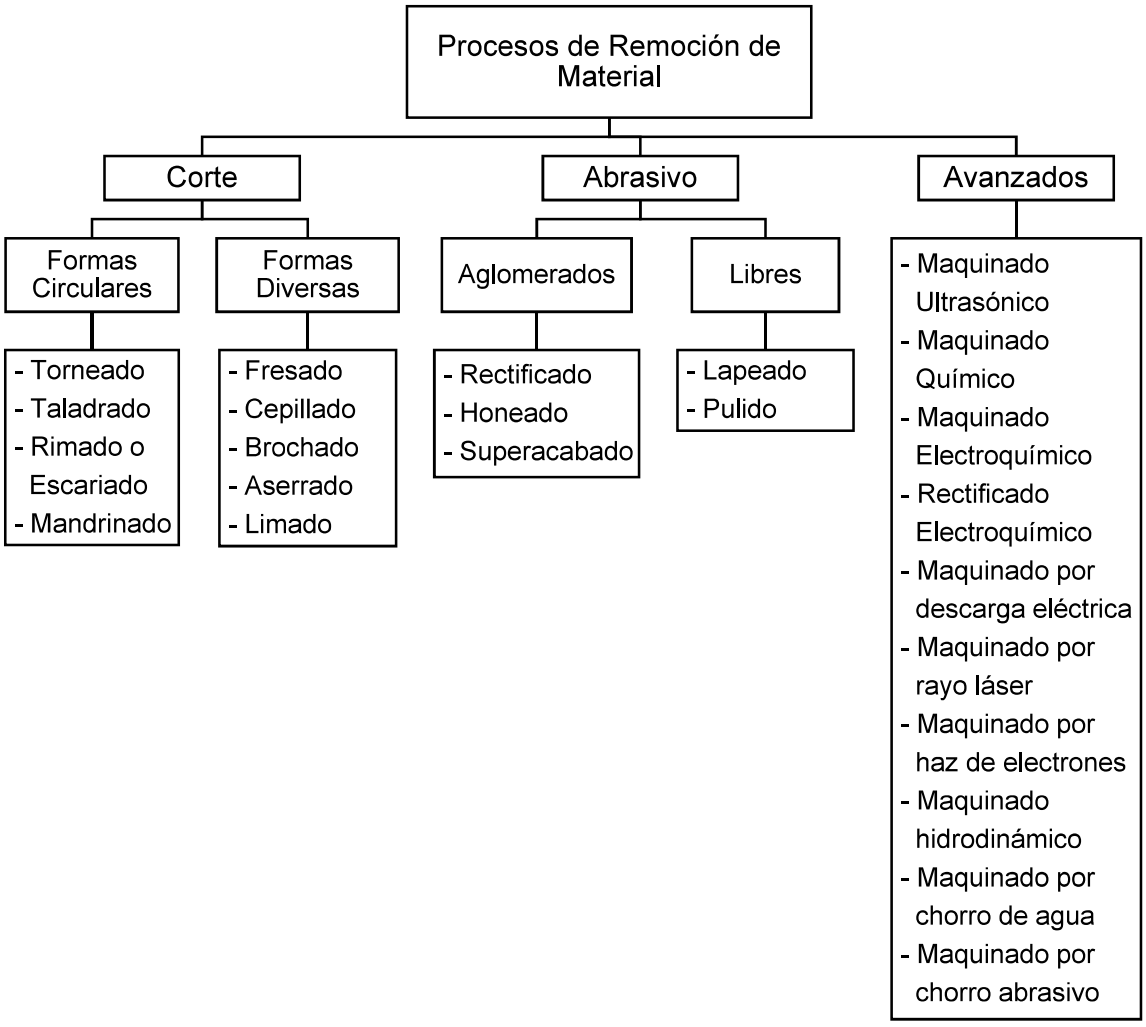


Figura 1.6. Clasificación de los procesos de remoción de material.
(Fuente: Kalpakjian & Schmid, 2002)

1.2.1. Procesos de remoción de material

Son operaciones con desprendimiento de material que, por medio del maquinado, se obtiene una amplia variedad de formas. En la Figura 1.6 se muestran los procesos de remoción de material que pueden ser: por corte, abrasivos y avanzados.

1.2.1.1. Procesos abrasivos

Operaciones de maquinado por arranque de viruta que consisten en el desprendimiento de partículas de material o desgaste forzado, mediante una herramienta de corte abrasiva. Un abrasivo es una pequeña partícula dura con aristas afiladas, de forma irregular, que se caracteriza por proporcionar la precisión dimensional y el acabado superficial requerido. La disposición de los abrasivos en la herramienta de corte puede ser por abrasivos aglomerados (disco o muela) o abrasivos libres (sueltos). Los procesos de remoción de material por abrasivos son: honeado, superacabado, lapeado, pulido y rectificado.

1.3. Rectificado

Es un proceso de maquinado por arranque de viruta, en la que el desprendimiento de las partículas del material se realiza por una herramienta de corte abrasiva aglutinada, denominada como disco o muela de rectificado, la cual posee la forma de un sólido de revolución y conformada por un conglomerado de granos abrasivos, irregulares, de mayor dureza y esparcidas aleatoriamente en la periferia del disco.

El rectificado consiste en una operación de terminado de piezas que requieren tolerancias dimensionales, geométricas y de acabado superficial, las cuales no se pueden conseguir con otros procesos de maquinado. Este proceso se realiza en máquinas herramientas denominadas rectificadoras.

1.3.1. Tipos de rectificado

La clasificación de los diferentes tipos de rectificado se realiza en función de la superficie a rectificar, que puede ser: rectificado de superficies cilíndricas y rectificado de superficies planas.

1.3.1.1. Rectificado de superficies cilíndricas

Las superficies por rectificar pueden ser superficies: cilíndricas exteriores, cilíndricas interiores y cilíndricas sin centros.

1.3.1.1.1. Rectificado cilíndrico de exteriores

En el rectificado cilíndrico de exteriores (Figura 1.7.a) la pieza de trabajo cilíndrica rotatoria se sujeta en sus extremos y se mueve alternativamente de manera lateral para rectificar a

lo largo de la superficie exterior o en penetración. Se pueden fabricar los apoyos del cigüeñal, husillos, pernos y pistas de rodamientos con esta operación de rectificado.

1.3.1.1.2. Rectificado cilíndrico de interiores

En el rectificado cilíndrico de superficies interiores (Figura 1.7.b) se emplea un pequeño disco para rectificar el diámetro interno de la pieza de trabajo, como bujes o pistas para rodamientos.

1.3.1.1.3. Rectificado cilíndrico sin centros

En el rectificado de superficies cilíndricas sin centros (Figura 1.7.c) la pieza de trabajo no se sostiene entre centros ni platos, sino por una cuchilla, de ahí el concepto “sin centros”. Las partes fabricadas con esta operación son: los rodamientos de rodillos, válvulas para motores, cigüeñales, entre otros.

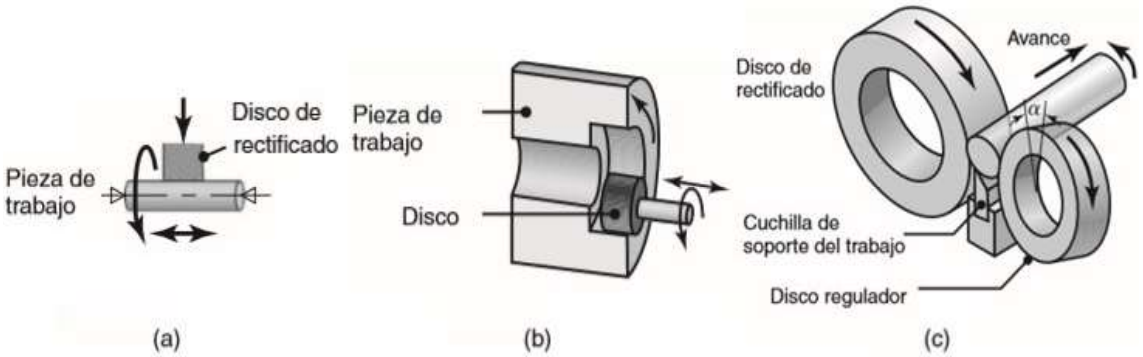


Figura 1.7. Rectificado de superficies cilíndricas: a) exteriores, b) interiores, c) sin centros. (Fuente: Kalpakjian & Schmid, 2008)

1.3.1.2. Rectificado de superficies planas

Es una de las operaciones más comunes y por lo general comprende el rectificado tangencial y el rectificado frontal. Las piezas de trabajo se pueden asegurar por una mesa de trabajo magnética, pero si el material no es magnético, se sujetan con prensas de banco u otro tipo de soporte.

1.3.1.2.1. Rectificado tangencial

El rectificado tangencial se produce con la superficie abrasiva de la periferia de la muela de rectificado, la cual gira sobre un husillo horizontal. La máquina herramienta denominada rectificadora tangencial (Figura 1.8.b) está conformada por una bancada, sobre la que se monta la mesa de trabajo magnética, la cual realiza un movimiento rectilíneo y alternativo de forma longitudinal (movimiento de avance) y un movimiento de forma transversal para abarcar el ancho de la pieza de trabajo.

Además, posee una columna sobre la que se monta el cabezal portaherramientas y un motor de gran potencia, que imparte el movimiento de rotación del disco de rectificado o velocidad de corte, y a la vez permite fijar la profundidad de pasada.

Dependiendo de la forma constructiva de la rectificadora tangencial, el movimiento de avance lo puede ejecutar la pieza de trabajo o en otras ocasiones el disco de rectificado. Es importante que luego de haber realizado la operación de rectificado tangencial, las piezas que se han sujetado con la mesa magnética se pasen por un desimantador para eliminar el remanente magnético.

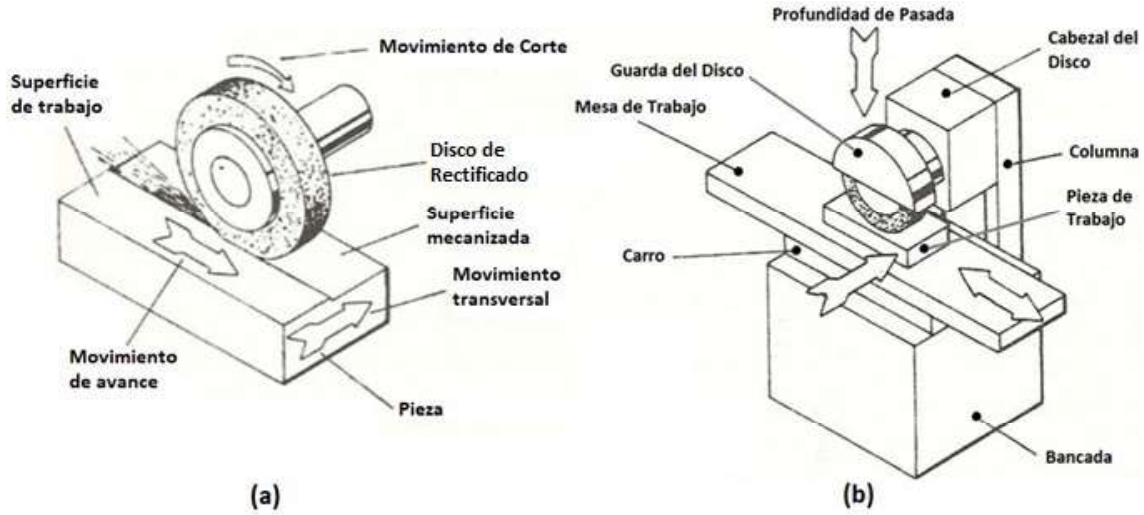


Figura 1.8. a) Proceso de rectificado tangencial, b) Esquema de una rectificadora tangencial. (Fuente: Boothroyd, 1978)

1.3.1.2.2. Rectificado frontal

El rectificado frontal se caracteriza porque la parte que actúa sobre la pieza de trabajo es la superficie abrasiva frontal de la muela de rectificado, razón por la cual utiliza una muela distinta que la rectificadora tangencial (puede ser una muela de copa recta), aumentando de esta forma el área de contacto entre muela y pieza, y a su vez la capacidad de desprendimiento de material.

La máquina herramienta que permite esta operación se designa rectificadora frontal (Figura 1.9.b), que a diferencia de la rectificadora tangencial emplea un husillo vertical para la rotación de la muela de rectificado.

El resto de la configuración de la máquina herramienta y los movimientos de trabajo son similares a la rectificadora tangencial.

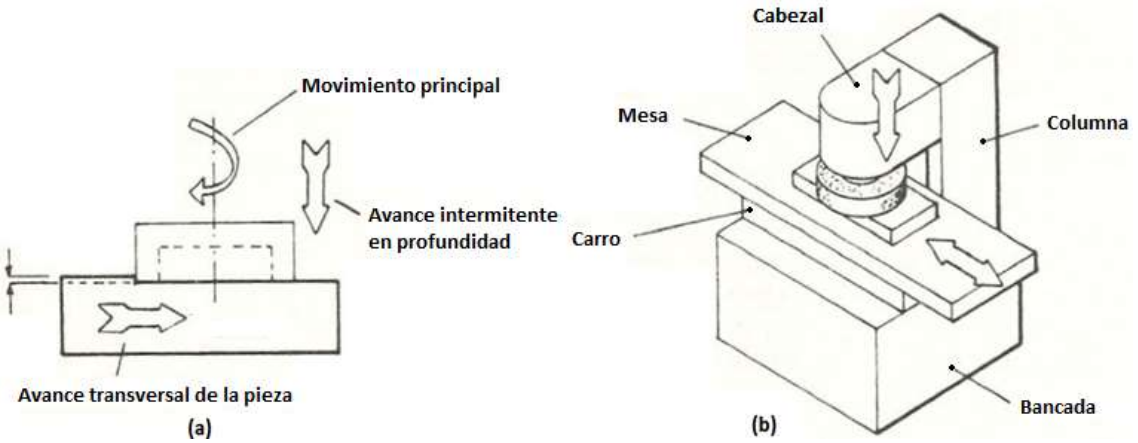


Figura 1.9. a) Proceso de rectificado frontal, b) Esquema de una rectificadora frontal.
(Fuente: Boothroyd, 1978)

1.3.2. Parámetros del rectificado

Los parámetros del rectificado son las condiciones de corte en las que se realiza el proceso, por ello se analiza a continuación las variables de corte principales en el rectificado tangencial, como se presenta en la Figura 1.10.

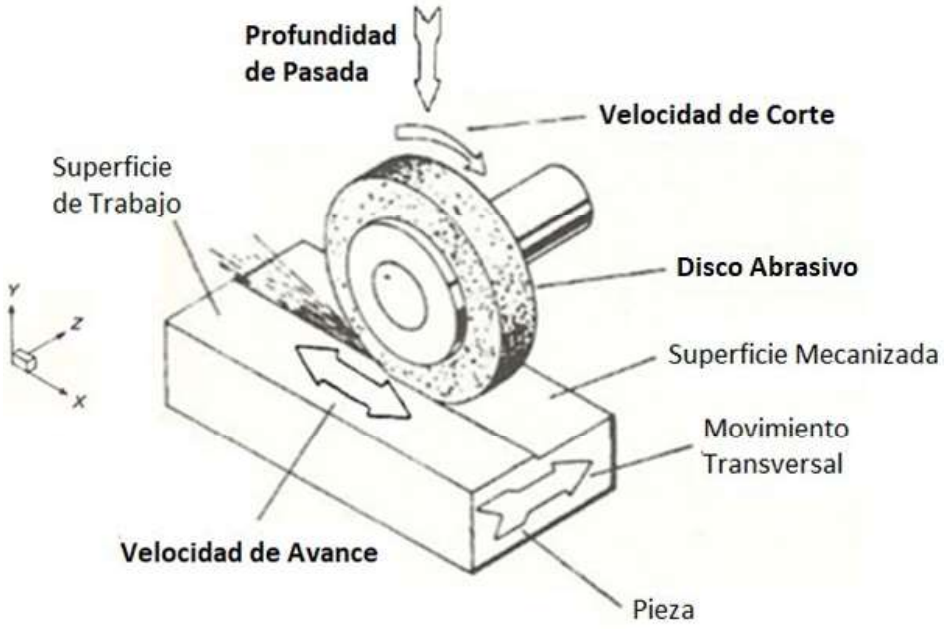


Figura 1.10. Esquema de los parámetros del rectificado tangencial.
(Fuente: Boothroyd, 1978)

Donde:

- Velocidad de corte: es el movimiento rotatorio que realiza el disco de rectificado, por lo general es una velocidad de altas revoluciones por minuto que puede ser constante o variable, esto dependerá de la configuración de la máquina herramienta.

- Velocidad de avance: es el movimiento rectilíneo y alternativo que realiza la pieza, se selecciona en función del ancho del disco de rectificado y la calidad del acabado que se desea obtener, por ejemplo, un buen acabado requiere de una menor velocidad de avance.
- Profundidad de pasada: es el movimiento vertical que realiza la muela de rectificado y puede variar desde un rectificado grueso hasta un rectificado fino si la profundidad de pasada es mayor o menor, respectivamente.
- Disco abrasivo: es la herramienta de corte que puede variar conforme al tamaño del grano, puede ser: grano fino, medio o grueso.

1.3.3. Herramienta de corte abrasiva

El proceso de rectificado emplea una herramienta de corte abrasiva aglutinada conocida como disco o muela de rectificado, con forma de un sólido de revolución. El disco de rectificado posee una gran cantidad de granos abrasivos que se encuentran unidos entre sí por un material aglutinante que actúa como soporte entre los granos. Una característica fundamental en el disco de rectificado y en todos los abrasivos aglutinados es la porosidad, la cual proporciona holgura a las virutas que se generan en el proceso de rectificado y a la vez ayuda en el enfriamiento. Sin la presencia de la porosidad en el disco de rectificado las virutas interferirían en el proceso y no existiría la formación de virutas. En la Figura 1.11 se presenta un disco de rectificado con su estructura, patrones de desgaste y fractura.

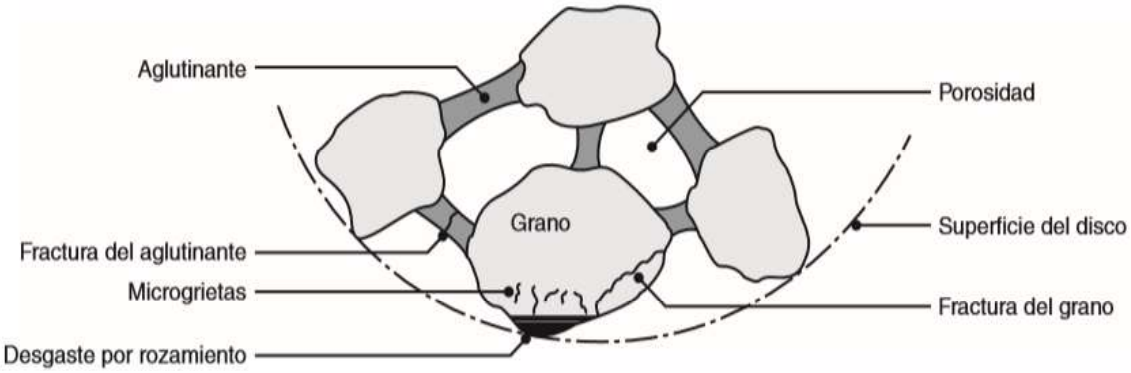


Figura 1.11. Esquema del modelo físico de un disco o muela de rectificado.
(Fuente: Kalpakjian & Schmid, 2008)

El disco de rectificado se caracteriza por un sistema estandarizado de letras y números que especifican: el tipo de material abrasivo, el tamaño de grano abrasivo o granulometría, grado de dureza, estructura o porosidad y el material de unión o aglutinante, componentes que pueden variar de acuerdo con la especificación utilizada por el fabricante.

1.3.3.1. Material abrasivo

Son granos abrasivos irregulares con aristas afiladas y de mayor dureza que el material a rectificar, esparcidos aleatoriamente en la periferia del disco. Por lo general, los granos abrasivos son de un material convencional como el óxido de aluminio (Al_2O_3) o carburo de silicio (SiC), aunque en algunos casos particulares son de un material superabrasivo como el nitruro de boro cúbico (CBN, por sus siglas en inglés) o diamante.

Una propiedad importante del material abrasivo es la friabilidad que se define como la capacidad para fracturar el grano abrasivo en partes más pequeñas. Esta propiedad proporciona al grano abrasivo la cualidad de autoafilado, esencial para mantener el filo de corte durante el proceso de rectificado. Una alta friabilidad del material abrasivo indica una baja resistencia a la fractura del grano abrasivo. El óxido de aluminio tiene menos friabilidad que el carburo de silicio, lo que indica una menor tendencia a fragmentar el grano abrasivo. Por lo general, se recomienda la selección del tipo de abrasivo con respecto al tipo de material a rectificar:

- Óxido de aluminio: aceros al carbono, aleaciones ferrosas, aceros inoxidables.
- Carburo de silicio: metales no ferrosos, fundiciones, carburos, mármol.
- Nitruro de boro cúbico: aceros y fundiciones con dureza superior a 50 HRC y aleaciones de alta temperatura.
- Diamante: cerámicos, carburos cementados y algunos aceros endurecidos.

1.3.3.2. Tamaño del grano abrasivo

El tamaño de grano abrasivo se puede identificar por el número de grano, por lo que cuanto más pequeño es el tamaño del grano, mayor es el número asignado, por ejemplo, para un tamaño de grano de 10 se lo considera muy grueso, 24 grueso, 46 medio, 60 fino y 220 muy fino. Además, el tamaño de grano se encuentra relacionado con el acabado superficial y la precisión dimensional, es decir, que un tamaño de grano grande se utiliza para una operación de desbaste con un acabo superficial no deseable y, un tamaño de grano pequeño se utiliza para una operación de acabado con una buena precisión dimensional y acabado superficial.

1.3.3.3. Grado de dureza

El grado de dureza se refiere a la medida de resistencia de unión entre el grano abrasivo y el material aglutinante, como consecuencia de las fuerzas presentes en el proceso de rectificado. Por lo tanto, un grado de dureza mayor indica una unión más resistente o una cantidad mayor de material aglutinante entre los granos.

1.3.3.4. Estructura o porosidad

La estructura hace referencia a la medida de su porosidad, es decir, el espacio que existe entre los granos abrasivos, dicha medida puede ser designada de acuerdo con el grado de apertura que puede variar desde una estructura cerrada hasta una estructura abierta.

1.3.3.5. Material de unión o aglutinante

El material de unión o mejor conocido como aglutinante es el encargado de mantener juntos a todos los granos abrasivos en una sola matriz, además, permite establecer la forma de un sólido de revolución. Las propiedades que brinda el material aglutinante son la resistencia, tenacidad y dureza, como de igual manera evita la pérdida prematura del grano y disipa el calor generado durante el proceso de rectificado.

Existen diversos tipos de aglutinantes, los más comunes son:

- Aglutinantes vitrificados: conformados principalmente por arcilla cocida con materiales cerámicos; son fuertes, rígidos, resistentes a elevadas temperaturas y casi no se ven afectados con los fluidos de enfriamiento utilizados en el rectificado, por tal razón es el material de unión más utilizado.
- Aglutinantes resinoides: son materiales con diferentes resinas termoestables con una amplia variedad de composiciones y propiedades, debido a que el aglutinante es un compuesto orgánico. Este se utiliza para rectificado grueso y operaciones de corte.
- Aglutinantes metálicos: consisten en un disco metálico con un núcleo que puede ser de aluminio, bronce, acero o un cerámico, con granos abrasivos de diamante o nitruro de boro cúbico que se aglutinan en la periferia del disco; la unión al metal se efectúa bajo alta presión y temperatura.
- Aglutinantes de hule: es el material de unión más flexible que se utiliza en los discos de rectificado o discos delgados para operaciones de corte.
- Aglutinantes de silicato: consiste en un material de silicato de sodio (Na_2SO_3), sus aplicaciones se limitan a operaciones donde se debe minimizar la generación de calor.

1.3.3.6. Designación normalizada

En la Figura 1.12 se presenta la designación normalizada para identificar los diferentes tipos de discos abrasivos convencionales y sus características, de acuerdo con la Norma ANSI B74.13.

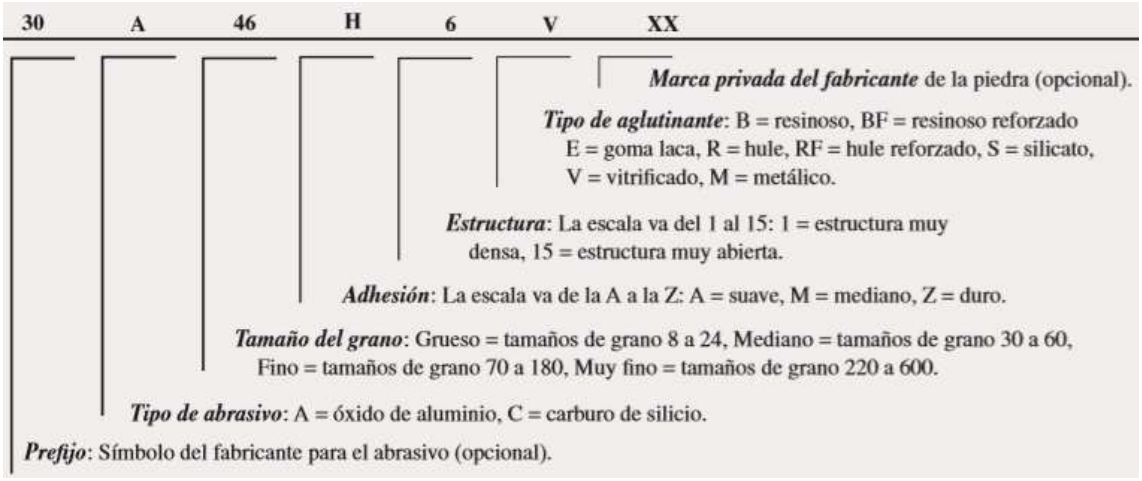


Figura 1.12. Sistema de identificación de los discos abrasivos convencionales.

(Fuente: Norma ANSI B74.13, 1977)

Por ejemplo, para un disco de rectificado de marca Norton con una designación de A60 R5VS presenta las siguientes características (Figura 1.13):

- Tipo de abrasivo: óxido de aluminio marrón.
- Tamaño de grano: 60 (grano fino).
- Grado de dureza: R (dura).
- Estructura: cerrada.
- Aglutinante: vitrificado.

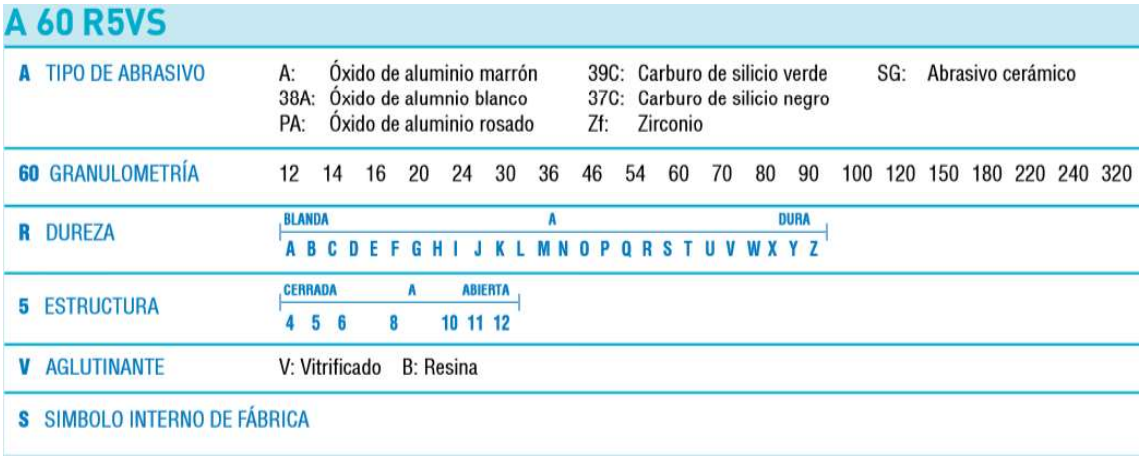


Figura 1.13. Especificación de los discos de rectificado marca Norton.

(Fuente: Norton Company, 2018)

1.3.4. Efectos superficiales del rectificado

Existen ciertos efectos que pueden afectar las propiedades mecánicas y superficiales del material de trabajo cuando se realiza el proceso de rectificado.

1.3.4.1. Temperatura

El aumento de temperatura en el rectificado es un factor que debe considerarse, por lo siguiente:

- Afecta de manera adversa las propiedades superficiales, incluso cambios metalúrgicos.
- Puede generar esfuerzos residuales.
- Dificulta el control de la precisión dimensional, por la presencia de gradientes de temperatura.
- Puede provocar el revenido y ablandamiento de la superficie de la pieza de trabajo.
- Puede hacer que la superficie pierda algo de su dureza.

Las temperaturas pico durante el rectificado pueden alcanzar 1600 °C, aunque las virutas transfieren la gran parte del calor producido, solo se transfiere a la pieza de trabajo una fracción del calor producido en el rectificado. (Kalpakjian & Schmid, 2008).

1.3.4.2. Quemado

El aumento excesivo de temperatura durante el rectificado puede provocar quemaduras en la superficie, con un color azuloso si se trata de un acero, consecuencia de una oxidación por la alta temperatura. Una quemadura en la superficie puede indicar una transformación de fase en las capas de la superficie, por ejemplo, una quemadura metalúrgica se le atribuye el nombre por el formado de martensita en los aceros con mayor contenido de carbono, debido al enfriamiento rápido. En consecuencia, las propiedades superficiales como la ductilidad y tenacidad se reducen.

1.3.4.3. Agrietamiento por calor

El agrietamiento por calor se presenta en la superficie de la pieza de trabajo en forma de grietas y perpendiculares a la dirección del rectificado, como resultado de las altas temperaturas del proceso. Por consiguiente, provoca una superficie de baja resistencia a la fatiga y corrosión, y escasa tenacidad superficial.

1.3.4.4. Esfuerzos residuales

Los esfuerzos residuales se generan por la dilatación y contracción térmica de la superficie, conocido como gradientes de temperatura. Además, la magnitud y tipo de esfuerzos residuales que pueden ser a tensión o compresión, se les atribuye a los tipos de fluidos de rectificado y a los parámetros del rectificado como la profundidad de pasada y la velocidad de corte.

1.4. Acabado superficial

El acabado superficial influye no sólo en la precisión dimensional de las partes maquinadas, sino también en sus propiedades mecánicas y en su desempeño durante el servicio. El término acabado superficial describe las características geométricas de una superficie, en tanto que integridad superficial se refiere a las propiedades del material, como la resistencia a la deformación plástica, resistencia a la fatiga y la resistencia a la corrosión, que se ven fuertemente influidas por la naturaleza de la superficie producida. (Kalpakjian & Schmid, 2008).

El acabado superficial, en sí se refiere solo a las irregularidades geométricas de las superficies de materiales sólidos y su textura superficial se define en términos de rugosidad, ondulación, huellas o marcas y los defectos, como se presenta en la Figura 1.14.

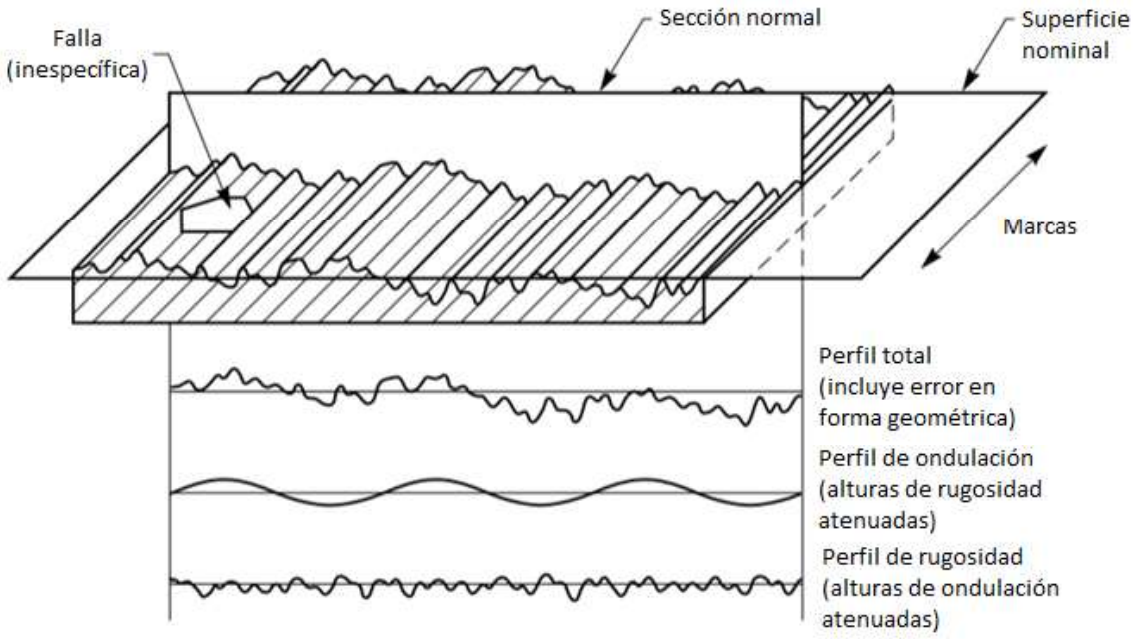


Figura 1.14. Esquema de las características de una superficie según el código ASME B46. (Fuente: ASME B46.1, 2009)

Donde:

- La *rugosidad de la superficie* consiste en finas irregularidades en la textura de la superficie, la cual varía conforme a los diferentes procesos de maquinado, como se presenta en la Figura 1.15.
- La *ondulación* es la componente más espaciada de la textura de la superficie, que puede ser causada por factores como las desviaciones de la máquina o la pieza de trabajo, vibraciones o traqueteo.

- Las *huellas o marcas* son la dirección predominante del patrón de superficie.
- Los *defectos* son interrupciones involuntarias, inesperadas y no deseadas en la topografía de una superficie.

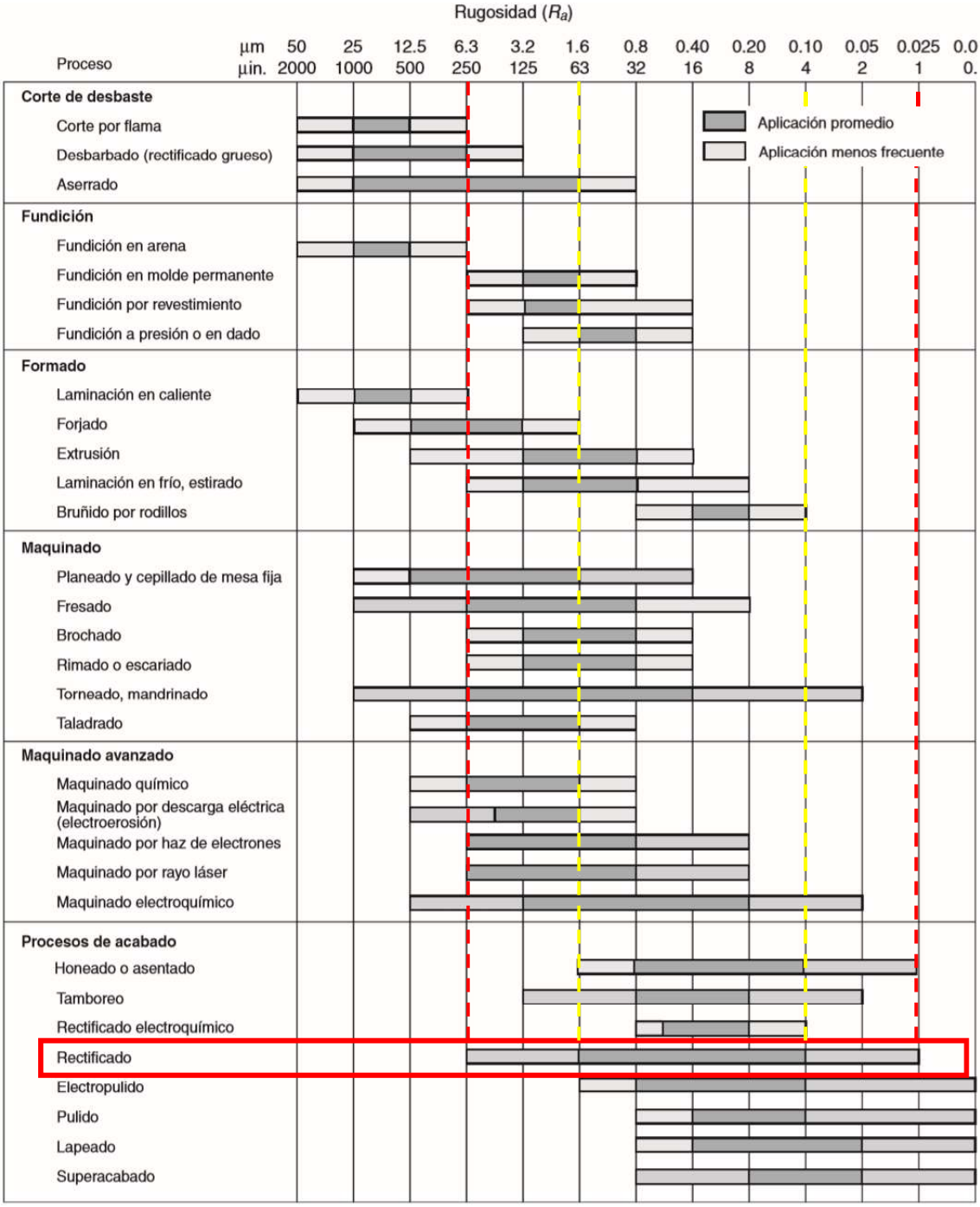


Figura 1.15. Rugosidades de superficies obtenidas en diversos procesos.
(Fuente: ASME B46.1, 2009)

Además, la rugosidad de una superficie maquinada depende de varios factores que se pueden agrupar de la siguiente manera:

- *Factores geométricos*: determinan la geometría de la superficie como el tipo de proceso de maquinado, la geometría de la herramienta de corte y el avance.
- *Factores del material de trabajo*: a) los efectos del borde acumulado en el filo (BUE, por sus siglas en inglés), que ocasiona que las partículas se depositen en la superficie de trabajo recién creada; b) el daño de la superficie por la viruta enredada en la pieza de trabajo; c) el desgarramiento de la superficie de trabajo durante la formación de la viruta (maquinado de materiales dúctiles); d) grietas en la superficie por la formación discontinua de viruta; y e) fricción entre el flanco de la herramienta y la superficie de trabajo generada.
- *Factores de vibración y de la máquina herramienta*: se relacionan con la máquina herramienta, las herramientas utilizadas y con la instalación del proceso, incluido la vibración o traqueteo que pueden generar la máquina o la herramienta de corte.

Por otra parte, los factores que influyen en la integridad superficial son:
- Las temperaturas generadas durante el proceso y los posibles cambios de fase o transformaciones metalúrgicas.
- Los esfuerzos residuales superficiales.
- La deformación plástica severa y endurecimiento por deformación de las superficies maquinadas, desgarrado y agrietamiento.

1.5. Proceso de medición de rugosidad

Las huellas o marcas realizadas por la herramienta de corte sobre la superficie de la pieza de trabajo, dan como resultado una topografía (Figura 1.16), con marcas unidireccionales y cierta ondulación de la superficie, que al amplificar se observa con mayor claridad la ondulación, pero con otras irregularidades impuestas, y al amplificar una vez más se obtiene la rugosidad (*R*), en la cual las partes altas se denominan picos y las bajas valles. Esta forma de examinar el acabo superficial se denomina método de perfil.

El método de perfil es una técnica de medición de escaneo de superficie que produce un gráfico o perfil bidimensional de las irregularidades de la superficie como datos de medición. Existen dos curvas importantes para evaluar la rugosidad por este método: las curvas de perfil sin filtrar (*P*) y las curvas de rugosidad (*R*). Las curvas de perfil sin filtrar muestran un perfil resultante de la intersección de una superficie con un plano perpendicular a la superficie.

En la Figura 1.17.a se presenta el perfil sin filtrar junto con la línea media filtrada (línea media establecida por el filtro de corte seleccionado).

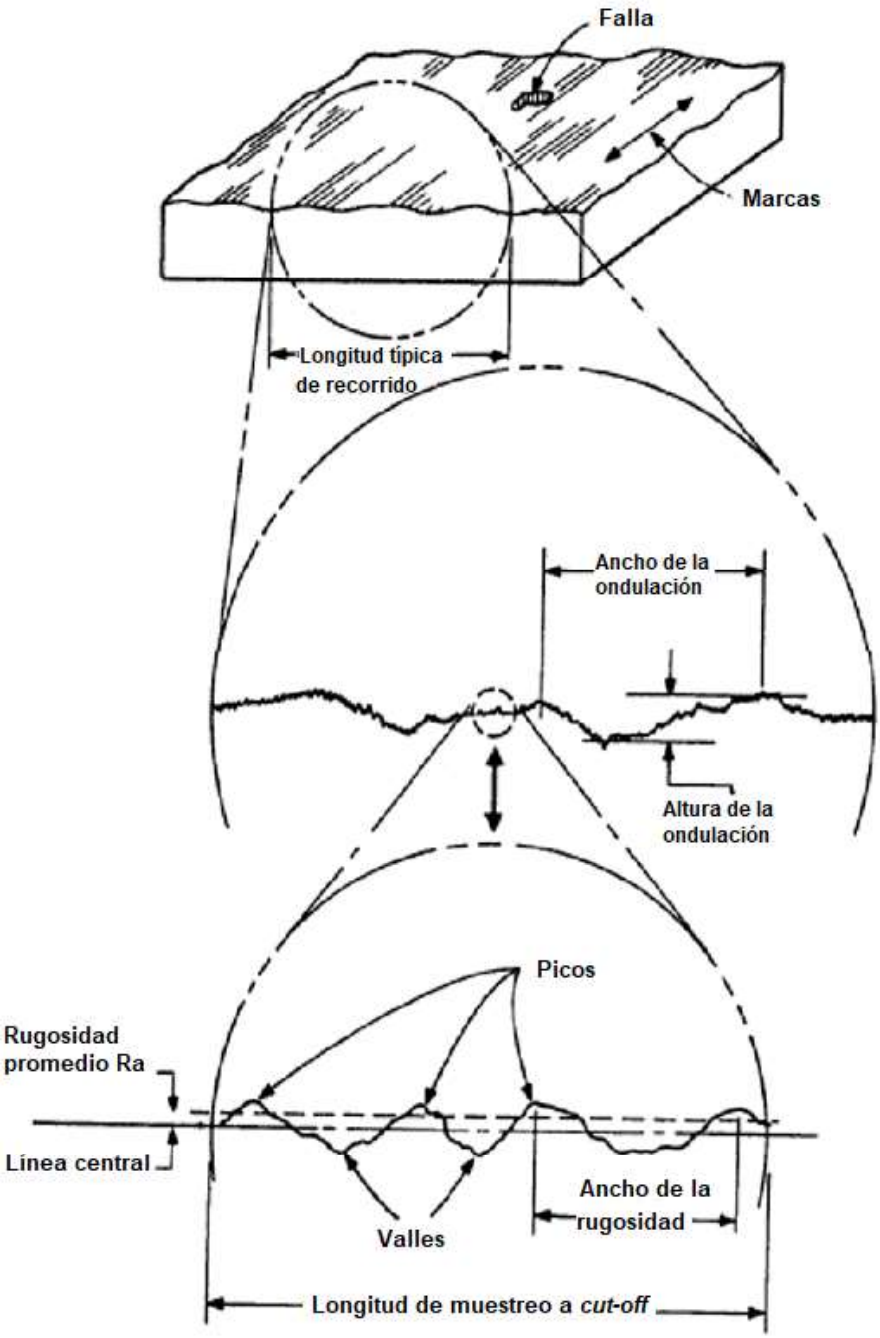


Figura 1.16. Esquema que ilustra los conceptos de rugosidad.
(Fuente: ANSI/ASME B46.1, 1985)

Las curvas de rugosidad (Figura 1.17.b) muestran un perfil que se obtiene de las curvas de perfil sin filtrar, con los componentes de ondulación de baja frecuencia removidos, cuyas longitudes de onda tienen mayor valor que un límite especificado de la longitud de onda denominado valor de cut-off (λ_C).

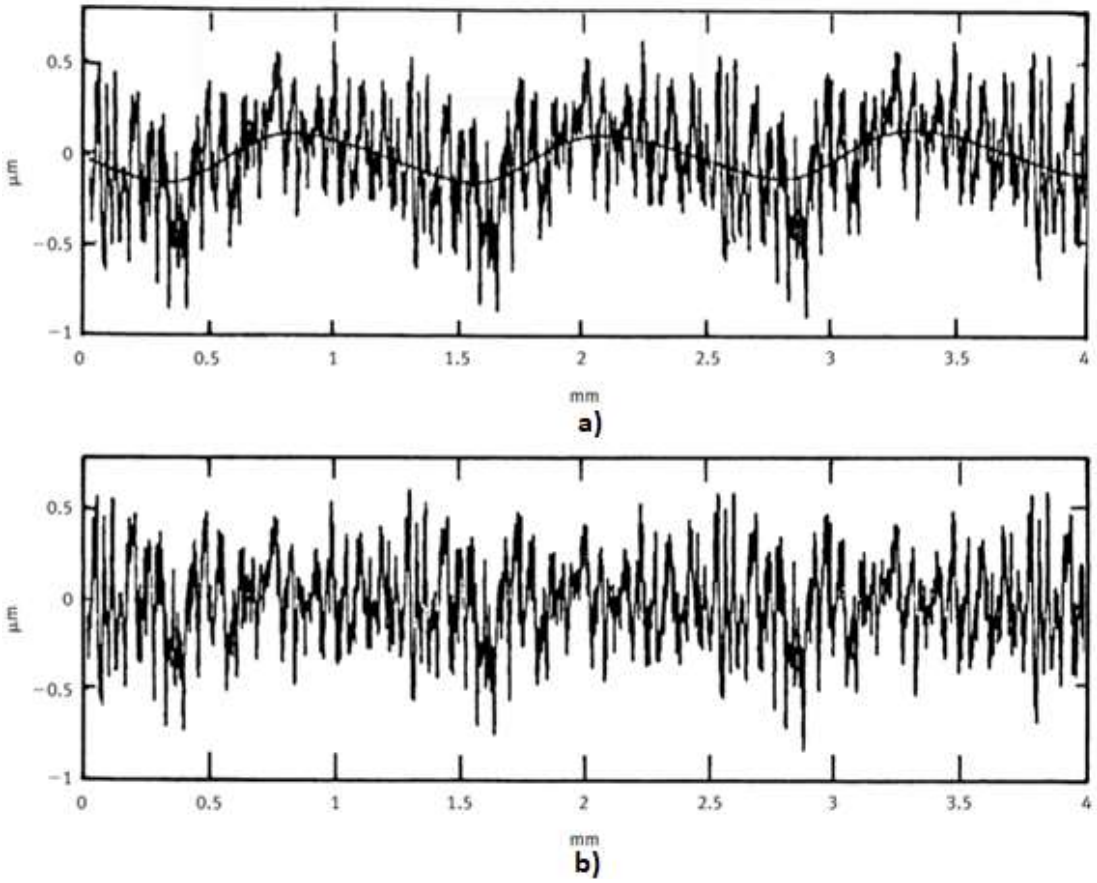


Figura 1.17. a) Perfil sin filtrar y línea media filtrada, b) Perfil de rugosidad.
(Fuente: ASME B46.1, 2009)

En los rugosímetros la longitud de muestreo (longitud física de la superficie) varía al modificar la respuesta del amplificador, por medio de los filtros, que de igual manera, modifica la forma de onda del perfil para obtener el cut-off. El cut-off o longitud de muestreo equivalente es el medio a través del cual el perfil resultante de la forma de onda simula la restricción de la evaluación a la longitud de muestreo.

1.5.1. Parámetros de rugosidad

A continuación, se describen los principales parámetros de la rugosidad, definidos en el código ASME B46.1-2009.

1.5.1.1. Definición de Z(x)

Función utilizada para representar las desviaciones punto por punto entre el perfil medido y la línea media de referencia (Figura 1.18). Para instrumentos digitales, el perfil *Z(x)* se aproxima mediante un conjunto de valores digitalizados (Z_i) registrados utilizando el intervalo de muestreo (d_o).

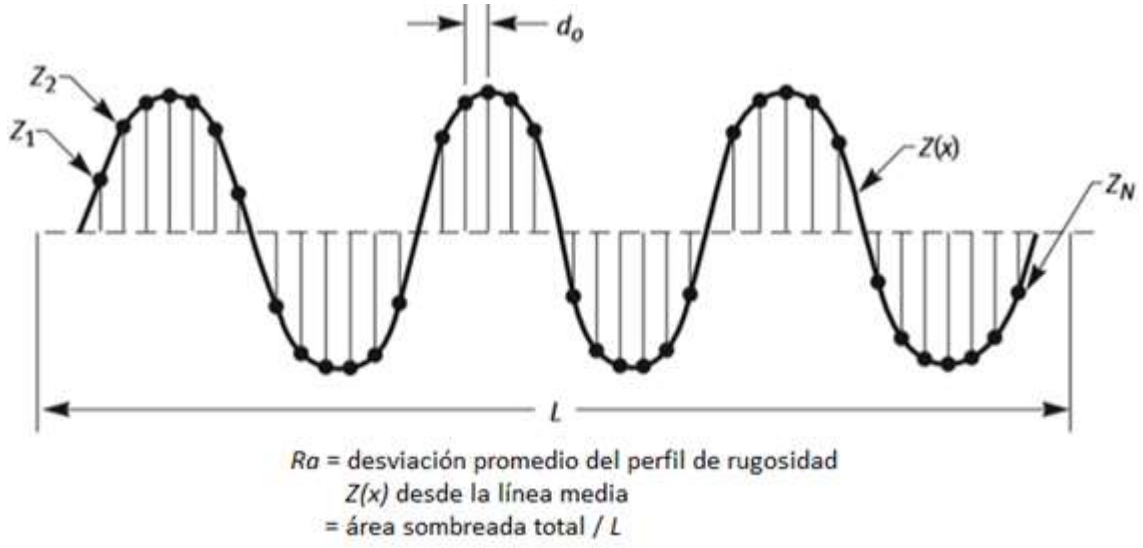


Figura 1.18. Ilustración para el cálculo de la rugosidad promedio (*Ra*).
(Fuente: ASME B46.1, 2009)

1.5.1.2. Rugosidad promedio (Ra)

Es el promedio aritmético de los valores absolutos de las desviaciones de altura del perfil, registradas dentro de la longitud de evaluación y medidas a partir de la línea media. Como se presenta en la Figura 1.18 *Ra* es igual a la suma de las áreas sombreadas del perfil dividido por la longitud de evaluación *(L)*, que generalmente incluye varias longitudes de muestreo o cut-off. Para la determinación gráfica de rugosidad, las desviaciones de altura se miden de forma normal a la línea central del gráfico.

Analíticamente, *Ra* viene dada por la siguiente ecuación 1.2:

$$Ra = \frac{1}{L}\int_0^L |Z(x)|dx \qquad (Ec.\ 1.2.)$$

Para instrumentos digitales, se puede obtener una aproximación del valor de *Ra* sumando los valores individuales de Z_i sin tener en cuenta el signo y dividiendo la suma por el número de puntos de datos *N*.

$$Ra = \frac{(|Z_1| + |Z_2| + |Z_3| \dots |Z_N|)}{N} \qquad (Ec.\ 1.3.)$$

1.5.1.3. Definición de Rq (RMS)

Es la raíz cuadrática de las desviaciones de altura del perfil (RMS, por sus siglas en inglés), tomadas dentro de la longitud de evaluación y medidas desde la línea media.

Analíticamente, está dada por la siguiente ecuación 1.4:

$$Rq = \left[\frac{1}{L}\int_0^L Z(x)^2 dx\right]^{1/2} \qquad (Ec.\ 1.4.)$$

La aproximación digital es la siguiente ecuación 1.5:

$$Rq = \left[\frac{(Z_1^2 + Z_2^2 + Z_3^2 + \cdots Z_N^2)}{N}\right]^{\frac{1}{2}} \qquad (Ec.\ 1.5.)$$

1.5.1.4. Altura máxima del perfil (Rp)

Es la distancia entre el punto más alto del perfil y la línea media dentro de la longitud de evaluación, Figura 1.19.

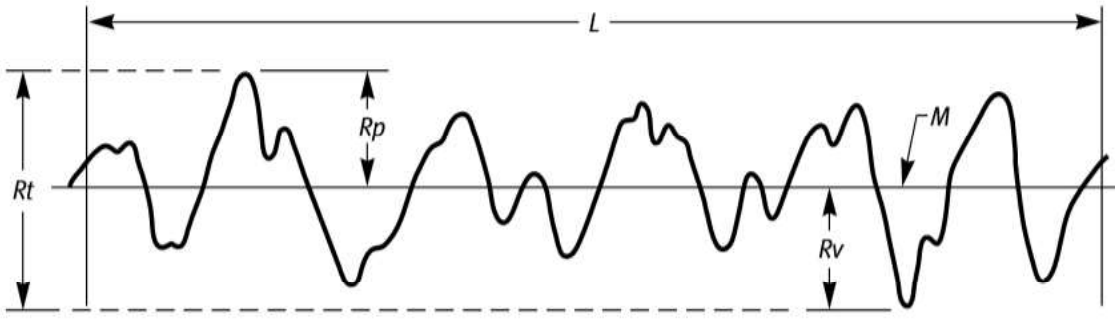


Figura 1.19. Parámetros *Rt, Rp* y *Rv*.
(Fuente: ASME B46.1, 2009)

Rp_i: es la distancia entre el punto más alto del perfil y la línea media dentro de un segmento de longitud de muestreo, etiquetado como i, Figura 1.20.

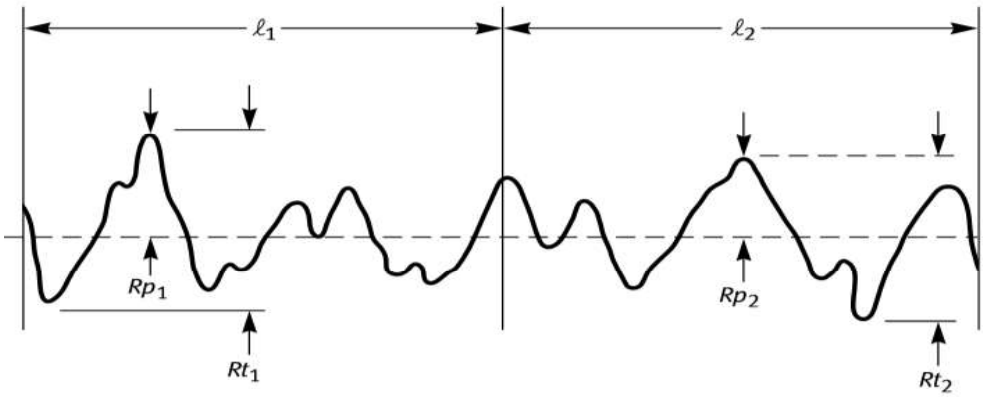


Figura 1.20. Perfil de superficie que contiene dos longitudes de muestreo, l_1 y l_2, y los parámetros *Rpi* y *Rti*.
(Fuente: ASME B46.1, 2009)

1.5.1.5. Altura máxima promedio del perfil máximo (Rpm)

Es el promedio de los valores sucesivos de Rp_i calculados sobre la longitud de la evaluación.

1.5.1.6. Profundidad máxima del valle del perfil (Rv)

Es la distancia entre el punto más bajo del perfil y la línea media, dentro de la longitud de evaluación, Figura 1.19.

1.5.1.7. Altura máxima del perfil (Rt)

Es la distancia vertical entre los puntos más altos y más bajos del perfil, dentro de la longitud de evaluación, Figura 1.19.

$$Rt = Rp + Rv \qquad (Ec.\ 1.6.)$$

Rt_i: es la distancia vertical entre los puntos más altos y más bajos del perfil dentro de un segmento de longitud de muestreo, etiquetado como i, Figura 1.20.

1.5.1.8. Altura máxima promedio del perfil (Rz)

Es el promedio de los valores sucesivos de Rt_i calculados sobre la longitud de la evaluación.

1.5.1.9. Profundidad máxima de rugosidad (Rmax)

Es la cantidad mayor de los valores sucesivos de Rt_i calculado sobre la longitud de evaluación, Figura 1.21.

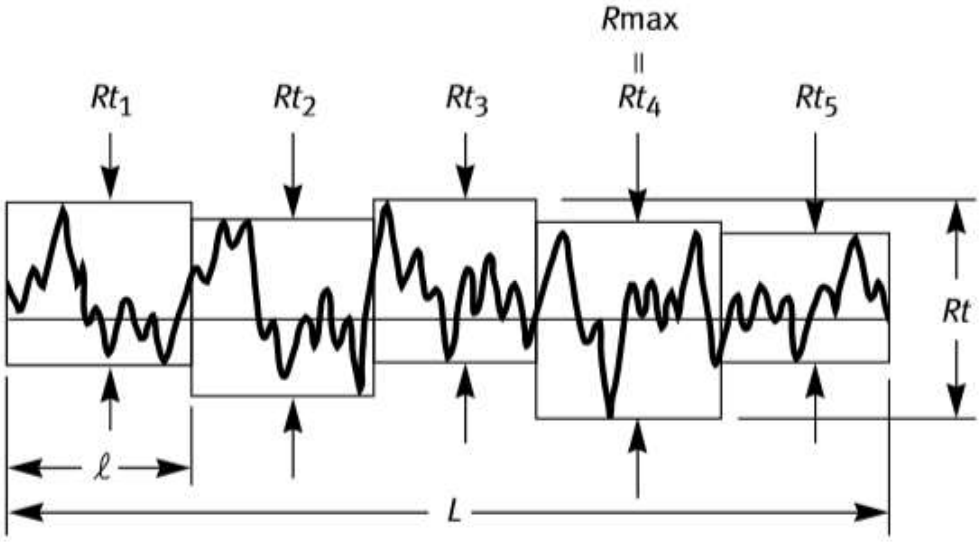


Figura 1.21. Ilustración de los parámetros *Rt* y *Rmax*.
(Fuente: ASME B46.1, 2009)

2. METODOLOGÍA

En el presente trabajo se estudia el comportamiento de la superficie del acero martensítico AISI 420, ante un proceso de manufactura como es el rectificado con cambios a las variables del proceso.

Se realizó ensayos de rugosidad y microindentación para obtener datos que, mediante la utilización de un total de 36 probetas, 18 en el sentido de laminación longitudinal y 18 en el sentido laminación transversal de acero AISI 420 de 8 mm de espesor, maquinadas mediante el proceso de rectificado variando los siguientes parámetros, tamaño de grano de la herramienta de corte (discos abrasivos) y la profundidad de pasada, considerando la velocidad de corte y avance constantes, de donde se obtuvieron dos muestras de cada probeta rectificada para ser sometidas a los ensayos tales como: ensayo de rugosidad, ensayo de corrosión, análisis metalográfico y microdureza.

2.1. Proceso de rectificado tangencial

Este proceso de maquinado es el más utilizado para este tipo de materiales debido a las aplicaciones del mismo, obteniendo así superficies lisas y óptimas para un funcionamiento adecuado en las aplicaciones deseadas del material.

En los siguientes subcapítulos se explica detalladamente los parámetros que se aplicaron para la obtención de las superficies rectificadas.

2.1.1. Preparación del material

El dimensionamiento de las probetas depende de los parámetros de operación de la rectificadora, si las probetas son sobredimensionadas a la capacidad de operación de la máquina, esta puede verse afectada. Cabe mencionar que la extracción de las probetas a ser rectificadas, se lo realiza con procedimientos de corte refrigerados, evitando así cualquier cambio microestructural en el acero AISI 420 antes del estudio experimental.

2.1.2. Parámetros de rectificado

La variación de los parámetros de rectificado utilizados durante el proceso se presenta en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Parámetros de rectificado.

Tipo de Rectificado	Herramienta de corte		Parámetros de corte	
	Tipo	Grano*	Profundidad mm/pasada	Velocidad
GRUESO	Grueso	24	0,020	2400 rpm
MEDIO	Medio	46	0,010	2400 rpm
FINO	Fino	60	0,005	2400 rpm

(Fuente: Propia) *Granulometría del disco

2.1.3. Equipos para el proceso de rectificado

El proceso de rectificado se lo realizó en el Laboratorio de Máquinas y Herramientas de la Facultad de Ingeniería Mecánica, el cual posee una rectificadora tangencial para realizar el proceso y para obtener las temperaturas a las que llega este proceso se dispone de una cámara termográfica del Laboratorio de Ciencias Nucleares de la Facultad de Ingeniería Química, cabe mencionar que ambos laboratorios pertenecen a la Escuela Politécnica Nacional. En la Tabla 2.2. se muestran las especificaciones técnicas de los equipos.

Tabla 2.2. Especificaciones técnicas de los equipos para el proceso de rectificado.

Equipo	Rectificadora	
Descripción	**Especificación**	**Imagen**
Marca	SELTER	
Tipo	Longitudinal	
Modelo	R&M	
Potencia	1 HP	
Voltaje	220 / 440 (V)	
Velocidad	2400 RPM	
Apreciación	0,001 mm	
Equipo	Cámara Termográfica	
Descripción	**Especificación**	**Imagen**
Marca	FLUKE	
Modelo	VT04	
Rango de medida	-10 °C a 250 °C	
Exactitud	± 2 °C	
Distancia de medición	Near 15 a 23 cm Far ≥ 23 cm	

(Fuente: Propia)

2.1.4. Selección de la herramienta de corte

Los discos abrasivos utilizados en el proceso de rectificado están constituidos fundamentalmente de óxido de aluminio, que se lo utiliza para rectificar materiales de alta resistencia, existen cuatro colores de este óxido, como son: blanco, negro, verde y rosa, cada uno para un proceso rectificado determinado.

Para el rectificado de aceros templados se utilizan discos abrasivos de óxido de aluminio blanco, mientras que para el rectificado de aceros de bajo carbono y aceros inoxidables se utilizan discos de óxido de aluminio negro.

Dado que el presente estudio se lo realiza a un acero inoxidable, se emplean discos abrasivos de óxido de aluminio negro. En la Tabla 2.3. se muestran las características de los discos de rectificado empleados.

Tabla 2.3. Selección de discos del rectificado.

Características de los discos de rectificado		
Marca	NORTON	**Velocidad máxima de operación**
Dimensiones	6"x ¾"x 1 ¼"	4140 RPM
Tamaño de grano (µm)		
Grueso	**Medio**	**Fino**
24	46	60
Designación normalizada		
A24 RVS	A46 OVS	A60 NVS

(Fuente: Propia)

2.1.5. Procedimiento del proceso de rectificado

- Extraer las probetas de la plancha de acero AISI 420, por medio de una sierra circular manual con disco de tungsteno, este disco evita que el acero se caliente, este procedimiento se considera como un proceso de corte en frío. En la Figura 2.1 se presenta las dimensiones de las probetas en milímetros.

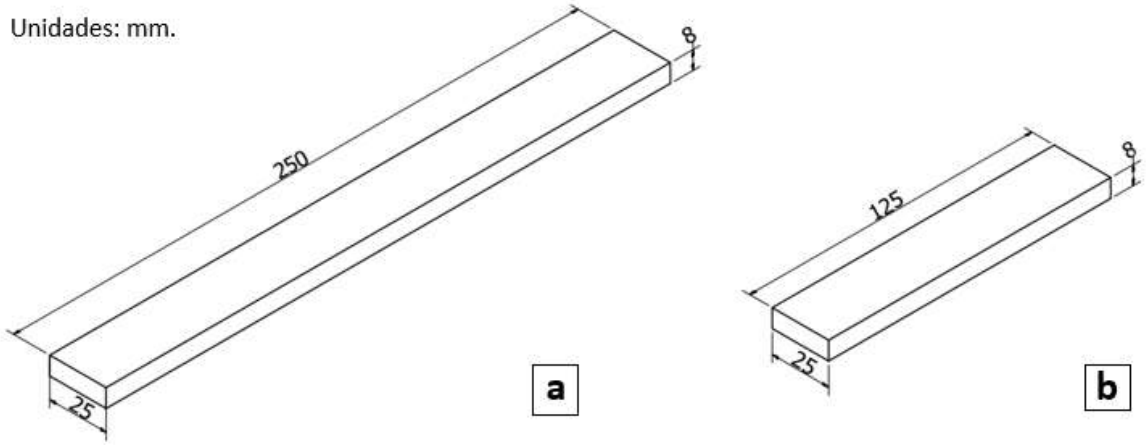


Figura 2.1. Dimensiones de las probetas: a) rectificado medio y fino, b) rectificado grueso.
(Fuente: Propia)

- Identificar cada una de las probetas a ser rectificadas, considerando: el tipo de disco, el sentido de laminación de la plancha y la profundidad de pasada; para ello se presenta la codificación en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4. Codificación para identificación de probetas.

Rectificado		**Sentido de laminación**		**Profundidad de pasada**		**Ejemplo: 963**
Tipo	**#**	**Longitudinal**	**Transversal**	**mm/pasada**	**#**	
GRUESO	7	5	6	0,020	1	9: Disco fino 6: Sentido Transversal 3: Profundidad 0,005
MEDIO	8	5	6	0,010	2	
FINO	9	5	6	0,005	3	

(Fuente: Propia)

- Lavar las probetas con jabón neutro y un cepillo suave para eliminar cualquier impureza que puede afectar la fijación de la probeta en la rectificadora.
- Colocar en la rectificadora el disco abrasivo grueso (A24 RVS).
- Fijar la probeta correspondiente al disco, sobre la mesa magnética.
- Rectificar la superficie hasta que sea uniforme y paralela a la otra cara.
- Aplicar en 3 probetas con sentido de laminación longitudinal las profundidades de pasada de: (0,020; 0,010 y 0,005) mm respectivamente y repetir el mismo proceso para las probetas con sentido de laminación transversal.
- Registrar con la cámara termográfica la temperatura entre la probeta y el disco de rectificado durante el proceso y al finalizar.

En la Figura 2.2 se presenta el registro de temperaturas con la cámara termográfica, para ello se debe tomar en consideración los siguientes aspectos:

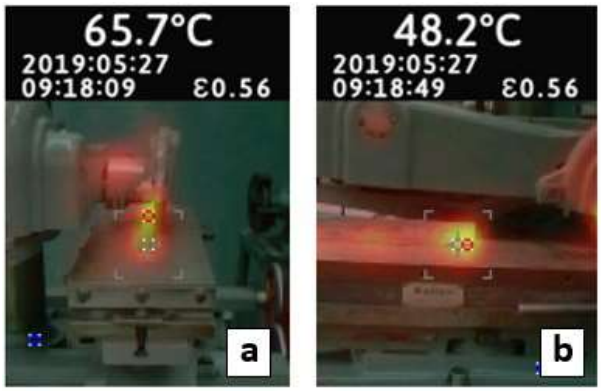


Figura 2.2. Medición de temperatura; a) durante el proceso, b) al finalizar el proceso.
(Fuente: Propia)

La probeta debe estar ubicada perpendicular al punto focal de la cámara termográfica y está a una distancia de separación de 1,50 m. Ingresar la emisividad de 0,56 para aceros laminados, valor proporcionado por el manual de operación del equipo.

En la Figura 2.3 se muestra la ubicación del equipo respecto al punto de medición, para evitar desviaciones en la lectura de temperatura, cabe mencionar que estas recomendaciones las proporciona el manual de la cámara termográfica.

Figura 2.3. Ubicación correcta de la cámara termográfica respecto al punto de medición.
(Fuente: Fluke Corporation, 2012)

- Finalmente, lavar las probetas con jabón neutro y un cepillo suave para eliminar las partículas del material desprendido que pueden afectar los ensayos posteriores.
- Realizar los pasos anteriores en las probetas restantes con los discos abrasivos medio (A46 OVS) y fino (A60 NVS), hasta obtener un total de 18 probetas rectificadas.

2.2. Caracterización superficial

La aplicación de varios ensayos permite analizar los cambios que presenta el acero rectificado, al variar los parámetros del proceso; cuantificando resultados que bajo criterios

de aceptación de normas internacionales (ASTM, ASME), permite aceptar o rechazar los resultados obtenidos.

Se realiza el ensayo de rugosidad para obtener las calidades superficiales de cada una de las probetas, en base a la norma ASME B46.1-2009, donde especifica los métodos de medición e identificación de la calidad superficial en base a la topografía de la superficie.

2.2.1. Ensayo de rugosidad

Este ensayo permite evaluar la calidad superficial generada en cada una de las probetas, bajo el principio de contacto: el cual mide la rugosidad tomando en cuenta la longitud de muestreo (λ_c) y la distancia entre picos y valles en λ_c. Donde la sonda del rugosímetro que proporciona la lectura, se compone de un pequeño sensor de película conductor, incrustado en una superficie concéntrica no conductora, la cual estabiliza la medición de la rugosidad. En la Figura 2.4 se muestra el principio de funcionamiento del equipo para medir la rugosidad.

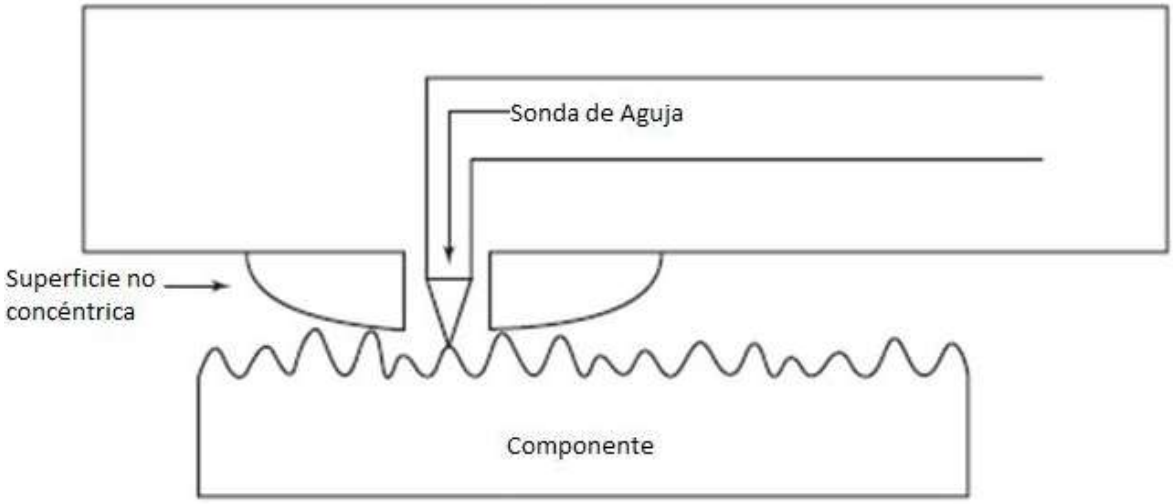


Figura 2.4. Principio de funcionamiento de sonda del rugosímetro.
(Fuente: ASME B46.1, 2009)

El ensayo de rugosidad se lo realiza en sentido perpendicular a las marcas generadas por el rectificado.

2.2.1.1. Probetas para ensayo de rugosidad

Para realizar el ensayo de rugosidad en las probetas, se marcan áreas de referencia con el fin de registrar valores de rugosidad a lo largo de toda la probeta, considerando el criterio de repetitividad de ensayo, el cual toma todas las mediciones y reporta un solo valor en cada una de las probetas, y de esta manera evitar deviaciones que se presentan en el

tratamiento de datos. En la Figura 2.5 se presenta un esquema de las divisiones a lo largo de toda la probeta en milímetros para la toma de datos.

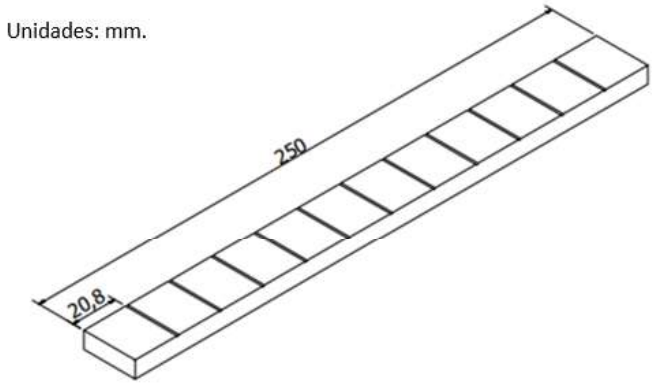


Figura 2.5. Esquema de áreas de referencia en la probeta.
(Fuente: Propia)

2.2.1.2. Equipo para ensayo de rugosidad

Este ensayo se lo realizó en el área de análisis del Laboratorio de Metalografía, Desgaste y Falla de la Escuela Politécnica Nacional, el cual cuenta con el equipo adecuado para la realización de este ensayo. En la Tabla 2.5. se muestran las especificaciones técnicas del equipo.

Tabla 2.5. Especificaciones técnicas del rugosímetro.

Equipo	Rugosímetro	
Descripción	**Especificación**	**Imagen**
Marca	MITUTOYO	
Modelo	SJ-210	
Rango de medición	Eje z: 17,5 mm Eje x:5,6 mm	
Palpador	Diamante, radio: 2 µm, ángulo de punta: 60°	
Velocidad de medición	0,25; 0,50; 0,75 (mm/s).	
Velocidad de retroceso	1,00 mm/s	
Cut-off (λ_c)	0,08; 0,25; 0,8; 2,5 (mm)	
Presión de medición	0,75 mN según DIN/ISO	

(Fuente: Propia)

2.2.1.3. Procedimiento para ensayo de rugosidad

- Limpiar con agua, jabón neutro y alcohol las probetas.
- Tomar macrografías de la superficie generada para registras el cambio superficial.
- Marcar las probetas según el esquema presentado en la subsección 2.2.1.1.
- Preparar el rugosímetro, con la sonda y el cabezal para superficies planas.
- Encender y verificar los parámetros de medición en el rugosímetro.
- Verificar la calibración del rugosímetro con el patrón de calibración.
- Ubicar las probetas en el porta muestras del rugosímetro.
- Realizar las mediciones en cada una de las zonas marcadas en cada probeta.
- Guardar los valores registrados con la ayudada del software SJ-Communication-Tool propio del rugosímetro.

2.3. Análisis metalográfico

El análisis metalográfico brinda información de la microestructura de un material y de los cambios que se producen en el mismo, luego del mecanizado. En el acero AISI 420 al ser rectificado con la variación de discos abrasivos y la profundidad de pasada, la metalografía proporciona las características microestructurales que se relacionan con sus propiedades mecánicas y físicas, que, mediante la identificación de sus fases facilita el análisis de la variación de la microestructura, registrando así los posibles cambios y deformaciones microestructurales que puede existir luego de un proceso de rectificado.

2.3.1. Probetas para análisis metalográfico

Las probetas para este análisis, se extraen del centro de la probeta rectificada, ya que inicialmente se considera la zona más probable de cambio microestructural. Las dimensiones de las probetas son de (25 x 20 x 7) mm que, mediante un corte transversal sin afectar la superficie rectificada, pasan al proceso de montaje sobre resina poliéster para facilitar la manipulación de las mismas. En la Figura 2.6 se presentan las probetas utilizadas para el análisis metalográfico del material base y de las probetas ya rectificadas.

Figura 2.6. Probetas para análisis metalográfico.

(Fuente: Propia)

2.3.2. Equipo para análisis metalográfico

El análisis se lo realizó en el Laboratorio de Metalografía, Desgaste y Falla de la Escuela Politécnica Nacional, en el área de preparación y corte, que dispone de herramientas como: calibrador, flexómetro, marcador para metales, entre otros. Asimismo, equipos para los procesos de desbaste grueso, desbaste fino y pulido, y reactivos para realizar el ataque químico a las probetas. Por otra parte, el área de análisis cuenta con el microscopio metalográfico para la obtención de las metalografías. En la Tabla 2.6. se muestran las especificaciones técnicas de la máquina desbastadora utilizada.

Tabla 2.6. Especificaciones técnicas de la máquina desbastadora de lija de disco.

Descripción	Especificación	Imagen
Nombre de equipo	Desbastadora de disco de lija	
Marca	BUEHLER	
Modelo	121-OM-84	
Voltaje	220 V	
Amperaje	6.2 A	
Potencia	1 HP	
Abrasivo	Lija de 100 granos/pulg^2	
Refrigeración	Por agua	

(Fuente: Propia)

En la Tabla 2.7. se muestran las especificaciones técnicas del equipo para preparación y pulido de muestras, el cual utiliza dos tipos de abrasivos el uno para el proceso de desbaste fino y el otro para el proceso de pulido.

Tabla 2.7. Especificaciones técnicas del equipo de preparación y pulido de muestras.

Descripción	Especificación	Imagen
Nombre de equipo	Equipo para preparación y pulido de muestras	
Marca	METKON	
Modelo	Forcipol 2V	
Voltaje	220 V	
Abrasivo para desbaste	Lijas (150,240,320,400,600, 1200) granos/pulg^2	
Abrasivo para pulido	Alúmina 0.3 micrón	
Refrigeración	Por agua para desbaste	

(Fuente: Propia)

Figura 2.7. Reactivo químico: Agua regia.

(Fuente: Propia)

En la Figura 2.7 se muestra el reactivo químico Agua regia (60% Ácido clorhídrico, 40% Ácido nítrico), utilizado para el ataque químico de las probetas: esto, para revelación óptica de la microestructura del material en el microscopio. En la Tabla 2.8. se muestran las especificaciones técnicas el microscopio metalográfico utilizado para realizar macrografías de la superficie y micrografías de la microestructura del material.

Tabla 2.8. Especificaciones técnicas del microscopio metalográfico.

Descripción	Especificación	Imagen
Nombre de equipo	Microscopio Metalográfico	
Marca	OLYMPUS	
Modelo	GX41F	
Voltaje	(100-120) V / (230-240) V	
Frecuencia	50/60 Hz	
Objetivos	5X, 10X, 50X, 100X	
Tubos de observación	10X	
Cámara metalográfica	5 Mega Pixeles	
Software	Stream Essentials	

(Fuente: Propia)

2.3.3. Procedimiento para análisis metalográfico

- **Extracción de probetas:** Extraer las probetas para análisis metalográfico del centro de la probeta rectificada, con las dimensiones establecidas en la subsección 2.3.1. Utilizando una sierra automática refrigerada con taladrina (aceite soluble y agua): esto, para evitar cambios microestructurales durante el corte.
- **Montaje de probetas:** Colocar las probetas debidamente identificadas en moldes circulares de 37 mm de diámetro, previamente preparados. Luego, colocar la solución de resina poliéster, octoato de cobalto y metil etil cetona; que, al reaccionar juntas requieren de un tiempo aproximado de secado de 90 minutos y poder realizar su desmontaje.
- **Desbaste grueso:** Eliminar el exceso de resina en la desbastadora para obtener una superficie plana y en lo posible paralela.
- **Desbaste fino:** Preparar el equipo de preparación y pulido de muestras con lijas de agua correspondientes a la serie numérica: 150, 240, 400, 600 y 1200 en los platos porta muestras. Iniciar del desbaste con la lija número 150, luego colocar y desbastar las probetas por ambas caras, con el fin de dejarlas paralelas y evitar así que se produzca doble cara. Posteriormente, continuar con las lijas restantes y desbastar una sola cara con una velocidad de 240 RPM y 15 Psi de presión, cambiando las lijas cada vez que desaparezcan las marcas de la lija anterior; esto hasta llegar a la lija número

1200 para disminuir las marcas generadas por el desbaste grueso. Cabe mencionar que se debe utilizar agua como medio de refrigeración en el proceso.

- **Pulido:** Colocar el disco de paño en el equipo de preparación y pulido de muestras, para pulir las probetas con la ayuda de alúmina de 0.3 micrón a una velocidad de 160 RPM y 5 Psi de presión, para eliminar las marcas provocadas en el desbaste fino. Evitar redondear los bordes de las probetas y lograr una superficie similar a la de un espejo. Es necesario lavar las probetas con agua y rociar con alcohol, desde que se realiza el desbaste grueso hasta que se finaliza el pulido, para evitar la corrosión.
- **Ataque químico:** Exponer la superficie pulida de la probeta al agua regia por el método de inmersión, con un intervalo de 7 segundos. Posteriormente, lavar con agua y retirar el posible exceso de reactivo con algodón, para evitar el sobreataque químico y rayones en las probetas. Finalmente, rociar alcohol al 99,8% de pureza en la superficie expuesta. Este proceso se lo realiza para de obtener la visualización óptica de la microestructura en el microscopio metalográfico.
- **Adquisición fotográfica:** Colocar una por una las probetas en el microscopio metalográfico para su respectivo análisis y con la ayuda del software Stream Essentials, capturar las imágenes necesarias para el correspondiente análisis. Guardar las fotos en el computador según corresponda.

2.4. Ensayo de microdureza

Este ensayo consiste en evaluar la resistencia que posee un material a la deformación plástica inducida por la aplicación de una carga, transmitida por un indentador que genera una marca propia en el orden de micrones. Este ensayo se lo aplica a muestras que requieran un análisis de comportamiento en las estructuras cristalinas del material, puesto que el orden dimensional de este ensayo permite realizar mediciones en granos monofásicos de la estructura mencionada.

2.4.1. Probetas para ensayo de microdureza

Las probetas para este ensayo pueden ser las mismas que se utilizaron para el análisis metalográfico dado que estas mantienen el paralelismo generado en el proceso de desbastado y pulido, además, mantienen el ataque químico realizado, facilitando así la identificación de los granos del material y poder realizar las indentaciones.

2.4.2. Equipo para ensayo de microdureza

En la Tabla 2.9. se muestran las especificaciones técnicas del equipo utilizado para el ensayo de microdureza, el cual reporta las mediciones en la escala de Vickers.

Tabla 2.9. Especificaciones del equipo para ensayo de microdureza.

Descripción	Especificación	Imagen
Nombre de equipo	Microdurómetro	
Marca	METKON	
Modelo	DUROLINE-M	
Objetivos	10X, 40X	
Carga	(10-1000) gf	
Tiempo de carga	(5-99) s	
Cámara	Metkom	
Software	Kameram	

(Fuente: Propia)

2.4.3. Procedimiento para ensayo de microdureza

- Preparar el equipo para el ensayo de microdureza, verificando los parámetros de carga y tiempo de aplicación, los cuales dependen del material a ensayar, en este caso para el acero AISI 420 se aplica una carga de 200 gf por un tiempo de 15 s.
- Colocar la probeta en la entenalla y verificar que la misma sobresalga de sus muelas de sujeción y evitar así daños en el indentador.
- Realizar las indentaciones a una distancia de 60 µm de separación de la primera indentación (en el borde de la superficie). Debido a la zona de deformación esta distancia varia y la tercera indentación corresponde al valor de material base.
- Medir manualmente las diagonales de las indentaciones para obtener los valores de microdureza.
- Replicar los datos con la ayuda del software KAMERAM para la obtención de los valores de microdureza por medio de la medición de las diagonales.

2.5. Ensayo de corrosión

Este ensayo permite simular un ambiente corrosivo de cloruro, con el objeto de determinar la resistencia de los aceros inoxidables al inicio de picaduras; gracias a la ayuda de una solución de cloruro férrico la cual permite acelerar el tiempo de inicio de la corrosión en comparación a entornos naturales.

Este trabajo experimental se lo hace por el método de corrosión por inmersión completa, con el fin de analizar el comportamiento de cada una de las superficies rectificadas con la variación de parámetros de rectificado (mencionados anteriormente), por medio de la

exposición de probetas a un ambiente corrosivo de cloruro férrico. Se toma como referencia la norma ASTM G48 para aplicar el método, posteriormente realizar el ensayo de rugosidad y así comparar los resultados obtenidos de cada probeta con los resultados del rectificado inicial.

2.5.1. Probetas para el ensayo de corrosión

Se extrajo una muestra de cada una de las probetas rectificadas, al igual que para el análisis metalográfico, siendo un total de 18 a ser sometidas al proceso de corrosión, dado que se va a realizar una comparación de resultados entre variables de proceso, es necesario que todas las probetas tengan las mismas dimensiones y que solo la superficie rectificada sea expuesta al cloruro, es por ello que los demás lados de la probeta se deben cubrir para evitar el contacto con el cloruro. En la Figura 2.8 se presentan las dimensiones de las probetas y la preparación de las mismas.

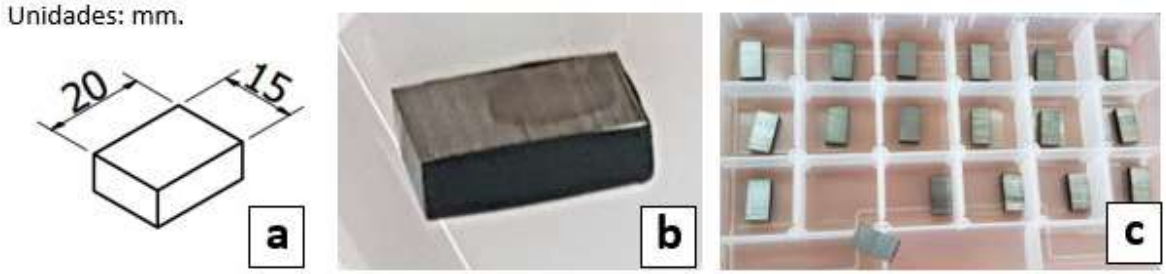


Figura 2.8. Probetas: a) Dimensiones, b) Protección de caras que no intervienen en el estudio, c) Ubicación para el ensayo.
(Fuente: Propia)

2.5.2. Corrosión acelerada

Como se mencionó anteriormente este ensayo se lo realiza bajo la norma ASTM G48 método “E” el cual es la prueba para picaduras para aceros inoxidables, el cual considera un tiempo mínimo de 24 horas para poder generar picaduras en el acero, así como una solución al 6% de concentración de cloruro férrico para condiciones ambientales.

Para el presente trabajo, el ensayo se lo realizó a condiciones ambientales de temperatura (20°C), la solución salina se preparó 1 litro de solución compuesta de: 94% de agua destilada y 6% de cloruro férrico.

2.5.3. Velocidad de corrosión

El valor de velocidad de corrosión se compara entre todas las probetas, y para analizar con cual parámetro de rectificado es mayor la velocidad, para el cálculo se utilizan las Ecuaciones 2.1 y 2.2 que incluye la variación de pérdida de masa.

$$CR = \frac{K \cdot W}{A \cdot d \cdot t} \qquad (Ec.\ 2.1.)$$

Ecuación 2.1. Cálculo de la velocidad de corrosión.

(Fuente: Gonzáles, 2015)

Donde:

CR: Velocidad de corrosión

W: Pérdida de peso (g)

K: Constante de transformación de unidades (1,00 x 10^4 x d)

A: Área promedio inicial expuesta al medio corrosivo (cm^2)

d: Densidad del material (g/cm^3) (Acero AISI 420 = 7,80 g/cm^3)

t: Tiempo de exposición (h)

$$W = W_i - W_f \qquad (Ec.\ 2.2.)$$

Ecuación 2.2. Cálculo de la variación de la masa.

(Fuente: Sáenz, Castillo, Castillo, & Márquez, 2010)

Donde:

W: Pérdida de peso (g)

Wi: Peso inicial (g)

W_f: Peso final (g)

2.5.4. Equipo para el ensayo de corrosión

Para el ensayo de corrosión se utiliza fundamentalmente un recipiente de plástico con divisiones para poder ubicar las probetas a ser ensayadas, Figura 2.9.

Figura 2.9. Ubicación de las probetas en recipiente.

(Fuente: Propia)

Para la medición de masa antes y después del ensayo de corrosión se utiliza una balanza digital del Laboratorio de Metalografía Desgaste y Falla. En la Tabla 2.10. se muestran las especificaciones técnicas.

Tabla 2.10. Especificaciones técnicas de la balanza digital.

Descripción	Especificación	Imagen
Nombre de equipo	Balanza digital.	
Marca	N/A	
Modelo	N/A	
Capacidad	(0–500) g	
Apreciación	0,01 g	
Tipo de lectura	Digital	

(Fuente: Propia)

2.5.5. Procedimiento para el ensayo de corrosión

- Extraer las muestras de la probeta rectificada mediante un proceso de corte refrigerado.
- Desbastar las probetas hasta obtener las dimensiones presentadas en la subsección 2.5.1.
- Limpiar la superficie de las probetas a ser analizadas con jabón neutro, agua y alcohol.
- Pesar las probetas y registrar las mediciones iniciales.
- Cubrir las superficies que están fuera del estudio para evitar desviaciones en las mediciones, como se presenta en la subsección 2.5.1.
- Identificar y colocar las probetas en el recipiente plástico.
- Verter la solución de cloruro férrico, hasta cubrir en su totalidad las probetas y colocar en un lugar donde la temperatura sea constante, condiciones ambientales.
- Dejar las probetas durante un periodo de 72 horas tal como se mencionó en la subsección 2.5.2.
- Al cumplir el tiempo del ensayo, retirar las probetas de la solución, y lavar las probetas con jabón neutro, agua y alcohol.
- Pesar las probetas y registrar las mediciones finales.
- Finalmente, preparar las probetas para el análisis metalográfico tal como se presentó en la subsección 2.3.3

En la Figura 2.10 se presenta el procedimiento del ensayo de corrosión.

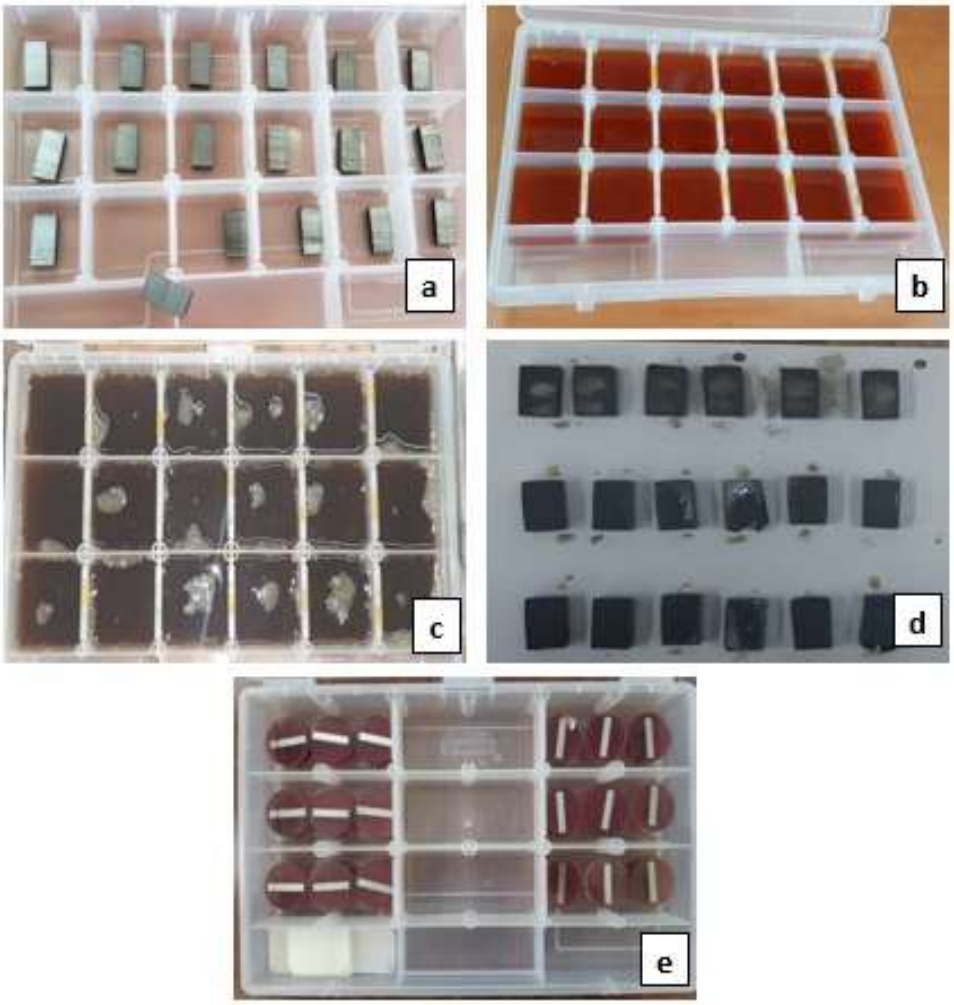


Figura 2.10. Ensayo corrosión: a) Probetas, b) Inicio, c) Final, d) Resultado, e) Probetas para análisis metalográfico.

(Fuente: Propia)

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

En el presente capítulo se detallan los resultados obtenidos de los distintos ensayos realizados, para determinar las calidades superficiales bajo la norma ASME B46.1 y comparar los resultados entre las probetas rectificadas.

3.1. Resultados

A continuación, se detallan los resultados obtenidos por cada ensayo realizado, como son: temperaturas obtenidas durante el proceso de rectificado, rugosidades, microestructuras, y valores de microdureza; para el ensayo de corrosión valores de pérdida de masa y rugosidades.

3.1.1. Proceso de rectificado

En la Figura 3.1 se presenta la captura de la imagen termográfica durante el proceso de rectificado, las Tablas 3.1., 3.2. y 3.3., presentan los valores de temperatura alcanzada en relación con los parámetros del rectificado.

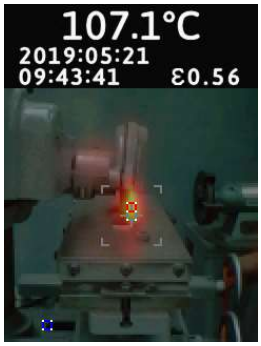


Figura 3.1. Medición termográfica durante el proceso de rectificado (probeta 951).
(Fuente: Propia)

Tabla 3.1. Temperaturas alcanzadas en el rectificado grueso.

Rectificado: Grueso			**Disco:** Grueso	**Velocidad de corte:** 2400 RPM		
	Longitudinal			**Transversal**		
#	**751 (°C)**	**752 (°C)**	**753 (°C)**	**761 (°C)**	**762 (°C)**	**763 (°C)**
1	86,1	52,9	43,2	71,3	23,5	54,2
2	102,4	54,8	52,8	73,0	23,9	57,9
3	114,0	74,1	51,1	76,3	61,3	28,1
4	119,0	65,2	28,8	86,1	30,1	26,3
5	93,6	68,4	31,6	89,9	29	27,4
6	85,7	62,5	33,3	76,9	28,6	26,9

(Fuente: Propia)

Tabla 3.2. Temperaturas alcanzadas en el rectificado medio.

Rectificado: Medio			**Disco:** Medio	**Velocidad de corte:** 2400 RPM		
	Longitudinal			**Transversal**		
#	**851 (°C)**	**852 (°C)**	**853 (°C)**	**861 (°C)**	**862 (°C)**	**863 (°C)**
1	70,5	60,3	55,9	72,6	35,8	43,6
2	68,7	81,4	64,7	80,6	47,9	42,5
3	80,0	69,0	70,3	87,3	49,5	42,7
4	87,2	96,1	63,0	76,2	45,6	32,5
5	85,9	86,3	62,8	84,8	39,6	31,4
6	66,0	65,7	57,9	66,7	35,0	33,8

(Fuente: Propia)

Tabla 3.3. Temperaturas alcanzadas en el rectificado fino.

Rectificado: Fino			**Disco:** Fino	**Velocidad de corte:** 2400 RPM		
	Longitudinal			**Transversal**		
#	**951 (°C)**	**952 (°C)**	**953 (°C)**	**961 (°C)**	**962 (°C)**	**963 (°C)**
1	74,9	40,1	44,8	58,8	62,8	57,3
2	93,7	58,1	44,9	59,5	65,1	67,2
3	93,0	62,0	45,8	62,9	60,9	55,0
4	97,2	57,1	47,5	63,7	68,3	61,5
5	98,8	48,9	43,2	66,6	69,1	42,8
6	107,1	30,6	40,6	68,9	51,3	41,6

(Fuente: Propia)

En la Tabla 3.4. se presenta el análisis estadístico de los datos de temperatura obtenidos de todas las probetas.

Tabla 3.4. Resumen estadístico de medición de temperaturas en las probetas.

Rectificado: Grueso				
Probeta		**Promedio (°C)**	**Varianza**	**Desviación Estándar**
Longitudinal	**951**	94,1	114,1	10,7
	952	49,5	146,8	12,1
	953	44,5	5,6	2,4
Transversal	**961**	63,4	14,8	3,8
	962	62,9	42,2	6,5
	963	54,2	104,3	10,2

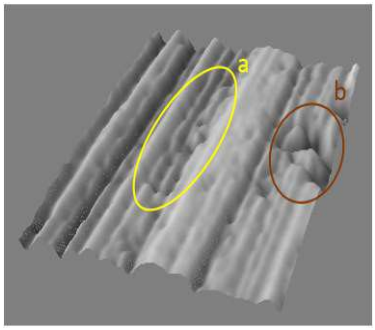
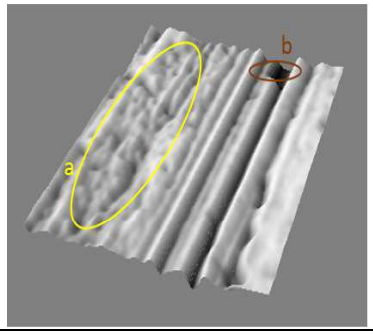
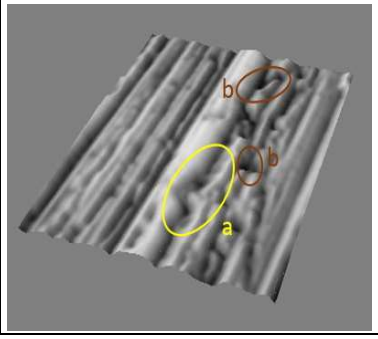
(Fuente: Propia)

Rectificado: Medio				
Probeta		**Promedio (°C)**	**Varianza**	**Desviación Estándar**
Longitudinal	**851**	76,4	84,4	9,2
	852	76,5	187,9	13,7
	853	62,4	26,1	5,1
Transversal	**861**	78,0	59,9	7,7
	862	42,2	39,4	6,3
	863	37,8	33,0	5,7
Rectificado: Fino				
Probeta		**Promedio (°C)**	**Varianza**	**Desviación Estándar**
Longitudinal	**951**	94,1	114,1	10,7
	952	49,5	146,8	12,1
	953	44,5	5,6	2,4
Transversal	**961**	63,4	14,8	3,8
	962	62,9	42,2	6,5
	963	54,2	104,3	10,2

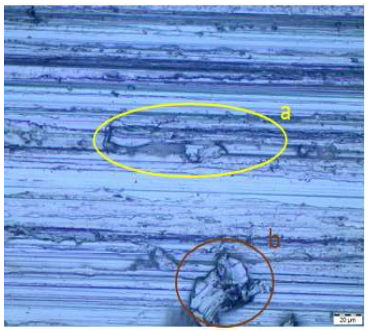
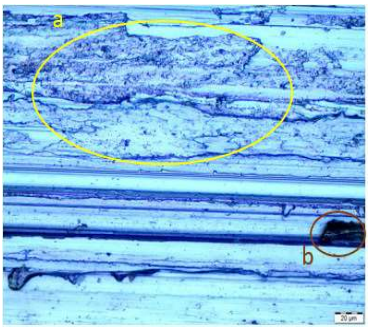
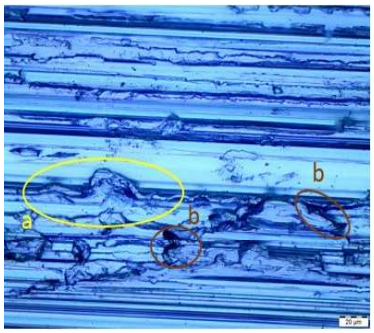
(Fuente: Propia) Continuación Tabla 3.4

En la Tabla 3.5. se presentan las superficies de las probetas obtenidas con los discos de rectificado grueso (7), medio (8) y fino (9), con sentido de laminación transversal (6) y profundidad de pasada de 0,020 mm (1), por medio de un microscopio metalográfico con un aumento de 500x. Además, con la ayuda del software "ImageJ" se presenta una aproximación de la superficie a partir de un análisis visual. Los resultados de las demás probetas se presentan en el ANEXO I.

Tabla 3.5. Superficies obtenidas en el rectificado grueso con los diferentes discos.

961	**861**	**761**
		

(Fuente: Propia)

961	861	761
		
a) Aplastamiento leve. b) Desprendimiento.	a) Aplastamiento moderado. b) Desprendimiento.	a) Aplastamiento crítico. b) Desprendimiento.

(Fuente: Propia) Continuación Tabla 3.5

3.1.2. Ensayo de rugosidad

En la Figura 3.2 se presenta el proceso de medición de rugosidad en las probetas rectificadas para la obtención de las Tablas 3.6., 3.7. y 3.8., en donde se muestran los valores de rugosidad promedio de cada una de las superficies rectificadas, cabe mencionar que para este ensayo se consideran los siguientes parámetros en todas las superficies.

$$\lambda_s = 2{,}5\ \mu m$$

$$\lambda_c = 8\ mm$$

$$\vartheta = 0{,}5\ mm/s$$

Donde:

λ_s: Longitud de onda corta de la rugosidad [µm]

λ_c: Longitud de muestreo [mm]

ϑ: Velocidad de avance del sensor [mm/s]

Figura 3.2. Medición de rugosidades.

(Fuente: Propia)

En la Figura 3.3 se presentan las mediciones de rugosidad a lo largo de la probeta 852, con el fin de señalar la variación de rugosidades.

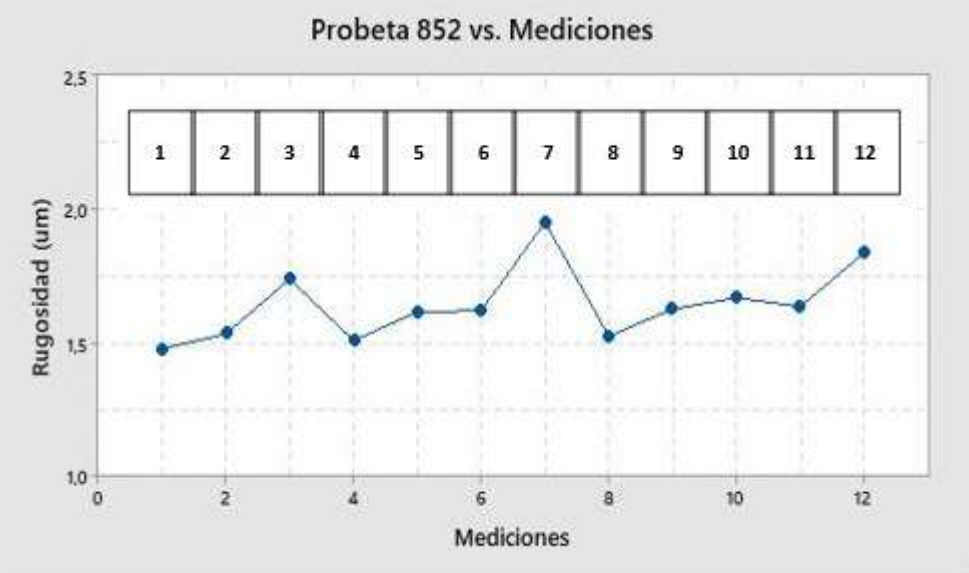


Figura 3.3. Muestreo de datos de rugosidad en probetas.

(Fuente: Propia)

El rugosímetro posee un software que permite visualizar el perfil de comportamiento en la longitud de muestreo (λ_c) mediante la emisión de un informe con el valor de rugosidad promedio (Ra), como se presenta en la Figura 3.4.

Figura 3.4. Perfil de evaluación de la probeta 951.

(Fuente: Software Mitutoyo)

En las Tablas 3.6., 3.7. y 3.8. se presentan los valores de Ra correspondientes a cada probeta rectificada.

Tabla 3.6. Rugosidad en el rectificado grueso.

Rectificado: Grueso						
	Longitudinal			**Transversal**		
#	**751 (µm)**	**752 (µm)**	**753 (µm)**	**761 (µm)**	**762 (µm)**	**763 (µm)**
1	2,653	2,861	2,336	7,657	2,769	2,686
2	2,123	2,536	2,302	2,518	3,459	2,661
3	2,583	2,737	2,215	3,283	3,834	2,653
4	2,509	2,312	2,527	2,597	3,380	2,175
5	3,949	2,397	2,024	2,846	3,234	2,998
6	3,456	2,591	2,380	2,825	3,507	2,766
7	2,650	2,522	2,361	2,655	4,063	2,479
8	2,120	2,881	2,566	2,515	3,626	2,296
9	2,580	2,561	2,592	3,280	3,714	2,096
10	2,505	2,345	2,209	2,595	2,963	2,105
11	3,945	2,508	2,427	2,845	3,263	1,719
12	3,455	3,492	2,438	2,820	3,536	2,458

(Fuente: Propia)

Tabla 3.7. Rugosidad en el rectificado medio.

Rectificado: Medio						
	Longitudinal			**Transversal**		
#	**851 (µm)**	**852 (µm)**	**853 (µm)**	**861 (µm)**	**862 (µm)**	**863 (µm)**
1	1,916	1,479	2,321	1,218	1,430	2,360
2	2,344	1,535	1,680	2,644	1,446	1,435
3	2,562	1,739	1,320	2,578	1,600	1,807
4	2,430	1,510	1,031	2,509	1,952	1,263
5	2,038	1,617	1,521	1,242	1,741	1,572
6	1,506	1,622	1,201	1,562	1,607	1,391
7	1,915	1,951	1,187	1,215	1,593	1,558
8	2,340	1,526	1,581	2,640	1,312	1,493
9	2,560	1,628	1,140	2,575	1,756	1,700
10	2,425	1,669	1,683	2,505	2,192	1,943
11	2,035	1,637	1,180	1,240	1,709	1,746
12	1,505	1,837	1,002	1,560	1,549	3,063

(Fuente: Propia)

Tabla 3.8. Rugosidad en el rectificado fino.

Rectificado: Fino						
	Longitudinal			**Transversal**		
#	**951 (µm)**	**952 (µm)**	**953 (µm)**	**961 (µm)**	**962 (µm)**	**963 (µm)**
1	2,653	1,436	1,444	2,681	2,183	1,547
2	2,125	1,561	1,587	2,362	1,956	1,450
3	2,400	1,705	1,482	3,170	1,890	1,181
4	2,123	1,896	1,670	3,426	2,327	1,482
5	2,319	1,575	1,227	2,929	2,106	1,296
6	1,999	1,890	1,537	3,099	1,941	1,518
7	2,360	1,393	1,423	2,680	2,084	1,414
8	2,120	1,393	1,568	2,360	2,455	1,379
9	2,395	1,768	1,442	3,165	1,491	1,354
10	2,120	1,489	1,428	3,425	2,323	1,370
11	2,315	1,550	1,411	2,925	1,795	1,357
12	1,995	1,877	1,308	3,095	2,006	1,777

(Fuente: Propia)

En la Tabla 3.9. se presenta el análisis estadístico de los datos obtenidos de rugosidad en todas las probetas.

Tabla 3.9. Resumen de datos estadísticos de rugosidad.

Rectificado: Grueso				
Probeta		**Promedio (µm)**	**Varianza**	**Desviación Estándar**
Longitudinal	**751**	2,877	0,423	0,650
	752	2,645	0,104	0,323
	753	2,365	0,027	0,164
Transversal	**761**	2,786	0,068	0,261
	762	3,446	0,129	0,360
	763	2,424	0,128	0,358
Rectificado: Medio				
Probeta		**Promedio (µm)**	**Varianza**	**Desviación Estándar**
Longitudinal	**851**	2,131	0,139	0,373
	852	1,646	0,019	0,139
	853	1,404	0,141	0,376

(Fuente: Propia)

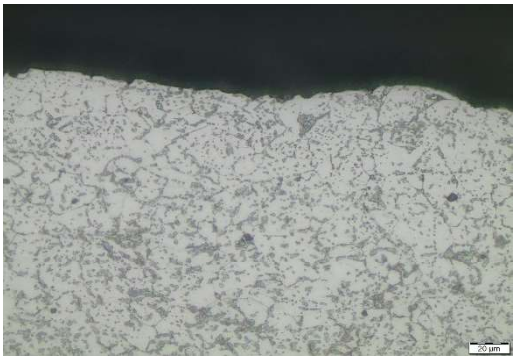
Transversal	**861**	1,957	0,432	0,657
	862	1,657	0,057	0,239
	863	1,778	0,248	0,498
Rectificado: Fino				
Probeta		**Promedio (µm)**	**Varianza**	**Desviación Estándar**
Longitudinal	**951**	2,220	0,024	0,154
	952	1,628	0,037	0,193
	953	1,491	0,015	0,121
Transversal	**961**	2,953	0,130	0,361
	962	2,046	0,069	0,263
	963	1,427	0,022	0,148

(Fuente: Propia) Continuación Tabla 3.9.

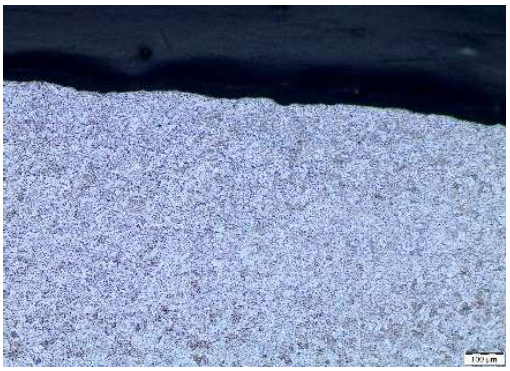
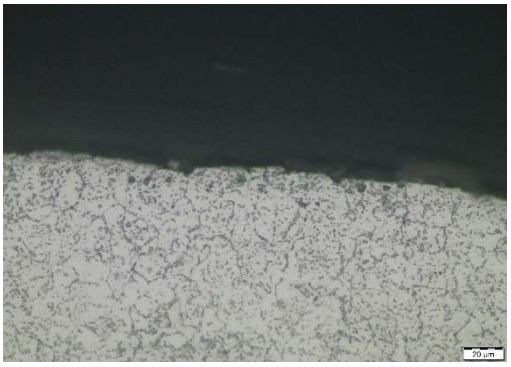
3.1.3. Metalografías material y subsuperficie rectificada

En la Tabla 3.10. se presenta la metalografía del acero AISI 420 (probetas testigo) tanto en sentido transversal como longitudinal, cabe mencionar que la toma de la metalografía se lo realiza en el borde de la superficie, con aumentos ópticos de 100x y 500x en todas las muestras, ya que es la superficie en donde se realiza el presente estudio.

Tabla 3.10. Metalografía acero AISI 420 en sus dos sentidos.

Longitudinal	
	
El metal presenta una microestructura con granos de ferrita y con carburos de cromo a lo largo de toda la probeta con el sentido de laminación del material. 100x.	Las presencias de límite de grano identifican el tipo de grano equiaxiales y los carburos de cromo en todo el material. 500x.

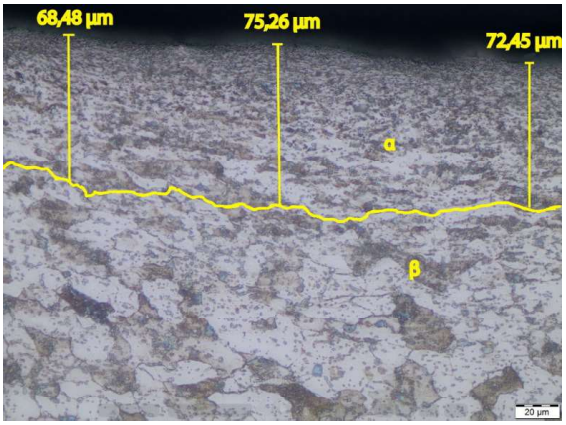
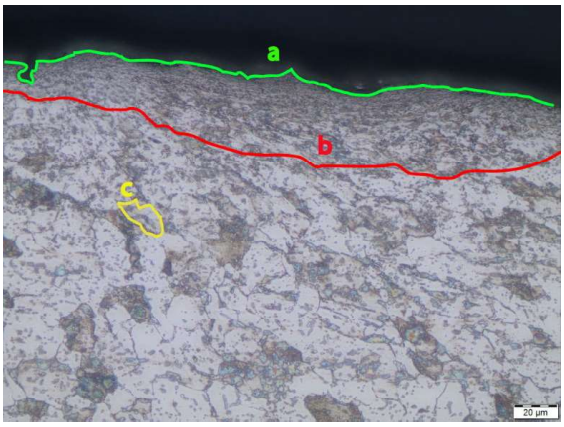
(Fuente: Propia)

Transversal	
	
El metal presenta una microestructura con granos de ferrita y carburos de cromo a lo largo de toda la probeta. 100x.	Las presencias de límite de grano identifican el tipo de grano equiaxiales y los carburos de cromo en todo el material. 500x.

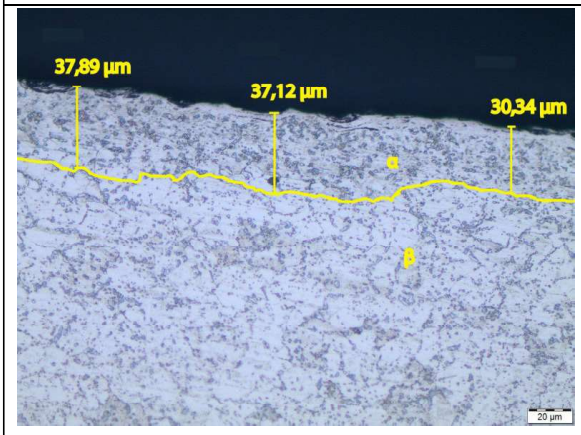
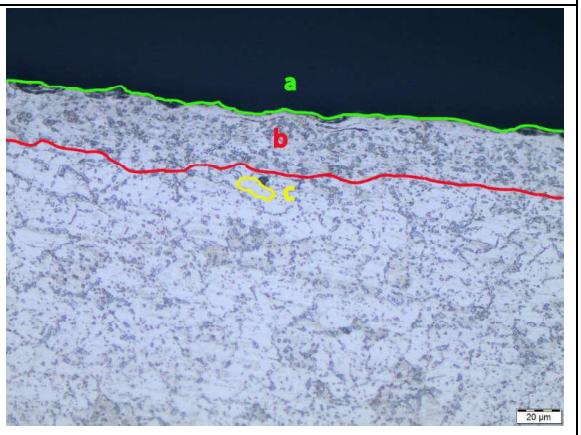
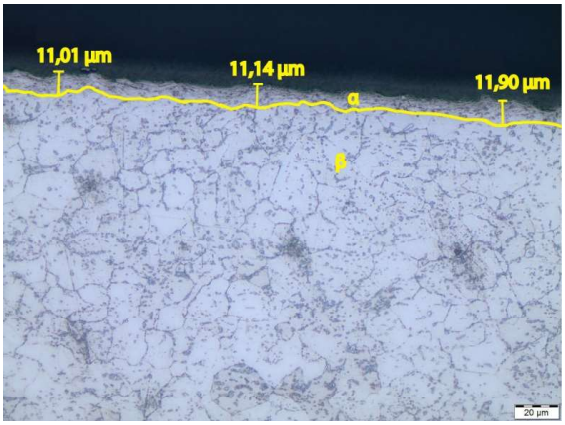
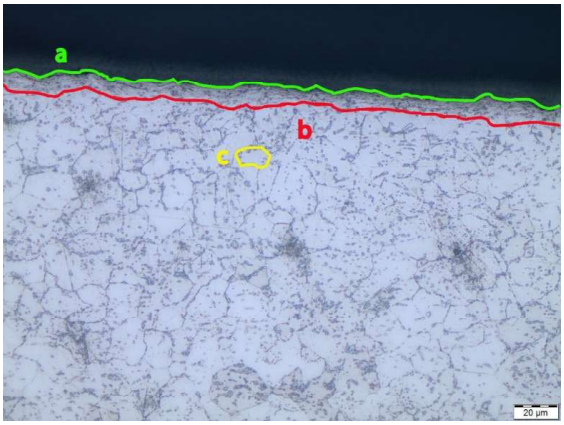
(Fuente: Propia) Continuación Tabla 3.10.

En la Tabla 3.11. se presentan micrografías de las probetas (861, 862, 863) de rectificado con disco medio, donde se indican los detalles de deformación generados en el rectificado fino, medio y grueso, además se identifican las zonas de afectación de grano. Los demás resultados se presentan en el ANEXO II.

Tabla 3.11. Micrografía de superficies rectificadas con disco medio.

Probeta: 861	
	
Rectificado grueso con una profundidad de pasada de 0,020 mm. Los granos de ferrita no presentan ningún cambio en relación al acero sin rectificar. La zona “α” es el área de grano deformado por el proceso, el cual presenta una deformación promedio de 72,06 µm. Mientras que la zona “β” es el área de grano no afectado. 500x.	El perfil “a” representa la superficie rectificada con arranque de material, el perfil “b” limita la zona en donde la probeta presenta mayor deformación de sus granos, mientras que el perfil “c” representa un grano no deformado.

(Fuente: Propia)

Probeta : 862	
	
Rectificado medio con una profundidad de pasada de 0,010 mm. Los granos de ferrita no presentan ningún cambio en relación al acero sin rectificar. La zona "α" es el área de grano deformado por el proceso, el cual presenta una deformación promedio de 35,12 µm. Mientras que la zona "β" es el área de grano no afectado. 500x	El perfil "a" representa la superficie rectificada con arranque de material, el perfil "b" limita la zona en donde la probeta presenta mayor deformación de sus granos, mientras que el perfil "c" representa un grano no deformado.
Probeta: 863	
	
Rectificado fino con una profundidad de pasada de 0,005 mm. Los granos de ferrita no presentan ningún cambio en relación al acero sin rectificar. La zona "α" es el área de grano deformado por el proceso, el cual presenta una deformación promedio de 11,35 µm. Mientras que la zona "β" es el área de grano no afectado. 500x	El perfil "a" representa la superficie rectificada con arranque de material, el perfil "b" limita la zona en donde la probeta presenta mayor deformación de sus granos, mientras que el perfil "c" representa un grano no deformado.

(Fuente: Propia) Continuación Tabla 3.11.

En la Tabla 3.12. se presenta un resumen de las mediciones y el valor promedio en micrones (µm), de las distancias de zonas de grano afectado de todas las probetas.

Tabla 3.12. Mediciones de distancia de zona de deformación.

Rectificado: Grueso					
Probeta		**Medida 1 (µm)**	**Medida 2 (µm)**	**Medida 3 (µm)**	**Promedio (µm)**
Longitudinal	**751**	35,71	43,52	29,70	36,31
	752	24,83	37,38	40,45	34,22
	753	21,50	17,28	27,52	22,10
Transversal	**761**	24,06	37,12	28,67	29,95
	762	22,40	32,77	29,44	28,20
	763	15,62	14,34	12,54	14,17
Rectificado: Medio					
Probeta		**Medida 1 (µm)**	**Medida 2 (µm)**	**Medida 3 (µm)**	**Promedio (µm)**
Longitudinal	**851**	31,10	30,85	26,11	29,35
	852	47,23	51,46	54,91	51,20
	853	39,94	41,86	44,67	42,16
Transversal	**861**	68,48	75,26	72,45	72,06
	862	37,89	37,12	30,34	35,12
	863	11,01	11,14	11,90	11,35
Rectificado: Fino					
Probeta		**Medida 1 (µm)**	**Medida 2 (µm)**	**Medida 3 (µm)**	**Promedio (µm)**
Longitudinal	**951**	113,28	151,68	112,00	125,65
	952	69,38	73,73	60,03	67,71
	953	13,70	16,77	17,28	15,92
Transversal	**961**	60,80	84,48	85,12	76,80
	962	39,68	48,38	51,20	46,42
	963	42,75	49,45	43,90	45,37

(Fuente: Propia)

3.1.4. Microdureza en zonas generadas por el rectificado

En la Figura 3.5 se presenta la distribución de las indentaciones en la probeta 862 para la obtención de datos de microdureza y las distancias de indentación en grano afectado y no afectado por el rectificado. En la Tabla 3.12. se presentan los valores de microindentaciones medidas en la escala de Vickers (HV), en donde “O1 y O3” son indentaciones lejanas a la superficie rectificada (M1), en cambio “O2 y O4” son indentaciones cercanas a la superficie rectificada (M2).

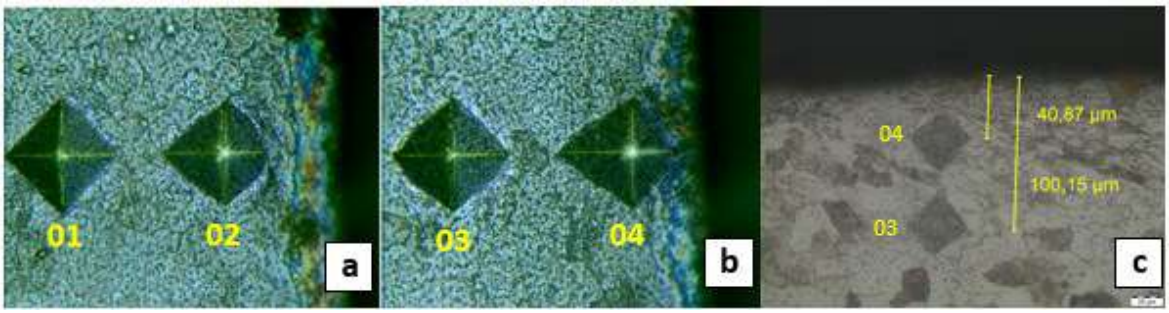


Figura 3.5. Mapeo de Microdureza Probeta 862 a) Primera parte b) Segunda parte c) Distancias.

(Fuente: Propia)

Tabla 3.13. Datos de microdureza y distancias de indentación.

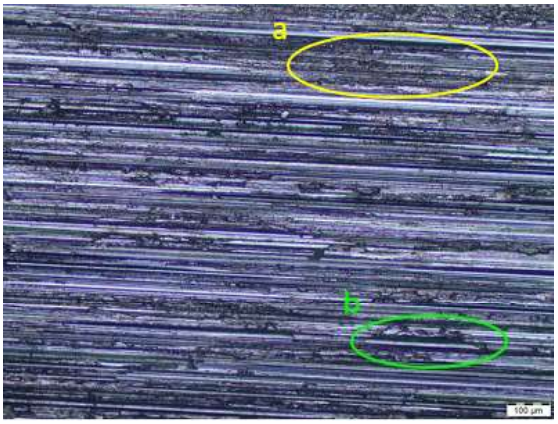
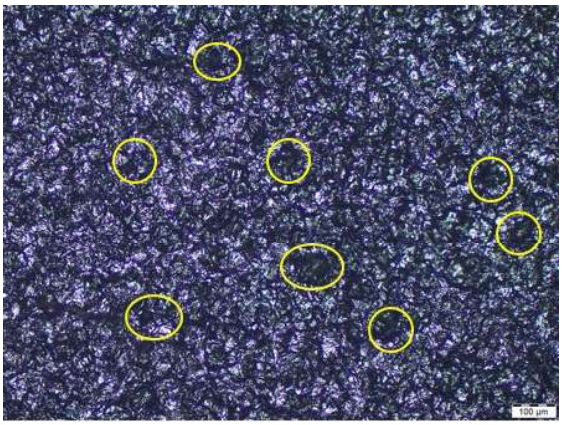
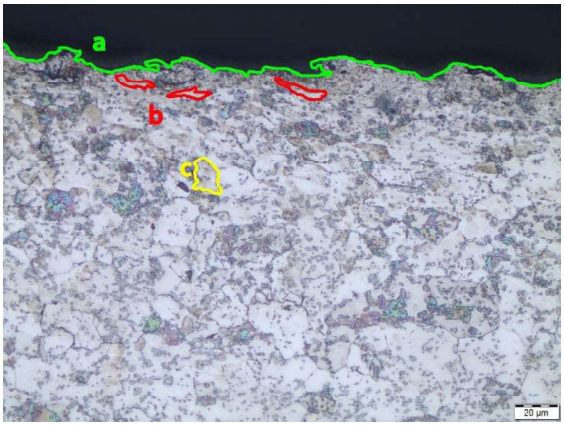
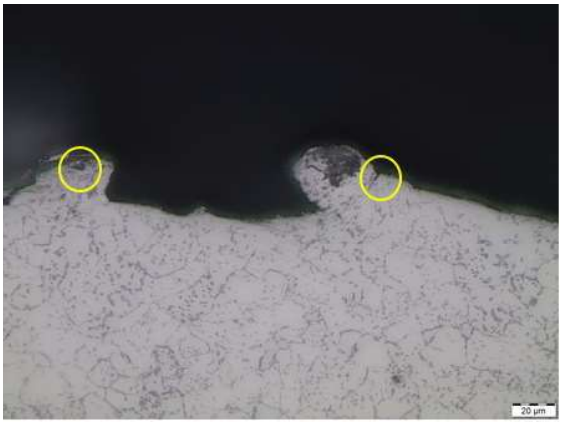
Rectificado: Grueso		**Microindentaciones (HV)**				**Distancias (µm)**	
Probeta		**01**	**02**	**03**	**04**	**M1**	**M2**
Probeta Testigo		173,50	172,68	174,86	173,48	25,72	150,65
Longitudinal	**751**	178,00	210,43	190,74	215,85	84,10	103,33
	752	224,98	234,91	245,29	239,23	39,34	96,09
	753	187,45	201,55	192,30	202,23	66,26	128,20
Transversal	**761**	208,65	220,66	206,29	230,08	22,41	86,64
	762	191,69	229,67	201,57	238,83	50,73	115,09
	763	201,87	151,66	211,53	219,57	29,05	88,53
Rectificado: Medio		**Microindentaciones (HV)**				**Distancias (µm)**	
Probeta		**01**	**02**	**03**	**04**	**M1**	**M2**
Longitudinal	**851**	221,49	235,02	194,46	209,76	46,48	104,11
	852	205,23	221,49	205,23	221,49	35,58	77,82
	853	192,93	194,12	192,28	186,44	42,58	98,80
Transversal	**861**	225,75	240,57	203,89	217,64	44,63	93,98
	862	189,22	221,87	193,24	188,95	41,61	102,78
	863	188,63	201,55	196,06	211,90	27,60	89,15
Rectificado: Fino		**Microindentaciones (HV)**				**Distancias (µm)**	
Probeta		**01**	**02**	**03**	**04**	**M1**	**M2**
Longitudinal	**951**	213,94	232,88	201,88	248,93	47,62	103,30
	952	206,25	213,64	202,22	246,24	41,37	100,35
	953	190,45	243,59	202,90	218,02	39,04	98,95
Transversal	**961**	238,84	262,23	246,71	259,32	27,86	84,59
	962	218,85	260,25	206,62	236,31	44,04	55,06
	963	217,71	247,13	209,77	242,26	100,62	104,69

(Fuente: Propia)

3.1.5. Ensayo de corrosión acelerada

En la Tabla 3.14. y 3.15. se presentan los resultados de corrosión, pérdida de masa y profundidad de picadura. En el Anexo III se presentan los resultados de las demás probetas.

Tabla 3.14. Resultado de ensayo de corrosión.

Probeta: 761	
Antes de corrosión	**Después de corrosión**
	
La superficie presenta a) aplastamiento de material y b) desprendimiento de material. A lo largo de toda la probeta se aprecian las marcas del rectificado.100x	Se presenta un serie de picaduras de diferentes dimensiones en toda la superficie rectificada, además de corrosión generalizada.100x
	
Rectificado grueso con una profundidad de pasada de 0,020 mm. Presenta granos de ferrita, sin ningún cambio en relación con el material testigo el perfil “a” representa la superficie rectificada.500x	Se presenta una pérdida de material considerable ya que el perfil de rectificado ha desaparecido y en su lugar aparecen indicios de corrosión.500x

(Fuente: Propia)

Tabla 3.15. Pérdida de masa y profundidad de picadura de las probetas corroídas.

Rectificado: Grueso		**Masa (g)**			**Profundidad picadura (µm)**			**Velocidad de corrosión (g/m^2h)**
Probeta		**M1**	**M2**	**ΔM**	**Hi**	**Hf**	**ΔH**	
Longitudinal	**751**	20,52	20,02	0,49	80,00	70,00	10,00	22,92
	752	21,02	20,51	0,52	132,00	114,00	18,00	23,84
	753	21,19	20,65	0,54	100,00	86,00	14,00	24,77
Transversal	**761**	20,59	19,99	0,61	112,00	86,00	26,00	28,01
	762	21,21	20,67	0,53	89,00	80,00	9,00	24,77
	763	21,12	20,55	0,57	112,00	96,00	16,00	26,16
Rectificado: Medio		**Masa (g)**			**Profundidad picadura (µm)**			**Velocidad de corrosión (g/m^2h)**
Probeta		**M1**	**M2**	**ΔM**	**Hi**	**Hf**	**ΔH**	
Longitudinal	**851**	20,52	19,99	0,54	101,00	85,00	16,00	24,77
	852	20,99	20,49	0,49	106,00	82,00	24,00	22,92
	853	21,13	20,63	0,50	100,00	78,00	22,00	23,15
Transversal	**861**	20,28	19,74	0,54	82,00	62,00	20,00	24,77
	862	20,83	20,31	0,52	56,00	38,00	18,00	24,07
	863	20,71	20,20	0,50	101,00	88,00	13,00	23,38
Rectificado: Fino		**Masa (g)**			**Profundidad picadura (µm)**			**Velocidad de corrosión (g/m^2h)**
Probeta		**M1**	**M2**	**ΔM**	**Hi**	**Hf**	**ΔH**	
Longitudinal	**951**	20,57	20,07	0,50	188,00	176,00	12,00	23,15
	952	21,10	20,59	0,50	130,00	113,00	17,00	23,38
	953	21,20	20,65	0,55	178,00	160,00	18,00	25,23
Transversal	**961**	20,88	20,31	0,57	40,00	28,00	12,00	26,39
	962	21,21	20,67	0,53	108,00	88,00	20,00	24,77
	963	20,95	20,43	0,52	110,00	92,00	18,00	24,07

(Fuente: Propia)

3.1.6. Ensayo de rugosidad en superficie corroída

En la Tabla 3.16. se presentan los valores de rugosidad promedio (Ra), medidos luego de la exposición de las probetas en un ambiente corrosivo.

Tabla 3.16. Rugosidad en superficie rectificada sometida a corrosión.

Rectificado: Grueso		**Antes de corrosión (µm)**		**Después de corrosión (µm)**	
Probeta		**M1**	**M2**	**M1**	**M2**
Longitudinal	**751**	2,583	2,509	3,277	3,510
	752	2,591	2,522	3,951	3,942
	753	2,380	2,361	3,689	3,409
Transversal	**761**	3,283	2,597	3,833	3,496
	762	3,507	4,063	4,477	4,163
	763	2,766	2,479	3,754	3,882
Rectificado: Medio		**Antes de corrosión (µm)**		**Después de corrosión (µm)**	
Probeta		**M1**	**M2**	**M1**	**M2**
Longitudinal	**851**	2,562	2,430	3,322	3,467
	852	1,622	1,951	3,533	4,371
	853	1,201	1,187	4,801	3,519
Transversal	**861**	2,578	2,509	3,131	3,792
	862	1,607	1,593	3,895	4,046
	863	1,391	1,558	4,091	3,728
Rectificado: Fino		**Antes de corrosión (µm)**		**Después de corrosión (µm)**	
Probeta		**M1**	**M2**	**M1**	**M2**
Longitudinal	**951**	2,400	2,123	3,942	4,039
	952	1,890	1,393	4,060	3,817
	953	1,537	1,423	3,657	4,516
Transversal	**961**	3,170	3,426	3,377	4,288
	962	1,941	2,084	4,076	3,711
	963	1,518	1,414	3,315	3,996

(Fuente: Propia)

3.2. Discusión

En este apartado se realiza el análisis de los resultados mostrados y se determina los parámetros adecuados para el rectificado del acero AISI 420.

3.2.1. Proceso de rectificado

En la Figura 3.6 se presentan diagramas de caja con los valores de temperatura correspondientes a las probetas en sentido longitudinal y transversal, incluyendo los cuartiles (divisiones que indican la tendencia de los valores con respecto a la mediana), la posición de la mediana y los bigotes (líneas que se extienden hasta un valor mínimo y

máximo), indicando la variación de temperatura durante el proceso de rectificado del AISI 420, de acuerdo al sentido de laminación del material, variación del disco de rectificado y profundidad de pasada. La mayor temperatura del presente estudio es de 100,1 °C con profundidad de pasada 0,020 mm (probeta 751). Según (Kalpakjian & Schmid, 2008) la temperatura pico durante el rectificado que se puede alcanzar es de 1600 °C y debido a que las virutas transfieren gran parte del calor producido, solo se transfiere a la pieza de trabajo una fracción de este calor. Por otra parte, esta temperatura, al ser verificada con la Figura 1.2 Diagrama TTT AISI 420, se comprueba que no precipita martensita (M_s y M_f), en consecuencia, no existe un cambio de fase en el acero durante el proceso de rectificado.

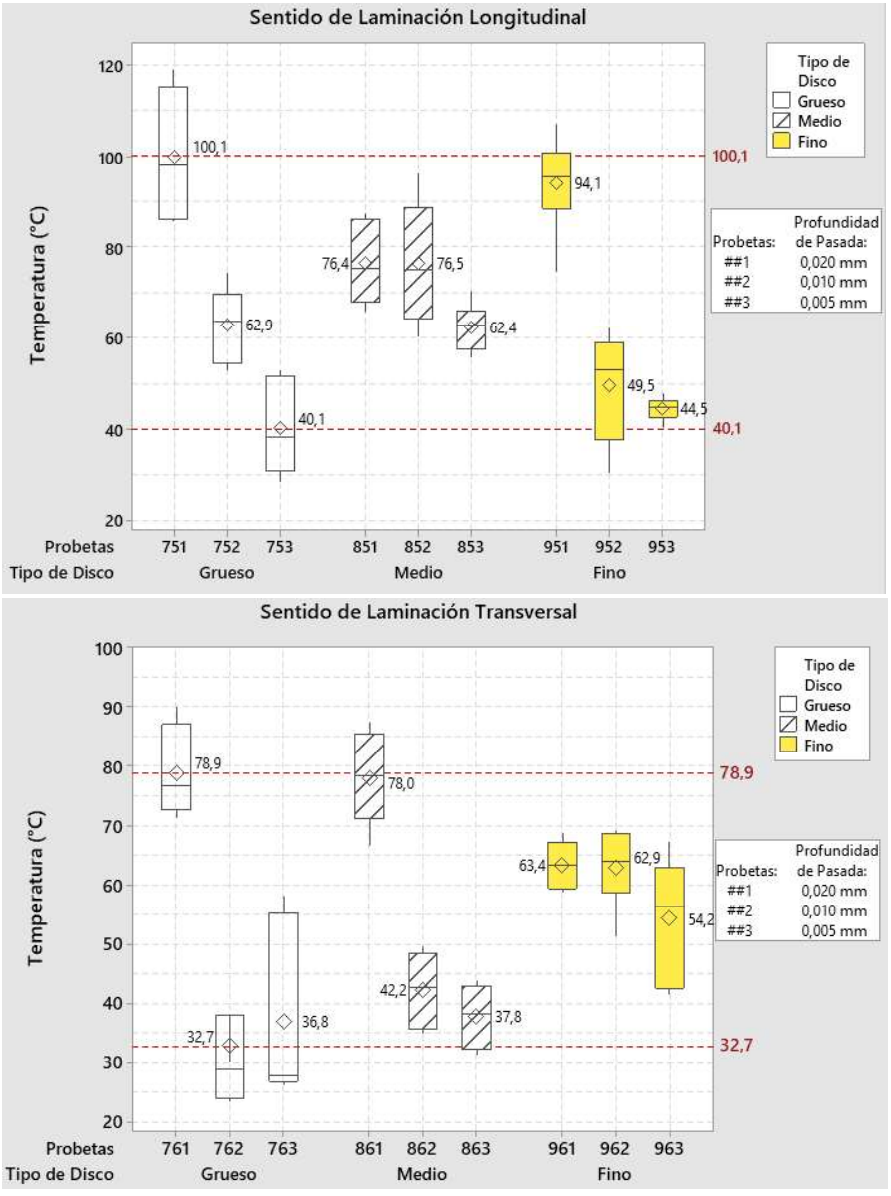


Figura 3.6. Diagrama de caja de la variación de temperatura durante el proceso de rectificado.

(Fuente: Propia)

El aumento de la temperatura superficial en el rectificado, de acuerdo con (Kalpakjian & Schmid, 2008) se relaciona con las variables del proceso, es decir, la temperatura se eleva al aumentar la profundidad de pasada, el diámetro y velocidad del disco, y disminuye al incrementarse la velocidad de la pieza de trabajo. En la Figura 3.7 se muestra la relación que existe entre la temperatura y profundidad de pasada, es decir, cuando se aumenta la profundidad de pasada, la temperatura del proceso de rectificado también aumenta, por ende, presentan una pendiente positiva en ambos sentidos de laminación. Sin embargo, se aprecia que existe mayor temperatura en el proceso de rectificado cuando el sentido de laminación es longitudinal, en comparación al sentido transversal.

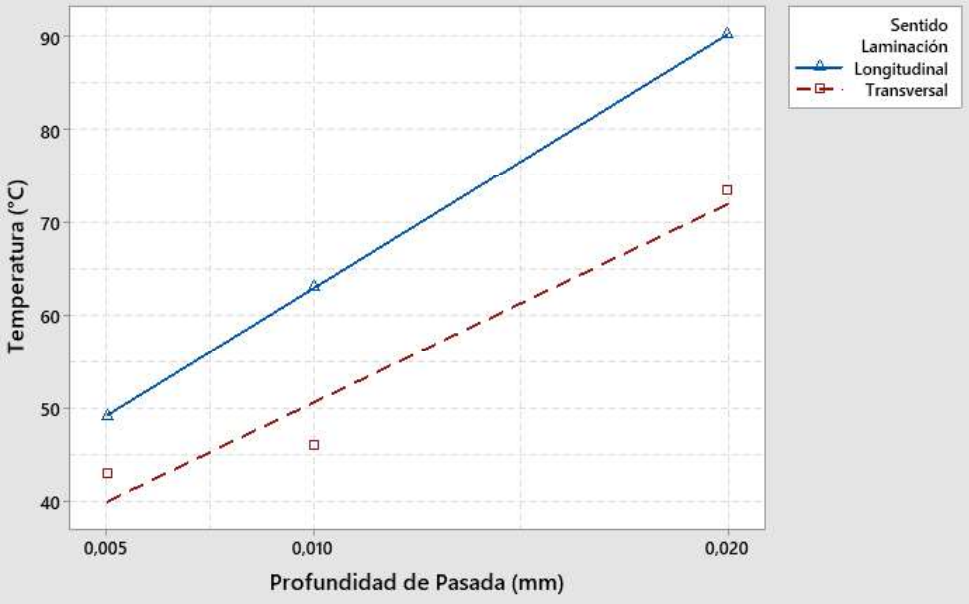


Figura 3.7. Tendencia de temperatura vs. profundidad de pasada.

(Fuente: Propia)

En cuanto a los defectos generados en la superficie rectificada del acero AISI 420 (Tabla 3.5.), se evidencian marcas o surcos formados por la herramienta de corte que son palpables y visibles a simple vista, conforme a (Schneider & Sappert, 1990), estos surcos son leves o profundos y varían según el disco de rectificado. Además, en el rectificado con disco grueso de la probeta 761, los surcos son profundos y con mayor desprendimiento de material en comparación al rectificado con disco medio de la probeta 861 y con disco fino de la probeta 961, que presentan marcas leves con poco desprendimiento y aplastamiento de material, tal como se presenta en la Tabla 3.5. Sin embargo, la probeta 963 presenta indicios de quemaduras no muy significativas (color marrón y negro) ANEXO I, ya que una quemadura en los aceros se caracteriza por tener colores azulados (Malkin & Guo, 2008).

3.2.2. Ensayo de rugosidad

En la Figura 3.8 se presenta un diagrama de barras con los valores de rugosidad obtenidos al usar distintos discos de rectificado, profundidad de pasada y sentido de laminación del material. Para las probetas paralelas al sentido de laminación, la rugosidad oscila de 1,2 a 2,6 (µm), por otro lado, las probetas perpendiculares al sentido de laminación, el valor de rugosidad esta entre 1,5 a 3,8 (µm), dichos resultados al verificar la Figura 1.15 indican que la rugosidad global del proceso se encuentra en el rango de 1,5 a 2,6 (µm), que según el código (ASME B46.1, 2009) el rango corresponde a una aplicación menos frecuente del proceso de rectificado. Sin embargo, en las probetas 953 y 963 (rectificado con disco fino y profundidad de pasada 0,005 mm) y la probeta 853 (rectificado con disco fino y profundidad de pasada 0,005 mm) se tiene que la aplicación es de tipo promedio para este proceso de rectificado.

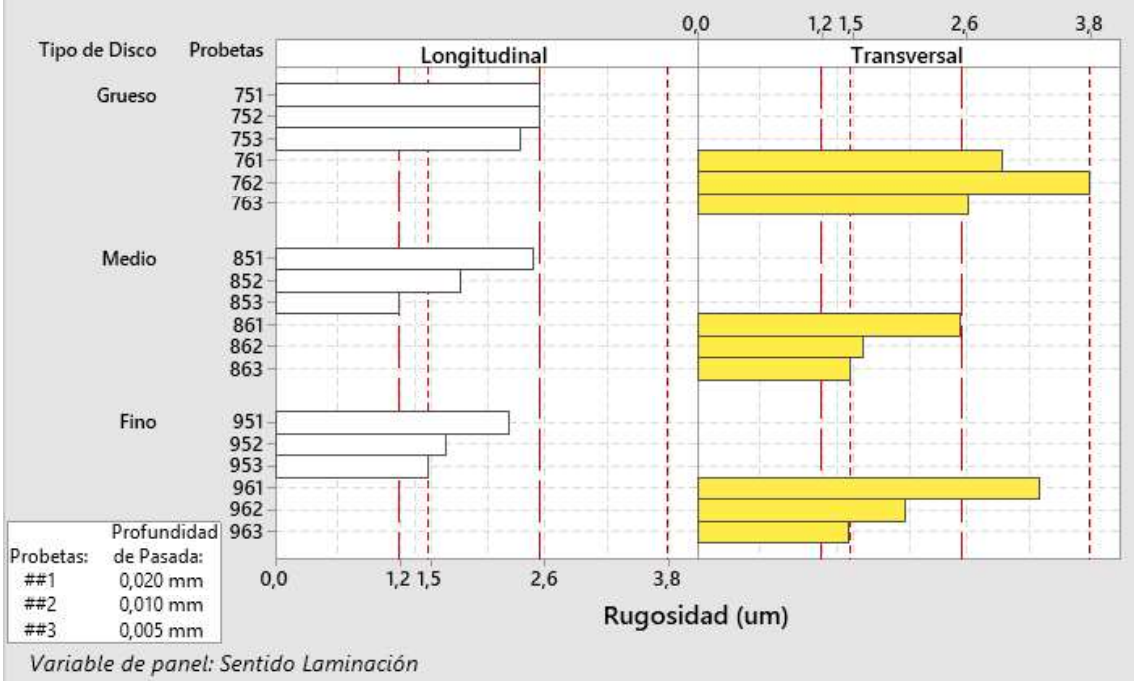


Figura 3.8. Diagrama rugosidad vs. proceso de rectificado.

(Fuente: Propia)

Cabe añadir que el código ASME B46.1, 2009, señala que la rugosidad de la superficie rectificada depende de: velocidad de avance, tamaño de grano, material aglutinante, velocidad del disco de rectificado, así como de la cantidad y el tipo de lubricación. En la Figura 3.9 se tiene que a tamaño de grano grueso, la rugosidad es mayor, como ejemplo se tiene el disco de rectificado grueso (A 24 RVS) con el cual se tienen valores de rugosidad altos (3,6 µm).

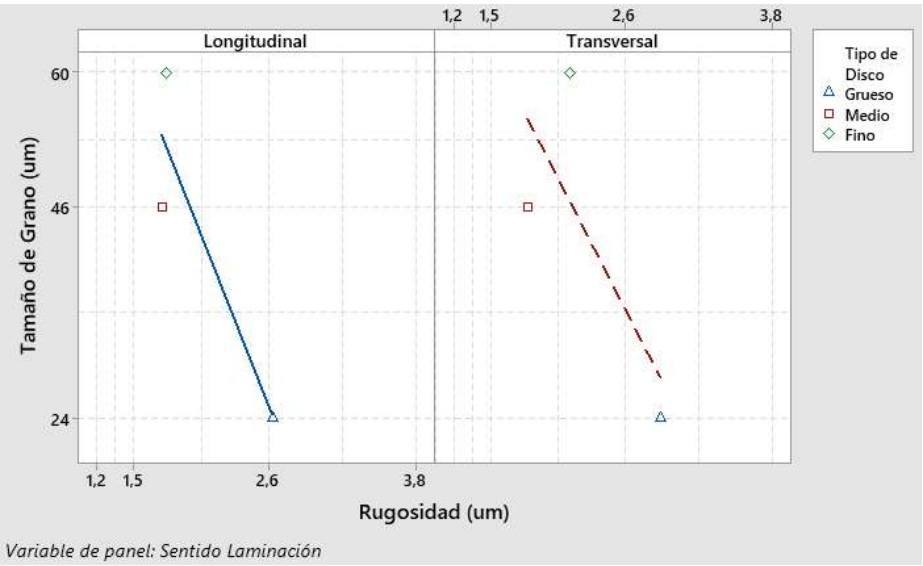


Figura 3.9. Tendencia de tamaño de grano vs. rugosidad.

(Fuente: Propia)

De acuerdo con (Marinescu, Hitchiner, Uhlmann, Rowe, & Inasaki, 2016) la rugosidad depende del disco de rectificado conjuntamente con la interacción de la velocidad de corte y la profundidad de pasada, como se presenta en la Figura 3.10, obteniéndose una pendiente positiva entre la profundidad de pasada y la rugosidad, que revela un comportamiento directamente proporcional, es decir, a mayor profundidad de pasada, mayor es la rugosidad de la superficie rectificada o viceversa, independiente al sentido de laminación del material. Por ejemplo, para una rugosidad entre 1,2 y 2,6 (µm) se pueden utilizar discos finos y medios con profundidad de pasada entre 0,005 y 0,010 (mm).

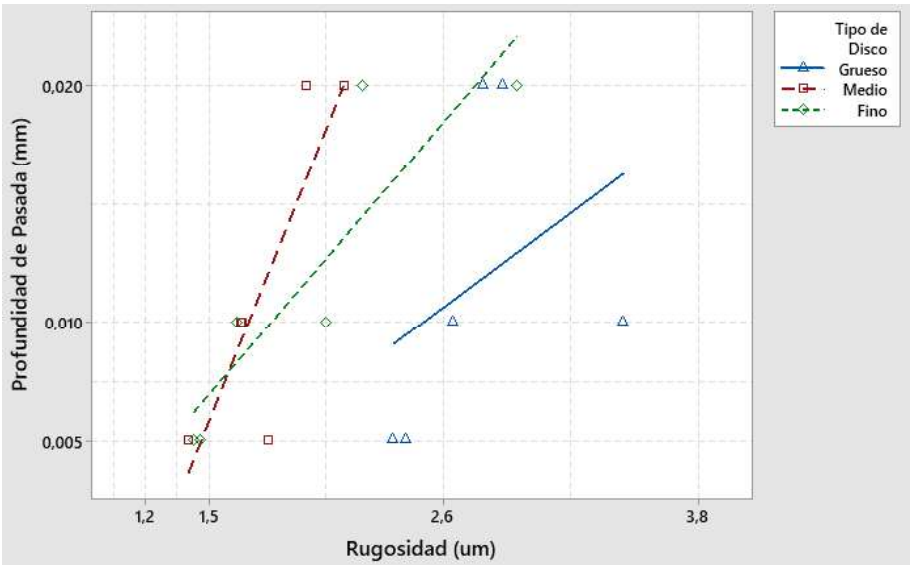


Figura 3.10. Profundidad de pasada vs. rugosidad, considerando el tipo de disco de rectificado.

(Fuente: Propia)

3.2.3. Metalografías material y subsuperficie rectificada

El acero AISI 420 utilizado en este trabajo, presenta una microestructura con granos de ferrita y la presencia de carburos de cromo dispersos, los cuales se forman en el proceso de solidificación, además, se observa que la formación de estos granos equiaxiales se presenta a lo largo de todo el material. En la Figura 3.11. a) se presenta la metalografía obtenida para la realización de este trabajo previo a ser maquinado y b) la metalografía presentada por (ASM Handbook, 2004) que, al ser comparadas, se puede determinar que corresponde a un acero AISI 420 sin ningún tipo de tratamiento térmico.

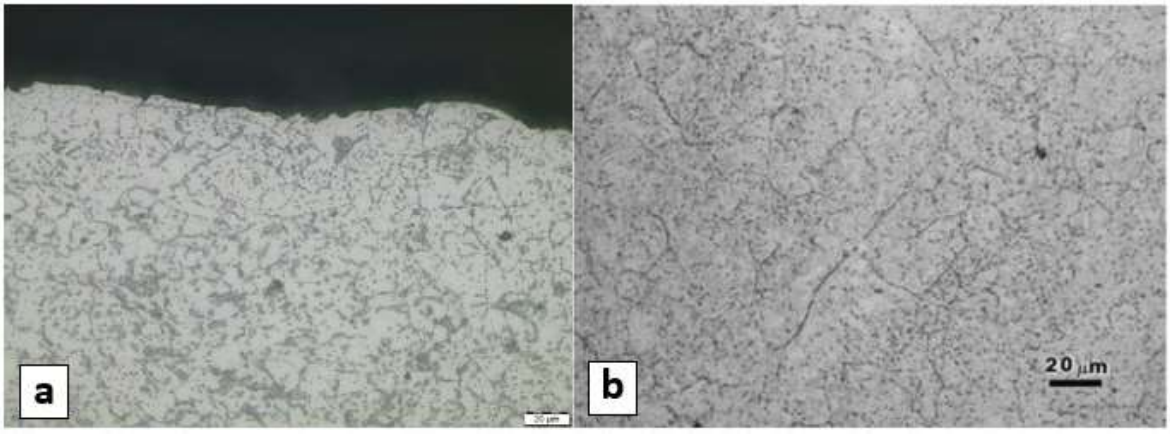


Figura 3.11. Microestructura del acero AISI 420 a) acero utilizado para trabajo sin maquinar, b) acero martensítico.
(Fuente: Propia, ASM Handbook, 2004)

En la Figura 3.12.a se muestra la metalografía del acero AISI 420 maquinado, el cual presenta una zona de deformación con espesor promedio de 36,31 µm en la subsuperficie comprendida entre la superficie rectificada y el límite de los granos no deformados, cabe añadir que esta zona no es homogénea por los defectos presentes en la superficie, como: surcos, desprendimiento y aplastamiento del material. La Figura 3.12.b presenta el perfil de rectificado “a” donde es notorio (a comparación de la Figura 3.11.a acero sin rectificar) el desprendimiento del material y la deformación de los granos “c” que pasan de ser equiaxiales a alargados “b”, debido a la fuerza de rectificado en función de la profundidad de pasada. Según (Groover, 2014) la fuerza de rectificado puede determinarse en función del diámetro y la velocidad del disco, la velocidad de avance, la anchura de corte (espesor del disco), y principalmente la profundidad de pasada y la energía específica (energía requerida para remover cada unidad de volumen de material), deformando así los granos ferríticos. Esta deformación se presenta en la totalidad de probetas tanto en el sentido longitudinal como transversal.

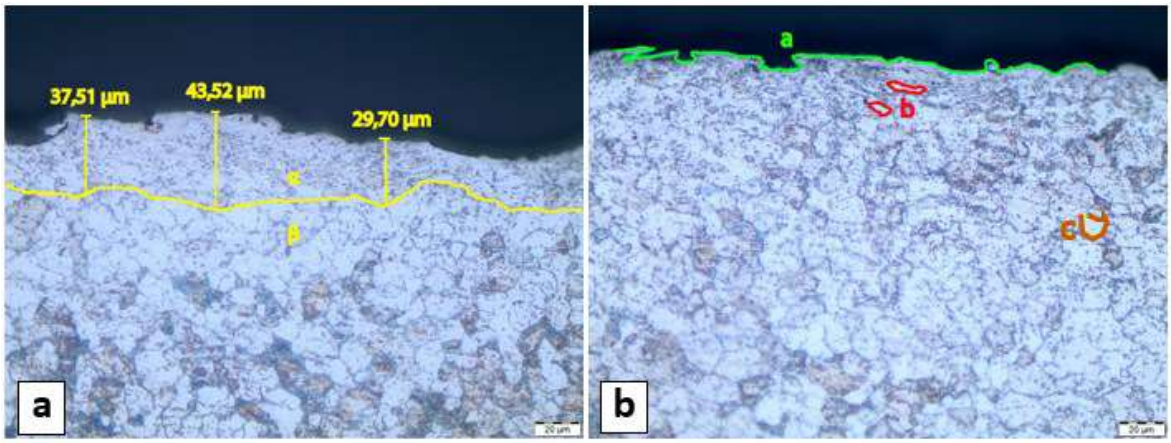


Figura 3.12. Microestructura acero AISI 420 rectificado a) profundidad de deformación, b) perfiles de deformación.

(Fuente: Propia)

En la Tabla 3.12., se presentan los valores de deformación en la subsuperficie obtenidos cuando la fuerza de rectificado aplicada es 17,35, 8,68 y 4,35 (Newton) y la profundidad de pasada es de 0,020, 0,010 y 0,005 (mm), respectivamente (ANEXO IV), de acuerdo a (Kalpakjian & Schmid, 2008) para un disco de diámetro 10 x 1 (pulg) con una profundidad de pasada de 0,002 pulg (0,050 mm) la fuerza aplicada es de 32,9 Newton. Notando así que para una profundidad de pasada mayor se tiene una fuerza de rectificado resultante mayor.

3.2.4. Microdureza en zonas generadas por el rectificado.

En el presente estudio la afectación de la integridad superficial del acero AISI 420 se ve reflejada en el aumento de microdureza, la cual indica un incremento en la resistencia a la deformación plástica, como afirman (Shichao, Minghe, Jianhen, & Xiuming, 2015) la fuerza de rectificado aplicada por el disco en la superficie del acero, induce un gran número de dislocaciones en el material que se acumulan en el área de contacto y aumentan de manera rápida, generando un efecto de fortalecimiento y refinamiento de grano, como se presenta en la Figura 3.12.b.

En la Figura 3.13 se muestra un diagrama de caja con los valores de microdureza para las probetas paralelas al sentido de laminación que están entre 191,44 y 236,10 (HV), mientras que para las probetas perpendiculares al sentido de laminación se tiene entre 198,32 y 251,78 (HV), dichos valores superan la microdureza del acero AISI 420 sin rectificar, el cual registra un valor de 173,49 HV. Por tal razón, esta alteración de microdureza (endurecimiento por deformación de la superficie maquinada), es uno de los factores que afecta la integridad superficial. Cabe mencionar que se tienen valores de microdureza

mayores en el sentido de laminación transversal que en el longitudinal, de acuerdo con (Fargas, Anglada, & Mateo, 2002) señalan que estas diferencias en las propiedades mecánicas depende de la orientación que se considere, debido a que el proceso de laminación induce unas orientaciones cristalográficas preferentes (anisotropía cristalográfica).

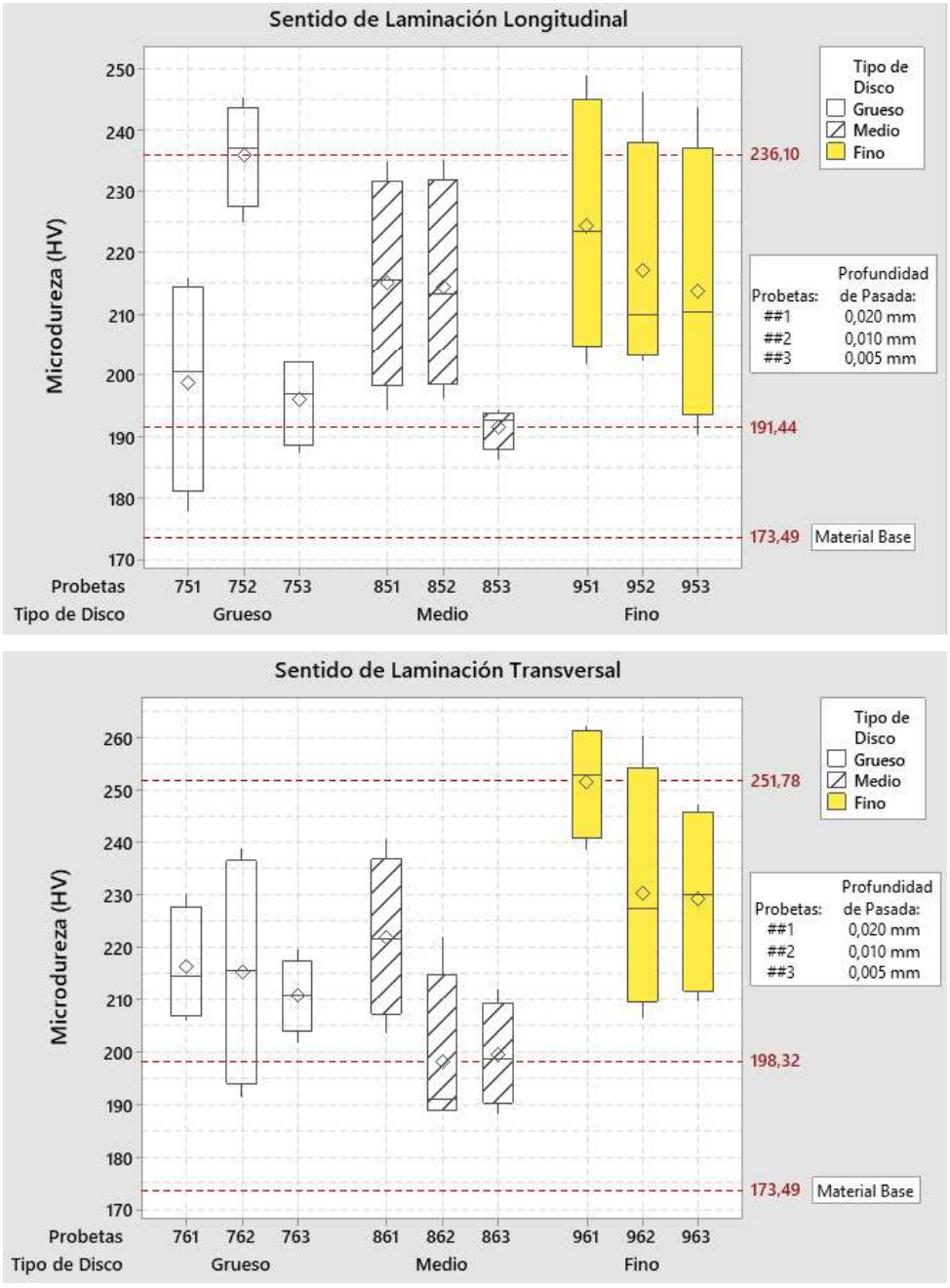


Figura 3.13. Diagrama de caja microdureza en zonas de deformación.

(Fuente: Propia)

Además, en la Figura 3.14 se presenta la tendencia entre microdureza y distancia de indentación que comprueba el efecto de fortalecimiento en la zona de deformación de

grano, es decir cuando la indentación es cercana a la superficie rectificada la microdureza es mayor.

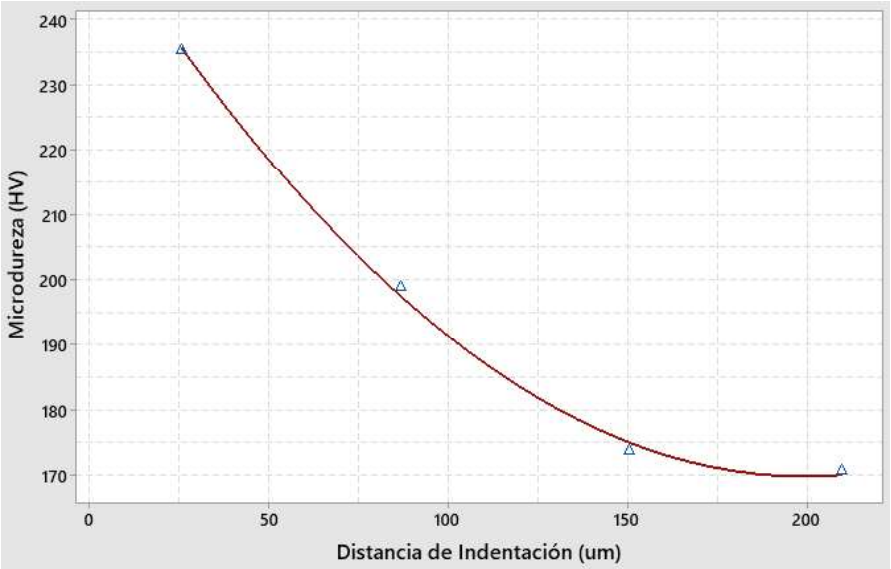


Figura 3.14.Tendencia de microdureza vs. distancia de indentación.

(Fuente: Propia)

Por otra parte, como mencionan (Shichao, Minghe, Jianhen, & Xiuming, 2015) la dureza del material aumenta con la disminución del tamaño de partícula del disco de rectificado, tal como se observa en la Figura 3.15. Por ejemplo, al usar un disco de rectificado fino la microdureza es mayor que cuando se usa un disco de rectificado grueso; por tal razón la probeta 961 rectificada con disco fino, presenta el valor de microdureza de 251,78 HV.

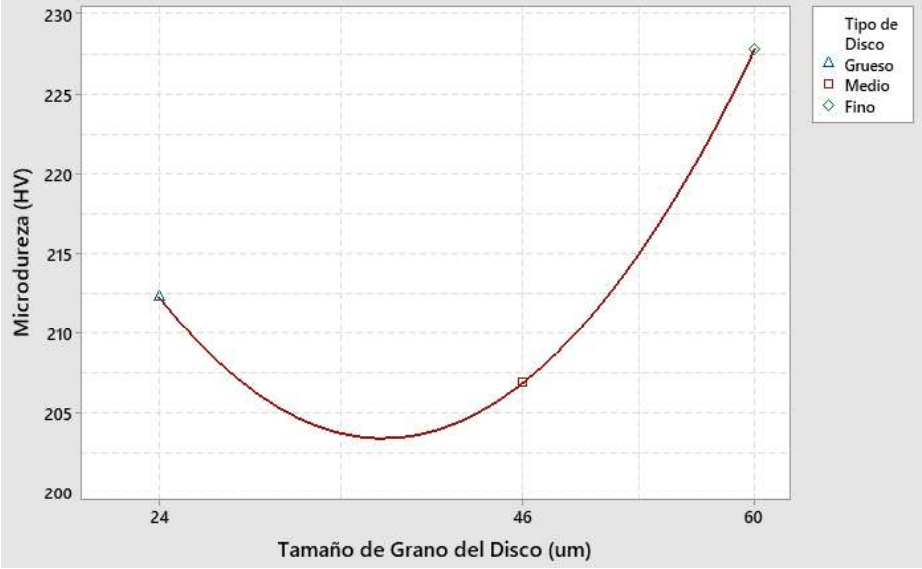


Figura 3.15. Tendencia microdureza vs. tamaño de grano disco de rectificado.

(Fuente: Propia)

Además, al realizar un análisis de microdureza y la profundidad de pasada, (Shichao, Minghe, Jianhen, & Xiuming, 2015) mencionan que con una velocidad de corte constante y variando los parámetros como velocidad de avance y profundidad de pasada, el cambio de la dureza de la superficie no es considerable con pequeñas profundidades de pasada (valores en micrones), pero si son mayores, la dureza es considerable. Por ello en este estudio, para una velocidad de corte y avance constante variando la profundidad de pasada, la Figura 3.16 indica, que la línea de tendencia es independiente del sentido de laminación, por ser la misma en ambos casos, obteniendo un comportamiento directamente proporcional a la profundidad de pasada, si aumenta este parámetro, la microdureza también aumenta o viceversa; del mismo modo, se destaca que el disco de rectificado fino genera valores de microdureza superiores a los discos medio y grueso.

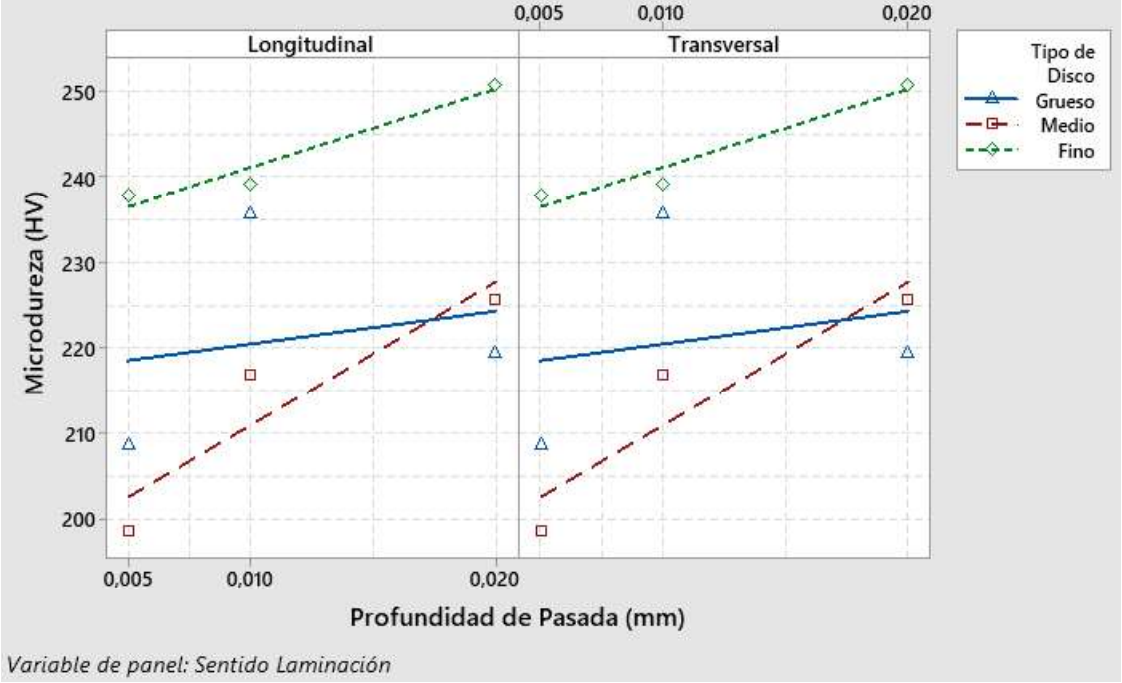


Figura 3.16. Tendencia microdureza vs. profundidad de pasada.

(Fuente: Propia)

Finalmente, al comparar la microdureza con la rugosidad, Field M., Kahles J. y Koster W. (ASM Handbook, 1989) mencionan que los efectos sobre la integridad superficial y el rendimiento de la superficie en servicio, implica el estudio y control de la rugosidad de la superficie, por tal razón, la Figura 3.17 muestra que en los dos sentidos de laminación existe un comportamiento directamente proporcional, entre la rugosidad y la microdureza, es decir, aumenta o disminuye. Cabe destacar que existe una notable variación de la pendiente entre microdureza y rugosidad al cambiar el disco de rectificado.

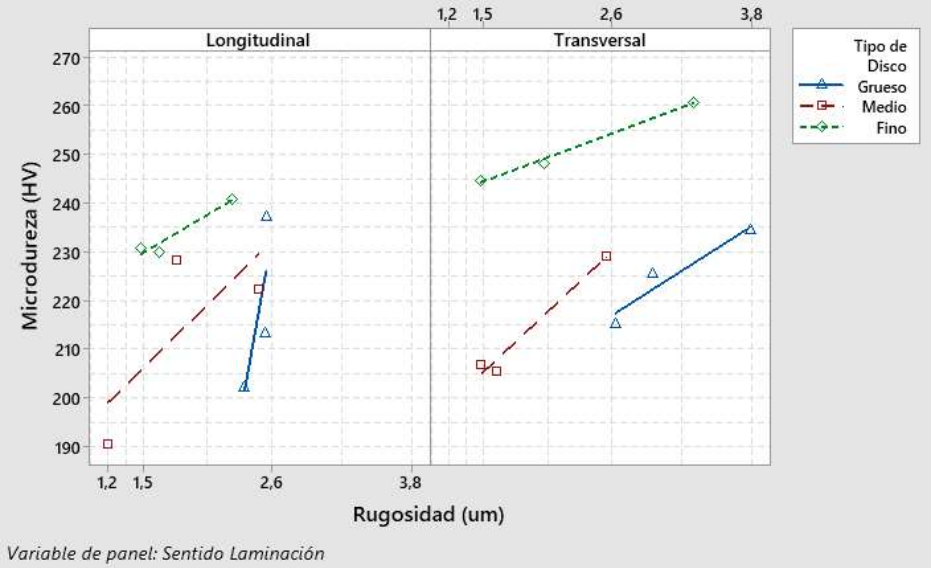


Figura 3.17. Tendencia microdureza vs. rugosidad superficie rectificada.

(Fuente: Propia)

3.2.5. Análisis de corrosión

Mediante los parámetros establecidos en este trabajo, se analiza cual es la superficie rectificada más resistente a la corrosión en un medio altamente corrosivo. Donde se evidencia la presencia de corrosión por picaduras, que de acuerdo a Hilti Corporation 2015 y ASTM G46, 2018, para que exista este tipo de corrosión en un acero inoxidable, la capa pasiva de óxido de cromo que brinda resistencia a la corrosión, debe ser desprendida ya sea por maquinado o pulido. Por tanto, debido al proceso de rectificado la capa pasiva del acero AISI 420 es retirada y lo vuelve más propenso a la corrosión por picadura. Las picaduras pueden ser iniciadas por un pequeño defecto superficial donde se deposita un ion cloruro, de tal manera que este defecto superficial actúa como ánodo y el resto de la superficie como cátodo, por tal razón la concentración de oxígeno en el ánodo es cero y todas las reacciones catódicas de oxígeno ocurren en la superficie metálica provocando una rápida disolución del metal en el ánodo.

(Uhlig & Revie, 2011) mencionan que los aceros inoxidables martensíticos presentan mejor resistencia a la corrosión cuando son templados a menos de 425 °C. Sin embargo, al realizar este trabajo las probetas no sufren ningún tipo de tratamiento térmico, y las temperaturas alcanzadas durante el rectificado no superan los 119 °C, lo cual indica que no hubo un cambio en su matriz ferrítica, de tal manera que al ser sometidas las probetas rectificadas a un medio corrosivo, se identifican indicios de corrosión por picadura y la pérdida del material debido a la disminución de la capa de grano deformado por el rectificado.

3.2.6. Análisis de pérdida de masa

En la Figura 3.18 se presenta un diagrama de barras con los datos de pérdida de masa correspondientes a cada probeta, luego de un ensayo de corrosión acelerada. La pérdida de masa varía entre 0,50 y 0,60 (g), tanto en el sentido paralelo a la laminación como perpendicular. Sin embargo, se puede observar que la probeta 761 (sentido de laminación transversal y profundidad de pasada de 0,020 mm), rectificada con un disco grueso, alcanza un valor máximo de pérdida de masa de 0,61 gramos. Los surcos profundos generados por el rectificado facilitan la corrosión, debido a las zonas que han sido marcadas mecánicamente (Hilti Corporation, 2015).

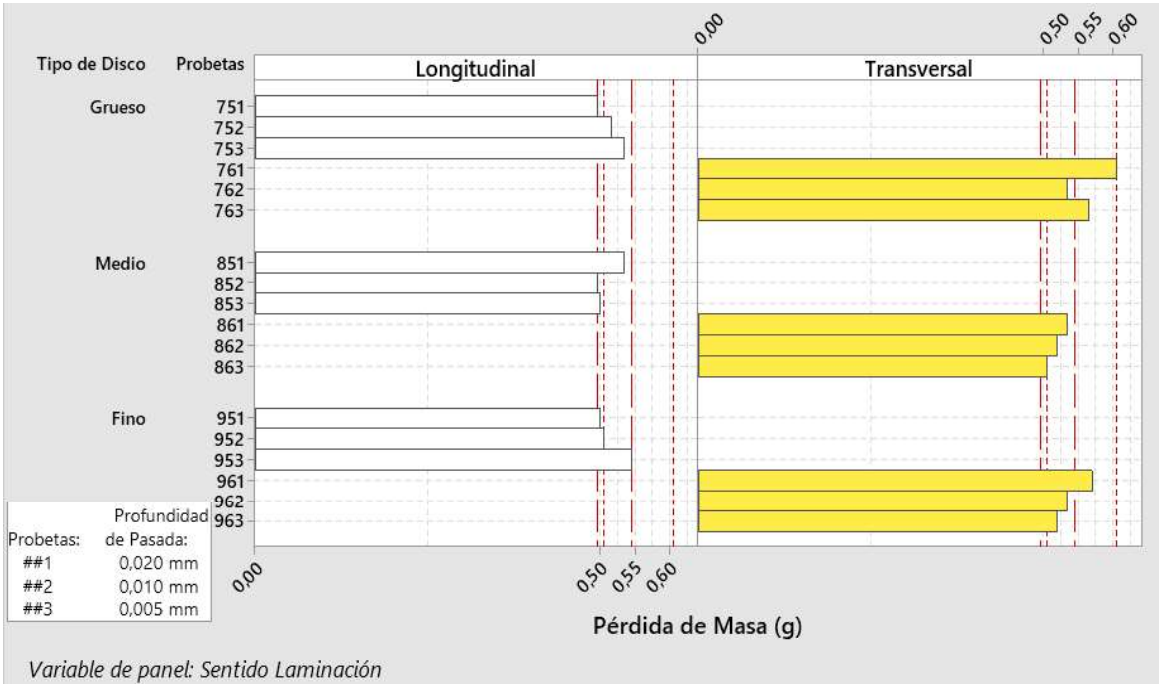


Figura 3.18. Pérdida de masa debido a la corrosión por picadura.

(Fuente: Propia)

De acuerdo con (Uhlig & Revie, 2011) estos surcos permiten que la solución férrica se deposite con mayor facilidad en la superficie, generando así picaduras con mayor profundidad tal como se presenta en la Figura 3.19, donde la probeta 761 indica picaduras más profundas de hasta 26 µm, que justifica de esta manera la pérdida de masa.

Ante lo mencionado, en la Figura 3.20 se presenta la relación entre la pérdida de masa generada por la corrosión por picadura y la profundidad de la misma, donde el comportamiento es directamente proporcional, es decir, al aumentar la profundidad de picadura, el acero pierde mayor masa.

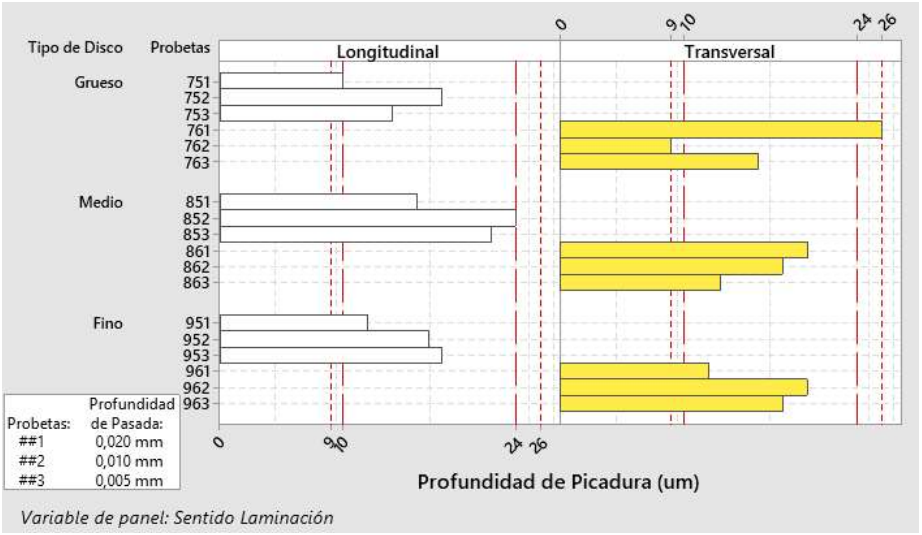


Figura 3.19. Profundidad de picadura generada por la corrosión.

(Fuente: Propia)

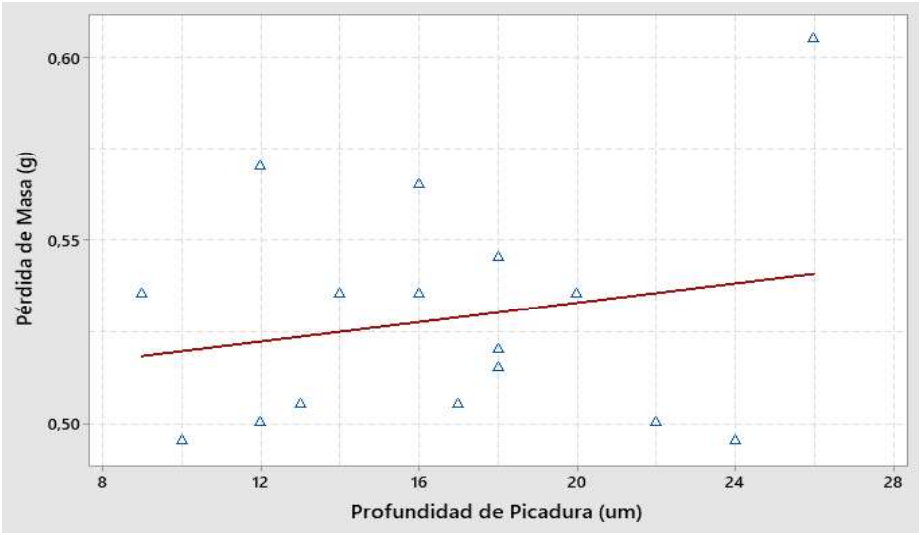


Figura 3.20. Tendencia pérdida de masa vs. profundidad de picadura.

(Fuente: Propia)

3.2.7. Ensayo de rugosidad en superficie corroída

El incremento de rugosidad posterior al ensayo de corrosión, como mencionan (Kalpakjian & Schmid, 2008) se debe a que la resistencia a la corrosión se ve fuertemente influida por la naturaleza de la superficie producida, durante su investigación (Toloei, Stoilov, & Northwood, 2013) establecieron que la relación entre rugosidad y corrosión, se ve afectada por superficies rugosas con surcos más profundos y menor apertura, que limitan la difusión de iones corrosivos fuera de los surcos formados, por ende tienen mayor posibilidad de corrosión. Sin embargo, en superficies menos rugosas es posible que se forme una película pasiva estable, que disminuye la corrosión.

Por tal razón, las superficies rectificadas con disco grueso presentan mayor incremento de la rugosidad después del ensayo de corrosión, ya que antes del mismo existían surcos más profundos, mientras que en las superficies rectificadas con los discos medio y fino, la profundidad de los surcos generados es menor, disminuyendo la corrosión. En las Figuras 3.21, 3.22 y 3.23 se detalla un ejemplo de rugosidad antes y después de corrosión, para cada uno de los discos.

En la Figura 3.21 se observa que la rugosidad para la probeta 753 sentido longitudinal presenta un valor de 2,371 µm antes de la corrosión, y alcanza un valor de 3,549 µm después de la corrosión, que representa un incremento del 33,19%. Para la probeta 762 sentido transversal se registra un valor de rugosidad de 3,785 µm antes de la corrosión, alcanzando un valor de 4,320 µm después del ensayo de corrosión, con un incremento del 12,38%, se nota que el valor de rugosidad máximo luego del ensayo de corrosión con disco grueso es de 4,320 µm.

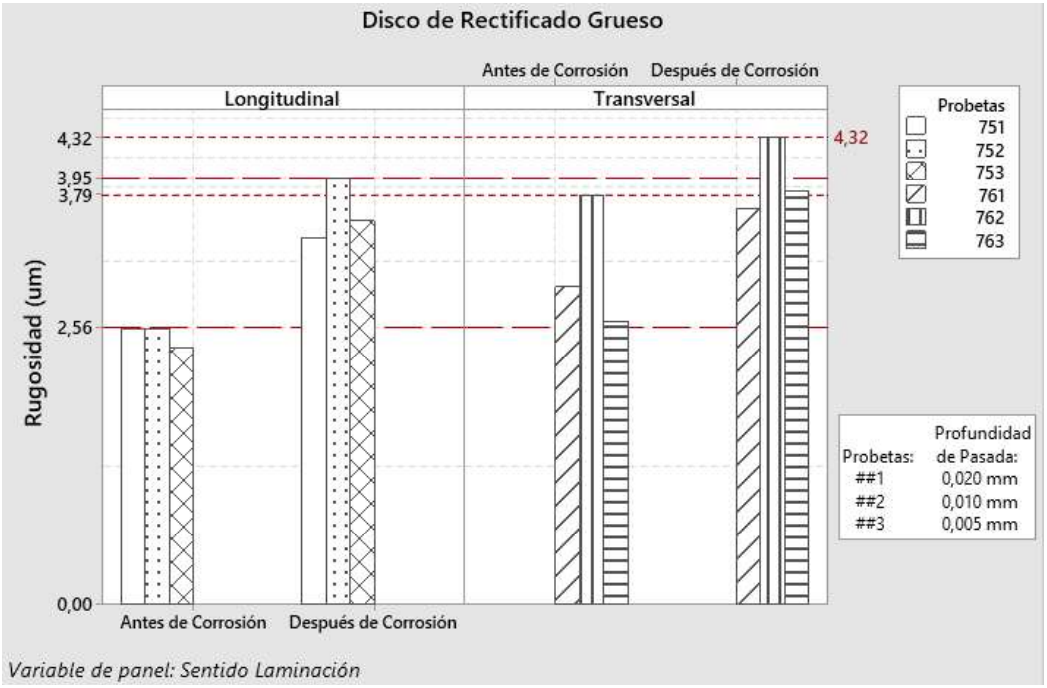


Figura 3.21. Rugosidad antes y después del ensayo de corrosión (disco grueso).
(Fuente: Propia)

En la Figura 3.22 se observa que la rugosidad para la probeta 853 sentido de laminación longitudinal presenta un valor de 1,194 µm antes de la corrosión, y alcanza un valor de 4,16 µm después de la corrosión que representa un incremento de 71,39%. Asimismo, para la probeta 862 sentido transversal registra un valor de rugosidad de 1,600 µm antes de la corrosión y alcanza un valor de 3,971 µm después de corrosión que representa un

incremento de 59,71%. El valor de rugosidad máximo luego del ensayo de corrosión con disco medio es de 4,16 µm.

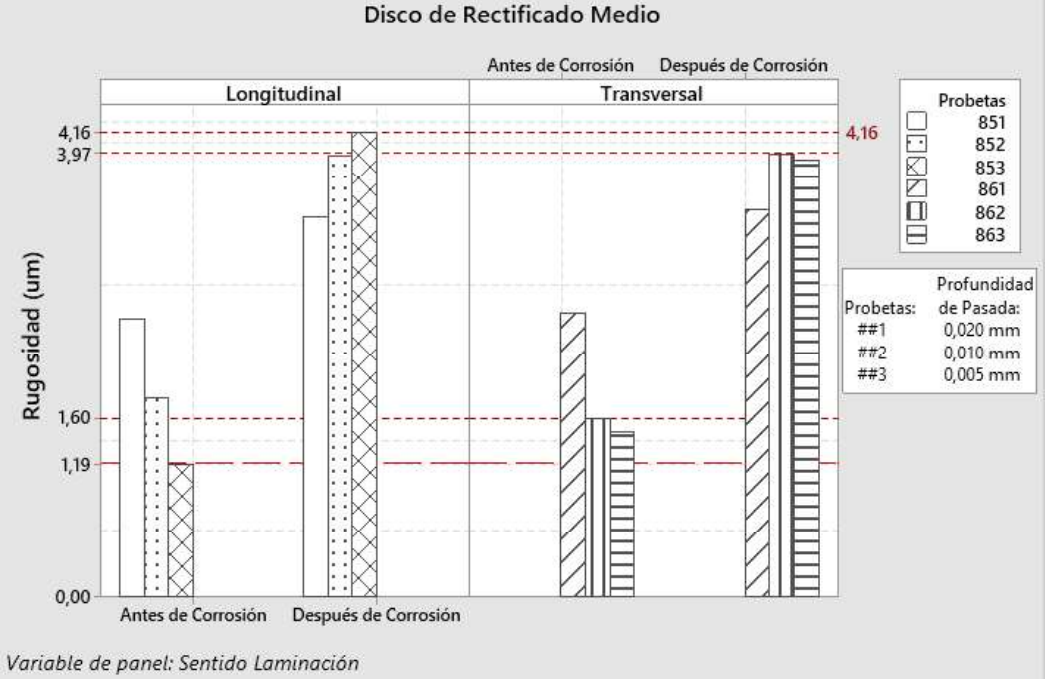


Figura 3.22. Rugosidad antes y después del ensayo de corrosión (disco medio).
(Fuente: Propia)

Finalmente, en la Figura 3.23 se presenta el análisis de la rugosidad generada en las probetas rectificadas con el disco fino, donde se observa que la rugosidad para la probeta 953 sentido longitudinal presenta un valor de 1,480 µm antes de la corrosión, y alcanza un valor de 4,087 µm después de la corrosión, con un incremento del 63,79%. Para la probeta 962 sentido de laminación transversal se registra un valor de rugosidad de 2,013 µm antes de la corrosión y alcanza un valor de 3,924 µm después de corrosión, con un incremento del 48,70%. El valor de rugosidad máximo luego del ensayo de corrosión con disco fino es de 4,087 µm.

En definitiva, la Tabla 3.17. presenta los valores de incremento de rugosidad para cada uno de los discos y el sentido de laminación, en donde se aprecia que las probetas con sentido transversal, presentan un menor incremento de rugosidad, que como mencionan (Fargas, Anglada, & Mateo, 2002), el comportamiento que se debe a la anisotropía cristalográfica que puede presentar un material cuando sus propiedades dependen de la orientación en las que sean medidas.

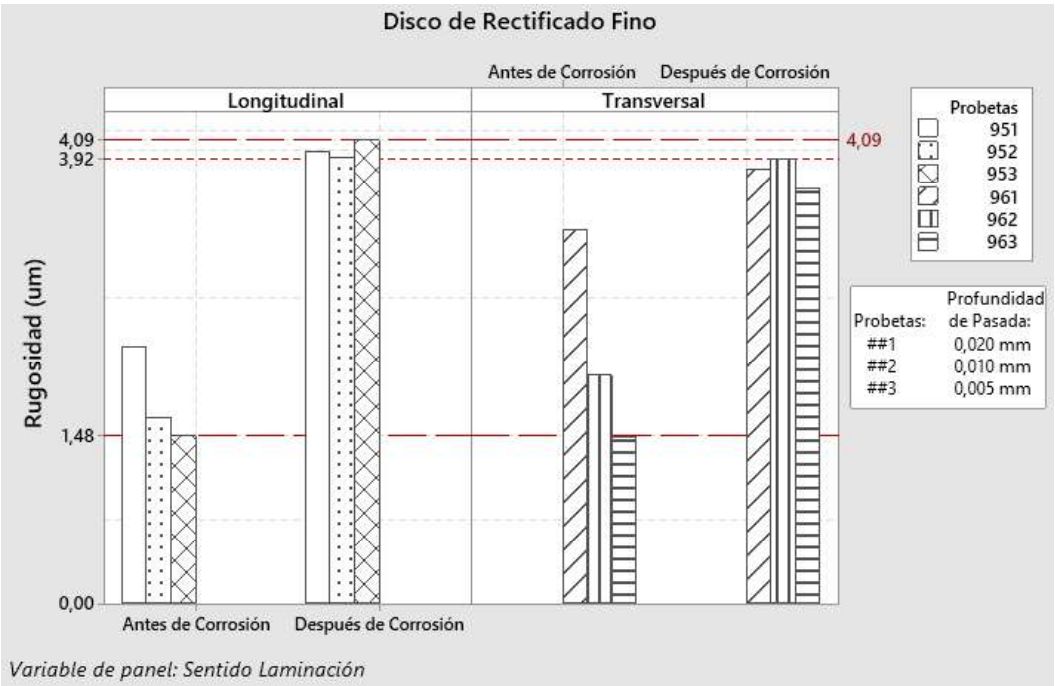


Figura 3.23. Rugosidad antes y después del ensayo de corrosión (disco fino).

(Fuente: Propia)

Tabla 3.17. Incremento de rugosidad posterior al ensayo de corrosión.

Probeta		**Profundidad de pasada (mm)**	**% De incremento de rugosidad**
Longitudinal	**753**	0,005	33,19
	853		75,94
	953		63,79
Transversal	**762**	0,010	12,38
	862		59,71
	962		48,70

(Fuente: Propia)

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- En el presente estudio con la realización de los ensayos experimentales en el acero AISI 420, se logró cumplir con los objetivos establecidos en el plan de trabajo.

- El estudio demuestra que el acabado superficial obtenido a través de la variación de los parámetros del proceso de rectificado, influyen en la integridad superficial del acero AISI 420, y en sus propiedades mecánicas como resistencia a la deformación plástica y la resistencia a la corrosión.

- El proceso de rectificado realizado sin refrigeración alcanza temperaturas de hasta 119 °C, la cual no llega a producir una precipitación de martensita, no existiendo cambio de fase en la microestructura del acero AISI 420.

- Los defectos presentes en la superficie rectificada del acero AISI 420 son en su mayoría moderados, cuando la profundidad de pasada esta entre 0,005 y 0,010 (mm), independiente al disco de rectificado y es propenso a defectos superficiales críticos cuando la profundidad de pasada es de 0,020 mm, debido a que la fuerza resultante es considerablemente mayor.

- Los valores de rugosidad obtenidos para el acero AISI 420 con el disco de rectificado grueso A24 RVS, tamaño de grano 24 µm y profundidad de pasada de 0,020 mm, se encuentran en la categoría de mal acabado superficial, debido a que este disco es considerado para desbaste mas no para obtener buen acabado superficial y precisión dimensional.

- Un buen acabado superficial en el acero AISI 420 se obtiene con el disco de rectificado fino A60 NVS, tamaño de grano 60 µm y una profundidad de pasada de 0,005 mm, además de una buena integridad superficial que mejora la resistencia a la deformación plástica.

- Una buena integridad superficial del acero AISI 420 no siempre representa una mejora en todas sus propiedades mecánicas, por ejemplo al mejorar la resistencia a la deformación plástica, disminuye su resistencia a la corrosión o viceversa.

- La resistencia a la corrosión de la superficie rectificada, disminuye por la presencia de defectos superficiales generados por los distintos discos de rectificado y el desprendimiento de la capa pasiva de óxido de cromo, debido a que el cloruro férrico es propenso a depositarse dentro de las marcas de rectificado y esto genera picaduras y pérdida de masa en el acero.

4.2. Recomendaciones

- Es recomendable realizar el presente estudio con la variación de los parámetros de rectificado que se consideraron constantes, como la velocidad de corte y la velocidad de avance, con una rectificadora semiautomática para un mejor control del proceso.

- Realizar un análisis macrográfico en la superficie de los discos de rectificado para observar los granos abrasivos, la porosidad de los discos, las caras de desgaste en los granos y las incrustaciones de la viruta del acero.

- Se recomienda realizar un estudio con la variación de profundidad de pasada de 0,001 a 0,005 (mm) y con los discos de rectificado medio, fino y muy fino, para analizar el comportamiento del acero con el rectificado de aplicación promedio según la norma ASME B.46-1.

- Realizar un estudio de la anisotropía del acero AISI 420, para verificar el cambio de las propiedades mecánicas al variar el sentido de laminación de este acero.

Referencias Bibliográficas

[1]. Acuña, M., & Lozada, M. (2013). *Estudio de la Soldabilidad del Acero Inoxidable Martensítico AISI 420.* Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Mecánica, Quito.

[2]. ANSI B74.13. (1977). *Markings for Identifying Grinding Wheels and Other Bonded Abrasives.* Nueva York: American National Standards Institute.

[3]. ANSI/ASME B46.1. (1985). *Surface Texture (Surface Roughness, Waviness, and Lay).* New York: The American Society of Mechanical Engineers.

[4]. ASM Handbook. (1989). *Machining* (Vol. 16). United States of America: ASM International.

[5]. ASM Handbook. (2004). *Metallography and Microstructures* (Vol. 9). United States of America: ASM International.

[6]. ASME B46.1. (2009). *Surface Texture (Surface Roughness, Waviness, and Lay).* United States of America: The American Society of Mechanical Engineers.

[7]. ASTM G46 - 94. (2018). *Standard Guide for Examination and Evaluation of Pitting Corrosion.* United States of America: ASTM International.

[8]. ASTM G48 - 11. (2015). *Standard Test Methods for Pitting and Crevice Corrosion Resistance of Stainless Steels and Related Alloys by Use of Ferric Chloride Solution.* United States of America: ASTM International.

[9]. Bhadeshia, H., & Honeycombe, R. (2017). Steels: Microstructure and Properties. In *Formation of Martensite* (Fourth ed.). United States of America: Elsevier Ltd., 135-173.

[10]. Boothroyd, G. (1978). *Fundamentos del Corte de Metales y de las Máquinas-Herramienta* (Primera ed.). México: McGraw Hill Latinoamericana S.A.

[11]. Callister, Jr., W. D., & Rethwisch, D. G. (2014). *Materials Science and Engineering* (ninth ed.). United States of America: John Wiley & Sons, Inc.

[12]. Charadia, R., Vaca, L. S., Brühl, S. P., & Simison, S. (2007). *Comportamiento Frente al Desgaste y Corrosión de Acero AISI 420 Nitrurado y Recubierto con Nitruro de Cromo.* Grupo de Ingeniería de Superficies, Facultad Regional Concepción del Uruguay-UTN.

[13]. Fargas, G., Anglada, M., & Mateo, A. (2002). *Influencia de las faces intermetálicas en la conformación de los aceros inoxidables dúplex.* Gandia: VIII Congreso Nacional de Propiedades Mecánicas de Sólidos.

[14]. Flores Rodriguez, B. J. (1996). *Secuencia de Procesamiento de Aceros Inoxidables Martensíticos.* Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, San Nicolas de los Garza N.L.

[15]. FLuke Corporation. (2012). *Manual de Uso: Visual IR Thermometer*. Obtenido de Fluke: https://www.fluke.com/es-ec/producto/captura-de-imagenes-termograficas/termometros-visuales-ir/fluke-vt04

[16]. Ginjaume, A., & Torre, F. (2005). *Ejecución de Procesos de Mecanizado, Conformado y Montaje* (Segunda ed.). España: Paraninfo S.A.

[17]. González, C., & Zeleny, J. R. (1995). Metrología. En *Metrología superficial rugosidad* (Primera ed.). México: McGraw Hill Interamericana de México, 427-460.

[18]. Gonzalez, M. (2015). *Análisis comparativo de la velocidad de corrosión por picadura de los aceros inoxidables austeníticos UNS S30403 y UNS S20100, bajo norma ASTM G-48 en diferentes tipos de inmersión.* Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.

[19]. Groover, M. P. (2014). *Introducción a los Procesos de Manufactura* (Primera ed.). México: McGraw Hill Education.

[20]. Grzesik, W., & Żac, K. (2016). Comparison of precision hard turning and grinding operations in terms of the topographic analysis of machined surfaces. *International Journal of Surface Science and Engineering, 10* (2).

[21]. Hernández, L. V., & Romero, D. A. (2016). *Análisis Microestructural de los Aceros Inoxidables AISI 316, 420 y 430 utilizando la Técnica de Metalografía a Color.* Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Facultad Tecnológica Ingeniería Mecánica, Bogotá.

[22]. Hilti Corporation. (2015). *Corrosion Handbook.* Liechtenstein: 9494 Schaan.

[23]. Irestal Group. (2019). *Tabla de Características Técnicas del Acero Inoxidable*. Obtenido de Irestal Group: http://www.irestal.com/services/technical-tables&lang=es

[24]. Ivanova, T. N. (2016). Design and Technology Support of the Grinding Process for Heavily-Machined Steel Sheets. *Science Direct*.

[25]. Kallewaard, V., González, H., & Vivancos, J. (2006). Modelos para la Predicción de la Rugosidad Superficial en Procesos de Mecanizado con Arranque de Viruta: Revisión Bibliográfica. *Scientia et Technica Año XII*(32).

[26]. Kalpakjian, S., & Schmid, S. R. (2002). *Manufactura, Ingeniería y Tecnología* (Cuarta ed.). México: PEARSON Educación.

[27]. Kalpakjian, S., & Schmid, S. R. (2008). *Manufactura, Ingeniería y Tecnología* (Quinta ed.). México: PEARSON Educación.

[28]. Kumar Patel, D., Goyal, D., & Pabla, B. S. (2018). *Optimization of parameters in cylindrical and surface grinding for improved surface finish.* Retrieved from Royal Society Open Science: http://dx.doi.org/10.1098/rsos.171906

[29]. Lucefin Group. (2018). *AISI 420 Technical Card.* Obtenido de Gruppo Lucefin Lovin'Steel: https://www.lucefin.com/en/scheda-tecnica/?src=ai

[30]. Malkin, S., & Guo, C. (2008). *Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives* (Second ed.). New York: Industrial Press Inc.

[31]. Marinescu, I. D., Hitchiner, M. P., Uhlmann, E., Rowe, W. B., & Inasaki, I. (2016). *Handbook of Machining with Grinding Wheels* (Second ed.). United States of America: Taylor & Francis Group.

[32]. Marinescu, I., & Boothroyd, G. (2002). *Product Design for Manufacture and Assembly* (Second ed.). United States of America: Marcel Dekker, Inc., 308-310.

[33]. Martinez Krahmer, D. (2008). *Procesos de Arranque de Viruta y No Convencionales que se Aplican en la Industria Metalmecánica.* INTI-Mecánica, 123-131.

[34]. Millán Gómez, S. (2012). *Fabricación por Arranque de Viruta* (Primera ed.). España: Paraninfo S.A.

[35]. Morales, Y., Pérez, R., & Zambrano, P. (2014). Estudio experimental de la rugosidad superficial en el torneado en seco de alta velocidad del acero AISI 316L destinado a la agroindustria alimenticia. *Ciencias Técnicas Agropecuarias, 23* (3).

[36]. NACE International. (2014). *Manual del Alumno de Corrosión Básica* (Vol. 2.01). NACE International 2000.

[37]. Norton Company. (2018). *Soluciones Abrasivas: Catálogo de Productos*. Obtenido de Norton SAINT-GOBAIN: https://www.nortonabrasives.com/es-mx/catalogos

[38]. Nunura, C., & Lecaros, C. (2015). Caracterización del acero inoxidable AISI 420 y los efectos de la presencia de carburos de cromo en la estructura martensítica. *I+i Investigación Aplicada e Innovación, 9*.

[39]. Olofson, C. T., Boulger, F. W., & Gurklis, J. A. (1965). *Machinig and Grinding of Titanium and Its Alloys.* United States of America: NASA TECHNICAL MEMORANDUM, 67-80.

[40]. Rodríguez Tirado, J. A. (2009). *Inspección del Acabado Superficial para Procesos de Rectificado y Fresado mediante un Esparcímetro de Luz Láser.* Instituto Politécnico Nacional, Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada Unidad Querétaro, Santiago de Querétaro.

[41]. Sáenz, L., Castillo, J., & Márquez, J. (2010). *Susceptibilidad a la corrosión del acero inoxidable duplex 2205 a inmersión de ácido clorhídrico (HCL).* Carabobo: Universidad de Carabobo.

[42]. Schneider, W., & Sappert, D. (1990). *Manual práctico de dibujo técnico.* España: Reverté S.A.

[43]. Schweitzer, P. A. (2010). *Fundamentals of Corrosion: Mechanisms, Causes and Preventative Methods.* New York: Taylor and Francis Group.

[44]. Shichao, X., Minghe, L., Jianhen, W., & Xiuming, Z. (2015). Study on grinding strengthening and hardening mechanism under small depth of cut conditions. *International Journal of Surface Science and Engineering, 9* (6).

[45]. Toloei, A., Stoilov, V., & Northwood, D. (2013). *The relationship between surface roughness and corrosion.* U.S.A.: IMECE2013.

[46]. Uhlig, H. H., & Revie, R. W. (2011). *UHLIG'S CORROSION HANDBOOK* (Third ed.). United States of America: John Wiley & Sons, Inc.

[47]. Yue, C., Gao, H., Liu, X., & Liang, S. (2018, December 9). *Part Functionality Alterations Induced by Changes of Surface Integrity in Metal Milling Process: A Review.* Retrieved from Applied Sciences: www.mdpi.com/journal/applsci

Anexos