



**TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CELAYA**

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

“INFLUENCIA DE LA RUGOSIDAD EN EL COMPORTAMIENTO
TRIBOLÓGICO DE UN ACERO H13 NITRURADO”

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA MECÁNICA

PRESENTA:

ING. MARTÍNEZ CARREÑO JOSÉ LUIS

DIRECTORES DE TESIS:

M.C. LUIS DANIEL AGUILERA CAMACHO
DRA. KARLA JUDITH MORENO BELLO

CELAYA, GTO.

OCTUBRE 2016

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y al Instituto Tecnológico de Celaya por el apoyo y patrocinio para la realización de este proyecto de tesis.

A mi asesor y director de tesis el M.C Luis Daniel Aguilera Camacho por su dedicación, experiencia y paciencia hicieron que este trabajo se terminara con éxito.

A mi comité de tesis la Dra. Karla Moreno Bello y el Dr. J. Santos García Miranda por sus aportaciones que hicieron para enriquecer este trabajo.

Al Departamento de Ingeniería Mecánica y a cada uno de sus profesores que estuvieron brindando sus conocimientos a lo largo de mi estancia en el posgrado.

A mis compañeras del laboratorio de materiales por su amistad, compañerismo y apoyo brindado durante la realización de mis experimentos.

Le doy gracias a mis padres Silvia y José Luis por apoyarme en todo momento, por los valores que me han inculcado, y por haberme dado la oportunidad de tener una excelente educación en el transcurso de mi vida. Sobre todo por ser un excelente ejemplo de vida a seguir.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	PÁGINA
ÍNDICE DE FIGURAS	iv
ÍNDICE DE TABLAS	vi
RESUMEN	vii
ABSTRACT	viii
INTRODUCCIÓN	ix
Capítulo 1 MARCO DE REFERENCIA	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Planteamiento del problema.....	4
1.3 Justificación	4
1.4 OBJETIVOS	5
1.4.1 Objetivo general	5
1.4.2 Objetivos específicos.....	5
1.5 Impacto	5
1.6 Alcances	5
1.7 REFERENCIAS.....	6
Capítulo 2 MARCO TEÓRICO	7
2.1 Acero grado herramienta	7
2.2 Acabado superficial	8
2.2.1 Principales parámetros de rugosidad.....	9
2.3 Modificación superficial	10
2.4 Tribología.....	11
2.4.1 Fricción.....	11

2.4.2 Desgaste	13
2.4.3 Lubricación.....	16
2.5 Método de Pin on disk	17
2.6 REFERENCIAS.....	19
Capítulo 3 METODOLOGÍA.....	21
3.1 Esquema general de la metodología	21
3.2 Materiales.....	22
3.3 Preparación de muestras	22
3.4 Ensayo de rugosidad	23
3.5 Tratamientos térmicos y termoquímicos.....	24
3.6 Medición de espesor de capa del proceso de nitrurado	24
3.7 Ensayo de fricción y desgaste.....	25
3.8 Microscopia óptica.....	26
3.8.1 Medición de ancho de huella.....	26
3.8.2 Mecanismo de desgaste	29
3.9 Perfil de huella.	29
Capítulo 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	30
4.1 Medición de rugosidad.....	30
4.2 Medición del espesor de la capa de nitrurado.....	30
4.3 Análisis tribológico de acero H13 nitrurado en seco.....	31
4.3.1 Coeficiente de fricción	31
4.3.2 Volumen y tasa de desgaste	32
4.3.3 Análisis de mecanismos de desgaste.....	34
4.4 Análisis tribológico de acero H13 nitrurado con lubricante	36
4.4.1 Coeficiente de fricción	36

4.4.2 Volumen y tasa de desgaste	36
4.4.3 Análisis de mecanismos de desgaste	37
CONCLUSIONES	41
ANEXOS	42
ANEXO A. Certificado de material	42
ANEXO B. Certificado de calidad para tratamiento térmico	43
ANEXO C. Certificado de calidad del nitrurado	44
ANEXO D. Constancia de asistencia al VII Congreso Nacional de Ciencia e Ingeniería en Materiales 2016.....	45
ANEXO E. Artículo publicado en <i>Pistas Educativas</i> , No. 118, Septiembre 2016. México, Instituto Tecnológico de Celaya	46

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Principio del proceso de forja.	1
Figura 2.1 Desviaciones de altura y línea media de la rugosidad promedio (Ra)	9
Figura 2.2 Parámetros de rugosidad Rz.....	10
Figura 2.3 Longitud de evaluación de la rugosidad superficial.....	10
Figura 2.4 Los mecanismos básicos de desgaste.....	13
Figura 2.5 Desgaste abrasivo.....	15
Figura 2.6 Tipos de grietas	15
Figura 2.7 Método pin on disk	18
Figura 3.1 Esquema general de la metodología.....	21
Figura 3.2 Especificación de probeta.	22
Figura 3.3 Montaje de muestra.....	23
Figura 3.4 Pulido de pieza	23
Figura 3.5 Medición de rugosidad.....	25
Figura 3.6 Ensayo de rugosidad	25
Figura 3.7 Muestra cortada de forma transversal	25
Figura 3.8 Configuración para ensayo en seco.....	26
Figura 3.9 Configuración para ensayo con lubricante.....	26
Figura 3.10 Microscopio Stere	27
Figura 3.11 Pista de desgaste.....	27
Figura 3.12 Medición de la pista de desgaste.....	28
Figura 3.13 Microscopio metalográfico Axio Imager A1	29
Figura 3.14 Medición de perfiles de huella.	29
Figura 4.1 Rugosidad promedio Ra del acero AISI H13.....	30
Figura 4.2 Medición del espesor de la capa de nitrurado	31
Figura 4.3 Coeficiente de fricción para las pruebas en seco	32
Figura 4.4 Micrografías ópticas (50X) de los anchos de la huella en condición en seco.....	33
Figura 4.5 Micrografías ópticas (100X) de las superficies desgastadas.....	35
Figura 4.6 Coeficiente de fricción para las pruebas con lubricante.....	37
Figura 4.7 Micrografías ópticas (50X) anchos de la huella en condición en húmeda.....	38
Figura 4.8 Micrografías ópticas (200X) de las superficies desgastadas:.....	39

Figura 4.9 Coeficiente de fricción de ambos tribosistemas, seco (S) y con lubricante (L).. 39
Figura 4.10 Factor de desgaste para condiciones en seco y con lubricación..... 40

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Rugosidad promedio en micrómetros (Ra) de los procesos de manufactura.	3
Tabla 2.1 Clasificación de los aceros para herramientas.....	7
Tabla 3.1 Composición químicas del acero tipo H13.....	22
Tabla 3.2 Metodología de pulido.....	24
Tabla 4.1 Valores promedio del coeficiente de fricción, volumen perdido y factor de desgaste para las muestras R1-S, R2-S y R3-S.....	34
Tabla 4.2 Valores promedio del coeficiente de fricción, volumen perdido y factor de desgaste para las muestras R1-L, R2-L y R3-L.....	39
Tabla 4.3 Coeficiente de fricción para las dos condiciones de prueba.....	40

RESUMEN

El acero AISI H13 es aplicado ampliamente en áreas tales como forja en caliente, extrusión en caliente y fundición a presión, debido a su alta resistencia y ductilidad, buena resistencia al revenido y bajo costo; sin embargo, la severa fricción, el impacto mecánico y la fatiga térmica que sufren en dichos procesos de fabricación, conlleva al uso de tratamientos superficiales con el fin de mejorar su vida útil como herramienta. En este punto, la nitruración es uno de los tratamientos termoquímicos de endurecimiento superficial más empleado por la industria y consiste en introducir nitrógeno en la superficie de materiales metálicos para mejorar su dureza superficial, resistencia al desgaste y a la corrosión, además de mejorar su resistencia a la fatiga térmica y mecánica. Debido a que la rugosidad superficial es un parámetro importante respecto a la fricción y el desgaste. En este respecto, el presente trabajo se centra en un estudio comparativo de tres diferentes rugosidades en los rangos de 0.04 a 0.41 μm de un acero H13 nitrurado respecto a su comportamiento tribológico, mediante el método pin-on-disk en seco y húmedo utilizando un lubricante conformado en grafito base aceite para esta última condición de acuerdo a la norma G99-05 de ASTM. El estudio de fricción mostró en condición en seco que un valor alto de rugosidad presenta un alto coeficiente de fricción y así mismo, un alta tasa de desgaste y el mecanismo de desgaste predominante para esta condición fue abrasivo pero también se pudo observar deformación plástica y oxidación de la superficie. Por otro lado, para la condición húmeda el coeficiente de fricción no varía significativamente; sin embargo, la tasa de desgaste presenta un comportamiento no lineal con respecto a sus valores de rugosidad.

ABSTRACT

AISI H13 steel is a hot-worked applied widely in areas such as hot forging, hot extrusion and casting, due to its high resistance and ductility, good resistance to the tempering and low cost; However, the severe friction, mechanical impact and thermal fatigue in these manufacturing processes, it leads to the use of surface treatments in order to improve their life as tooling. At this point, nitriding is one thermochemical treatments of surface hardening more employed by industry and consists of introducing nitrogen on the surface of metallic materials to improve their surface hardness, resistance to wear and corrosion, as well as improving its resistance to thermal and mechanical fatigue. On the other hand the surface roughness is an important parameter with respect to friction and wear. In this respect, the present work focuses on a comparative study of three different roughness ranges from 0.04 to 0.41 μm of H13 steel nitrided with respect to its tribological behavior, using the pin-on-disk dry and wet method according to standard ASTM G99-05. Study of friction showed in condition dry that a high value of roughness has a high coefficient of friction and likewise, a high rate of wear and the mechanism of predominantly wear for this condition was abrasive but also plastic deformation and surface oxidation could be observed. On the other hand for the condition wet the coefficient of friction not varies significantly; however, the wear rate presents a nonlinear behavior with respect to their roughness values.

INTRODUCCIÓN

La rugosidad superficial de las matrices juega un papel importante en el rendimiento de fricción y desgaste.

El desgaste es uno de los tres problemas industriales más comúnmente encontrados que conducen a la sustitución de componentes y conjuntos en ingeniería, el cual tiene consecuencias económicas de largo alcance.

El acero AISI H13 es aplicado ampliamente en áreas tales como forja en caliente, extrusión en caliente y fundición a presión, debido a su alta resistencia y ductilidad, buena resistencia al revenido y bajo costo.

La nitruración es uno de los tratamientos termoquímicos de endurecimiento superficial más empleado por la industria.

Por tal motivo el presente trabajo se centrará en analizar la influencia de la rugosidad superficial sobre el comportamiento de fricción y desgaste en un acero tipo AISI H13 nitrurado utilizando el método pin-on-disk de acuerdo al contenido de la norma G99-05 de ASTM, utilizando dos condiciones, en seco a 25°C y lubricante a 100°C.

La estructura del trabajo consta de cuatro capítulos; en el primer capítulo se presenta el marco de referencia que incluyen los antecedentes de la investigación, planteamiento del problema, justificación, objetivo general y específicos, impacto y finalmente los alcances de la investigación. El segundo capítulo presenta el marco teórico donde se incluyen todos los temas a estudiar relacionados con el presente trabajo. El capítulo tres presenta los materiales y la metodología a desarrollar en el presente trabajo como son los ensayos y tratamientos al material así como las técnicas de microscopía realizadas y las mediciones correspondientes al material; y finalmente en el capítulo cuatro se exponen los resultados y discusiones analizadas en esta investigación.

Capítulo 1 MARCO DE REFERENCIA

1.1 Antecedentes

En los últimos años, las industrias metalúrgicas han mostrado gran interés por la mejora de la vida útil de las herramientas utilizadas en los procesos de trabajo en caliente, como es el caso de los procesos de conformado por deformación plástica.

Los procesos de conformado por deformación plástica representan en la actualidad la mejor opción para elaborar piezas dotadas de la gran variedad de formas y tamaños exigidos por la industria. Usualmente, la deformación se realiza a temperatura elevada, lo que proporciona dos ventajas adicionales. Por un lado, el material, modifica su estructura produciéndose un ablandamiento del mismo, por lo que la fuerza requerida para la deformación será menor. Por otra parte, la recristalización del material se realiza a una mayor velocidad [1].

Particularmente, en el proceso de forja la pieza es formada por deformación plástica, aplicando fuerzas de compresión a través de un herramental, ver Figura 1.1. Una de sus principales ventajas de este proceso es que la pieza trabajada, sale del proceso con geometrías y dimensiones casi finales, permitiendo así una mayor facilidad y rapidez de maquinado.

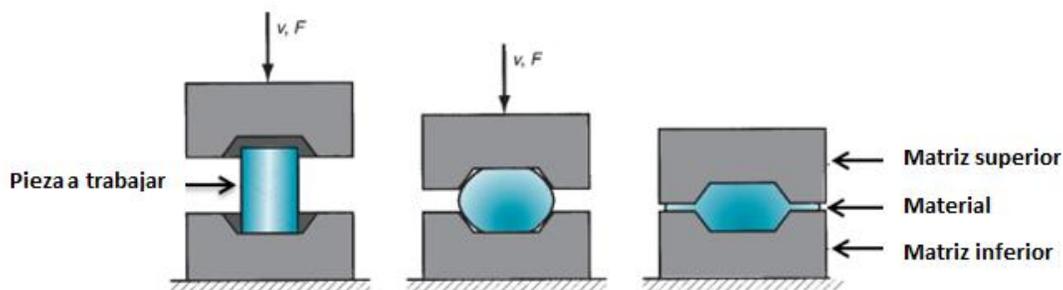


Figura 1.1 Principio del proceso de forja.

El acero AISI H13 es aplicado ampliamente en estos procesos, tales como forja en caliente, extrusión en caliente y fundición a presión, debido a su alta resistencia y ductilidad, buena resistencia al revenido y bajo costo; sin embargo, la severa fricción y el impacto mecánico, además de la temperatura, que sufre a partir de los procesos de fabricación, conlleva al uso de tratamientos superficiales con el fin de mejorar su vida útil como herramental. En este punto, la nitruración es uno de los tratamientos termoquímicos de endurecimiento

superficial más empleado por la industria, consiste en introducir nitrógeno en la superficie de materiales metálicos mejorando su dureza superficial, resistencia al desgaste y a la corrosión, además de mejorar su resistencia a la fatiga térmica y mecánica. Diferentes técnicas de nitruración se han utilizado en los últimos años, nitruración líquida, nitruración gaseosa, nitruración por plasma [2]. Utilizando esta última técnica Maycoln Depianti Conci [3] que evalúa el efecto del potencial de la resistencia al desgaste aplicándola en un acero AISI D2. Los resultados indican que para una mayor resistencia al desgaste es requerida una capa nitrurada con nitruros finamente dispersos. Esta condición se puede formar cuando se usaron tiempos de nitruración más cortos. Utilizando la misma técnica de nitruración, M.V. Leite, C.A. Figueroa [4] la aplican en un acero para herramienta tipo AISI H13 durante diferentes tiempos de exposición a una temperatura constante de 400 °C. Con la finalidad de analizar los diferentes mecanismos de desgaste que sufre el material mostrando que los tiempos de nitruración más largos reducen los volúmenes de desgaste. Por otra parte, utilizando la técnica de nitruración líquida G. Castro, A. Fernández-Vicente [5] evalúa la influencia del tiempo de nitruración en el comportamiento tribológico de un acero de herramientas tipo AISI H13. Observando que todas las probetas tratadas durante tiempos superiores a 7 h, presentaron una capa de combinación externa (capa blanca) mientras que para tiempos de nitruración inferiores a 7 h se obtuvo una capa de combinación irregular y de poco espesor junto con zonas en las que únicamente se observó una zona de difusión.

Por otro lado, una característica más a considerar en la vida útil de un herramental es la calidad superficial (rugosidad) cuando está en contacto con el material que se quiere deformar plásticamente ya que ésta influirá en el acabado de la pieza formada. Esta calidad superficial es una característica del proceso utilizado para su fabricación, por ejemplo: torneado, fresado, rectificado, extrusión, forjado, etc., tienen asociadas diferentes calidades superficiales. En la tabla 1.1 se muestran los valores de rugosidad promedio para los principales procesos de manufactura.

Tabla 1.1 Rugosidad promedio en micrómetros (Ra) de los procesos de manufactura.

Proceso	50	25	12.5	6.3	3.2	1.6	0.8	0.4	0.1	0.05
Aserrado	Yellow	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Yellow			
Brochado				Yellow	Orange	Orange	Yellow			
Bruñido							Yellow	Orange		
Cepillado		Yellow	Orange	Orange	Orange	Yellow				
Cizallado	Yellow	Orange	Orange	Yellow						
Corte con soplete	Yellow	Orange	Yellow							
Corte electroquímico		Yellow	Yellow	Orange	Orange	Orange	Orange	Yellow	Yellow	Yellow
Corte láser		Yellow	Yellow	Orange	Orange	Orange	Yellow	Yellow		
Electroerosión				Yellow	Yellow	Orange	Orange	Yellow		
Estampado		Yellow	Orange	Orange	Yellow					
Esmerilado						Yellow	Orange	Orange	Yellow	Yellow
Extrusión			Yellow	Yellow	Orange	Orange	Yellow			
Forjado		Yellow	Orange	Orange	Yellow					
Fresado		Yellow	Yellow	Orange	Orange	Orange	Yellow	Yellow		
Fundición a cera perdida				Yellow	Orange	Orange	Yellow			
Fundición a presión					Yellow	Orange	Yellow			
Fundición en arena		Yellow	Orange	Orange	Yellow					
Fundición en coquilla				Yellow	Orange	Orange				
Granallado					Yellow	Yellow	Orange	Orange	Yellow	
Laminado en caliente	Yellow	Orange	Yellow							
Laminado en frío				Yellow	Orange	Orange	Yellow			
Lapidado							Yellow	Orange	Orange	Yellow
Limado				Yellow	Orange	Orange	Yellow			
Mandrillado		Yellow	Yellow	Orange	Orange	Orange	Orange	Yellow		
Mortajado				Yellow	Orange	Orange	Yellow			
Oxicorte	Yellow	Orange	Yellow							
Pulido							Yellow	Orange	Yellow	Yellow
Recalcado			Yellow	Orange	Orange	Yellow				
Rectificado				Yellow	Yellow	Orange	Orange	Orange	Yellow	Yellow
Superacabado							Yellow	Yellow	Orange	Orange
Taladrado			Yellow	Orange	Orange	Yellow				
Torneado		Yellow	Yellow	Orange	Orange	Orange	Orange	Yellow	Yellow	Yellow
Trefilado				Yellow	Orange	Orange	Yellow			
Aplicación frecuente	Orange									
Aplicación menos frecuente	Yellow									

Por esta razón, la relación que existe entre la rugosidad y el desgaste ha sido objeto de estudio a través de ensayos de fricción mediante el método de bola en disco. La rugosidad inicial obtenida mediante los diferentes procesos de maquinado tiene influencia directa en el coeficiente de fricción [6,7] y los mecanismos de desgaste presentes [8]. Por otro lado, Hisakado [9] establece que para rugosidades iniciales altas entre los pares en contacto se obtienen mayores factores de desgaste. Por lo anteriormente expuesto, sería de gran utilidad contar con información que relacione el desgaste de materiales y la rugosidad de los mismos.

1.2 Planteamiento del problema

En los procesos de conformación las herramientas para trabajo en caliente se someten a cargas mecánicas y térmicas continuas que finalmente ocasionan un daño severo a la superficie de la herramienta, por lo cual las matrices de forja deben ser remplazadas después de un cierto tiempo de uso, lo que lleva a costos considerables relacionados al mecanizado de herramientas y a la disminución de la productividad. La rugosidad superficial de las matrices juega un papel importante en el rendimiento de fricción y desgaste. En base a esto, el presente trabajo se centra en un estudio comparativo de tres rugosidades superficiales distintas de un acero para herramienta tipo AISI H13 nitrurado respecto a su comportamiento tribológico.

1.3 Justificación

Debido a que el acero para herramienta tipo AISI H13 es un material ampliamente aplicado en los procesos de conformado en caliente debido a sus excelentes propiedades mecánicas y bajo costo. Existe un gran interés en incrementar la resistencia al desgaste de los aceros de herramienta para trabajo en caliente en base al acabado superficial. En este respecto, es importante analizar la influencia de la rugosidad superficial sobre el comportamiento tribológico del sistema y de esta forma determinar una rugosidad adecuada de operación de trabajo con la finalidad de limitar el desgaste al mínimo y por consecuencia los costos por reposición de herramientas.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo general

Analizar la influencia de la rugosidad superficial en el comportamiento de fricción y desgaste de un acero AISI H13 nitrurado, mediante el método pin-on-disk de acuerdo a la norma G99-05 de ASTM, en condiciones en seco a 25 ° C y con lubricante a 100 ° C.

1.4.2 Objetivos específicos

- Preparar las muestras de acero AISI H13 hasta obtener las diferentes calidades superficiales deseadas.
- Determinar la fuerza equivalente por medio de los esfuerzos de contacto de Hertz en función a límite de cedencia del material.
- Realizar pruebas de fricción para cada condición superficial bajo condiciones en seco y lubricado.
- Evaluar el coeficiente de fricción y razón de desgaste de los diferentes acabados superficiales en cada tribosistema.
- Determinar los mecanismos de desgaste y analizar el perfil de huella generados por los ensayos de fricción mediante microscopia óptica y perfilometría respectivamente.

1.5 Impacto

El impacto técnico del presente estudio es la aplicación confiable del acero para herramienta tipo AISI H13 nitrurado en los procesos de conformado en caliente; así como un impacto científico con la generación de conocimiento enfocado en la influencia del acabado superficial respecto a su comportamiento tribológico.

1.6 Alcances

El alcance del presente estudio está limitado a realizar un estudio tribológico a un acero para herramienta tipo AISI H13 nitrurado bajo tres diferentes acabados superficiales obtenidos mediante el proceso de pulido empleando diferentes tamaño de grano del abrasivo en condiciones en seco y lubricado a una temperatura de 25°C y 100°C respectivamente.

1.7 REFERENCIAS

- [1] Zhu, B., Kelly, G.L. & Mardel, J. J. of Materi Eng and Perform (2004). An investigation of tribological properties of CN and TiCN coatings. 13: 481.
- [2] J.D. Bressan, R. Hesse, E.M. Silva Jr (2001). Abrasive wear behavior of high speed steel and hard metal coated with TiAlN and TiCN. Wear 250: 561–568
- [3] Maycoln Depianti Conci, Antônio César Bozzi, Adonias Ribeiro Franco Jr. (2013). Effect of plasma nitriding potential on tribological behaviour of AISI D2 cold-worked tool Steel. Wear 317: 188–193
- [4] M.V. Leite, C.A. Figueroab, S. Corujeira Galloe, Rovani, Bassob, P.R. Meid, I.J.R. Baumvol, A. Sinatora (2010). Wear mechanisms and microstructure of pulsed plasma nitrided AISI H13 tool steel. Wear 269: 466–472
- [5] G. Castro, A. Fernández-Vicente (2007). Influencia del tiempo de nitruración en baño de sales en el comportamiento tribológico de un acero de herramientas AISI H13. 43: 405- 413
- [6] Sedlacek, M., Podgornik, B. y Vizintin, J. (2009). Influence of surface preparation on roughness parameters, friction and wear. Wear 266: 482-487
- [7] Al-Samarai, R.A., Haftirman, K.R.A., Ahmad, K.R., Al-Douri, Y. (2012). The influence of roughness on the wear and friction coefficient under dry and lubricated conditions. IJSER 3: 2-5
- [8] Kubiak, K.J., Liskiewicz, T.W. y Mathia, T.G. (2011). Surface morphology in engineering applications: Influence of roughness on sliding and wear in dry fretting. Tribology International. 44: 1427–1432
- [9] Hisakado, T. (1976). The influence of surface roughness on abrasive wear. Wear 41: 179-190

Capítulo 2 MARCO TEÓRICO

2.1 Acero grado herramienta

Los aceros de grado herramientas abarcan todos los aceros que se pueden emplear para la fabricación de herramientas de corte, conformado o cualquier otro elemento que precise elevada dureza y resistencia.

Los primeros aceros para herramientas eran simples, directamente aceros al carbono, pero la demanda de este tipo de aceros a lo largo del siglo XX condujo a un fuerte crecimiento de innovaciones, desarrollando aceros con aleaciones más complejas con un alto contenido de elementos aleantes, que suelen ser principalmente: tungsteno, molibdeno, vanadio, manganeso y cromo entre otros, lo cual permite un mayor control dimensional y disminuye el riesgo de rotura durante los tratamientos térmicos [1].

Salvo ciertas excepciones, los aceros para herramienta son sometidos a tratamientos térmicos para obtener una alta resistencia al desgaste, a la deformación o a la fractura [2].

Diversos criterios se han aplicado para clasificar los aceros grado herramienta de acuerdo al contenido de la aleación, método de temple o características mecánicas. El método de identificación adoptado por AISI-SAE emplea letras para designar la calidad con base al método de temple, aplicación principal y características particulares. (Tabla 2.1)

Tabla 2.1 Clasificación de los aceros para herramientas AISI-SAE [3]

Grupo	Grado AISI-SAE	Subgrupo
Temple en agua	W	
Trabajo en frío	O	Temple en aceite
	A	Aleación media de temple al aire
	D	Alto en carbono/alto en cromo
Resistentes al choque	S	
Corte rápido	T	Al wolframio
	M	Al molibdeno
Trabajo en caliente	H	H1 - H19: al cromo H20 – H39: al wolframio H40 – H59: al molibdeno
	P	
	Aplicaciones especiales	L
	F	Carbono-wolframio

El grupo H consta de aceros que son utilizados en operaciones que involucran abrasión y/o altas presiones combinadas con altas temperaturas de trabajo. Usualmente tienen contenidos de carbono que van de 0.30 a 0.45%, así como cromo, tungsteno, molibdeno y vanadio.

Este grupo es dividido en tres subgrupos los cuales son: aceros para trabajo en caliente al cromo (tipos H1 al H19), aceros para trabajo en caliente al tungsteno (Tipos H20 al H39), y aceros para trabajo en caliente al molibdeno (tipos H40 al H59) [3].

Los aceros para trabajo en caliente al cromo cuentan con buena resistencia al ablandamiento por calentamiento debido a su contenido medio de cromo y a la adición de elementos formadores de carburos como son el molibdeno tungsteno y vanadio. Los contenidos de tungsteno y molibdeno incrementan la resistencia en caliente pero disminuyen ligeramente la tenacidad. El vanadio es adicionado para incrementar la resistencia al desgaste erosivo. El contenido de silicio mejora la resistencia a la oxidación a temperaturas de trabajo por arriba de los 800 °C.

El subgrupo H al cromo presenta buena profundidad de templado se adapta para funcionar en todo tipo de troqueles al calor, especialmente troqueles de extrusión, troqueles para piezas fundidas, troqueles para forja, mandriles y cizallas en caliente, los más ampliamente usados son: H11, H12, H13

El acero grado herramienta tipo H13, siendo el material a estudio en el presente trabajo forma parte del subgrupo de aceros para trabajo en caliente al cromo; sus principales elementos aleantes son cromo, molibdeno, vanadio, silicio y manganeso. Dentro de sus principales características podemos mencionar; resistencia media a la decarburización, alta templabilidad, muy baja distorsión y una excelente resistencia al choque térmico, su nivel de tenacidad es el más alto de los aceros grado herramienta, además de tener media resistencia a la erosión debido a sus altos contenidos de vanadio. Siendo aplicado ampliamente en áreas tales como forja en caliente, extrusión en caliente y fundición a presión [4].

2.2 Acabado superficial

Las propiedades de la superficie de los materiales ingenieriles dependen de muchos factores. Es por esta razón que el estudio de las superficies de los materiales es sumamente importante, ya que es la porción que está en contacto directo con el medio al cual está

expuesta y en la mayoría de las ocasiones de ella depende el desarrollo de algún fenómeno físico o químico de un proceso. Las características superficiales de los materiales están relacionadas entre otras cosas a la microestructura del material y al modo por el cual fue procesado.

El termino rugosidad de una superficie hace referencia a las irregularidades superficiales en pequeña escala y que por lo tanto no son apreciables a simple vista, la rugosidad es caracterizada por pequeños valles y crestas de una corta longitud de onda y que varían en amplitud y desplazamiento en distancias más grandes que las distancias de separación entre sus átomos [6].

2.2.1 Principales parámetros de rugosidad

Rugosidad promedio (Ra): también conocida como media aritmética, es la media aritmética de los valores absolutos de las desviaciones de la altura del perfil dividida por la longitud de evaluación, L. Esta se muestra como el área sombreada de la figura 2.1 y generalmente incluye longitudes de muestreo. Para la determinación gráfica de la rugosidad media, las desviaciones de la altura se miden normal o perpendicular a la línea de centro de la gráfica

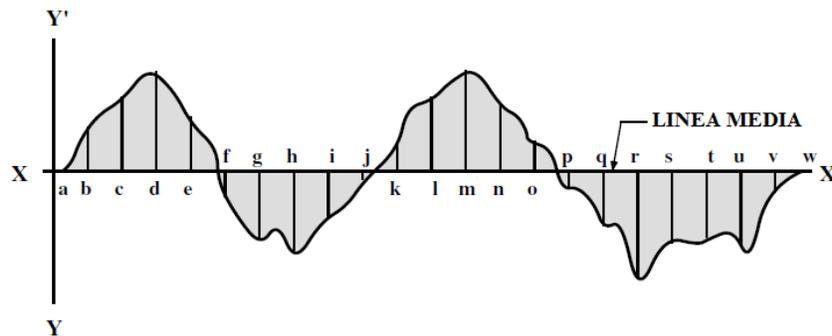


Figura 2.1 Desviaciones de altura y línea media de la rugosidad promedio (Ra)

Altura máxima del perfil evaluado (Rz): Es la suma de las longitudes del pico más alto del perfil evaluado y del valle más profundo dentro de la longitud de muestreo. (Figura 2.2) [6].

Longitud de evaluación: es la longitud donde las características de la superficie son evaluadas (figura 2.3). La longitud de evaluación es una especificación clave del instrumento de medición [6].

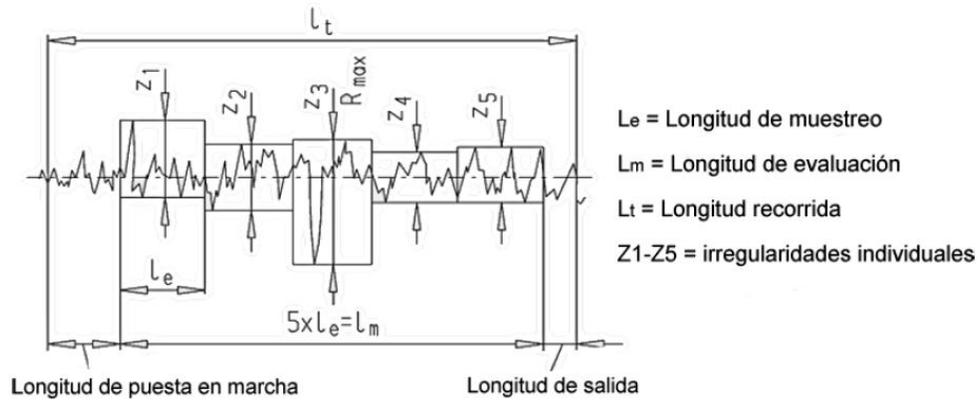


Figura 2.2 Parámetros de rugosidad R_z .

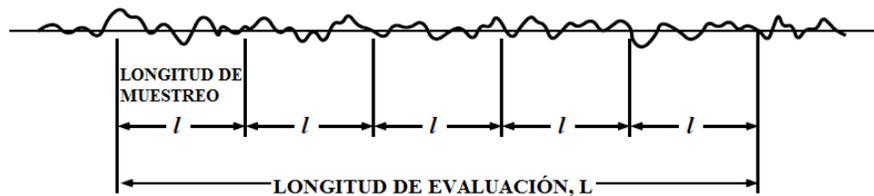


Figura 2.3 Longitud de evaluación de la rugosidad superficial.

2.3 Modificación superficial

Una forma de incrementar la vida útil de los herramientas es modificando la superficie del material. La modificación superficial es un proceso que consiste en alterar la superficie o una zona cercana a la superficie, alterando la microestructura o bien aplicando un recubrimiento sobre la misma.

Las aplicaciones típicas para el endurecimiento superficial son los dientes de engrane, levas, flechas, cojinetes, sujetadores, espigas, placas de embrague automotriz, herramientas y dados. El endurecimiento en el volumen de estas piezas no sería deseable, porque una pieza dura carece de la tenacidad necesaria para estas aplicaciones. Una pequeña grieta superficial se propagaría con rapidez a través de este tipo de piezas, causando la falla total.

Están disponibles varios procesos de endurecimiento superficial:

- Carburizado o cementado
- Carbonitrurado
- Cianurado
- Nitrurado
- Borizado
- Endurecimiento por flama
- Endurecimiento por inducción

La nitruración es uno de los tratamientos termoquímicos de endurecimiento superficial más empleado por la industria para mejorar las características mecánicas de estos aceros que consiste en introducir nitrógeno en la superficie de materiales metálicos para mejorar su dureza superficial, resistencia al desgaste y a la corrosión, además de mejorar su resistencia a la fatiga térmica y mecánica [7].

La nitruración se suele realizar de 500 a 600 °C (nitruración a baja temperatura), por lo tanto no ocurre transformación de fase. La efectividad del proceso depende de la formación de nitruros en el acero por la reacción del nitrógeno con el Fe y ciertos elementos de aleación. Aunque a temperaturas adecuadas y con la atmósfera apropiada, todos los aceros son capaces de formar nitruros de hierro, los mejores resultados se obtienen en aquellos aceros que contienen uno o más de los principales elementos de aleación que forman el nitruro. Estos elementos son aluminio, cromo, vanadio y molibdeno [7].

2.4 Tribología

En 1987 la organización para el desarrollo y la cooperación económica estableció un nuevo campo de la ciencia el cual fue denominado TRIBOLOGIA. Esta palabra se deriva del griego “tribos” que significa frotar o deslizar. La tribología se enfoca al estudio del movimiento relativo entre superficies la interacción que existe entre las mismas, por consecuencia la fricción la lubricación y el desgaste son parte integral de la tribología. [8]. En la interacción entre dos superficies se presentan diversos fenómenos cuyo conocimiento es de vital importancia. Estos fenómenos fundamentales son: fricción y desgaste.

2.4.1 Fricción

La palabra fricción proviene del latín “Fricare” que significa rozamiento o frotamiento. Se manifiesta como una pérdida gradual de energía cinética usando dos cuerpos se encuentran en contacto y movimiento relativo. Definiéndose como: la fuerza de resistencia a movimiento de un cuerpo, cuando este se desplaza sobre otro, siendo ésta fuerza tangencial a la interface y en sentido contrario al desplazamiento [9].

La naturaleza de la fuerza de fricción fue fundamentada bajo 3 leyes empíricas descubiertas por varios científicos. Estas son:

- Primera ley de Amontons: La fuerza de fricción es directamente proporcional a la fuerza normal.

Esta ley dice que al tener un objeto de mayor masa, y por tanto mayor peso (con gravedad constante), la fuerza de fricción será mayor. Esto es debido a que un mayor número de átomos en las superficies estarán en contacto.

- Segunda ley de Amontons: La fuerza de fricción es independiente de la aparente área de contacto.

La ley establece que dos masas similares pero con diferentes áreas de contacto tendrán el mismo coeficiente de fricción. Entonces, para mover dos objetos del mismo material y misma masa, pero con diferentes áreas de contacto, se necesitará la misma fuerza aplicada.

- Tercera ley de Fricción de Coulomb: La fricción cinética es independiente de la velocidad del deslizamiento.

Coulomb estableció que no importa la velocidad a la que se deslice un cuerpo en una superficie, el coeficiente de fricción permanecerá constante aunque varíe la rapidez.

La manera más sencilla de comparar las fuerzas de rozamiento entre dos superficies es mediante el coeficiente de fricción usualmente representado por la letra griega μ . Esta medición va desde 0 hasta el 1, siendo el cero un caso hipotético donde no existiese la fuerza de fricción y la unidad sería la fricción “adhesiva”.

La fricción que se genera entre dos cuerpos no es una propiedad de los materiales en contacto sino es una “propiedad del sistema”, ya que muchos factores influyen, como la temperatura, la rugosidad, la velocidad, la atmósfera, etc. Esto quiere decir que un mismo par de materiales en contacto puede tener un coeficiente de fricción distinto al aumentar la temperatura del sistema o al cambiar la rugosidad de las superficies.

Existen diversas pruebas estandarizadas para determinar la fuerza y el cálculo del coeficiente de fricción, como por ejemplo las establecidas por American Standard Testing Materials (ASTM), otras organizaciones, tales como American National Standards Institute (ANSI) e International Organization for Standardization (ISO).

2.4.2 Desgaste

El desgaste se define como "la pérdida progresiva de material de la superficie de un cuerpo sólido debido a una acción mecánica" (DIN 50320). Ésta pérdida de material es ocasionada por fenómenos mecánicos y químicos, el material removido puede ser expulsado, transferido a la otra superficie o quedar atrapado dentro del sistema.

Se han propuesto muchos mecanismos diferentes para explicar el desgaste de los metales. En general todos involucran deformación plástica, formación y propagación de grietas, corrosión y/o desgaste, pero difieren en los procesos detallados por el cual se retira el material. No es fácil distinguir inequívocamente entre los posibles mecanismos que podrían estar operando en un caso particular, pero una examinación crítica de las superficies desgastadas y las partículas de desgaste pueden proporcionar información útil. Tanto el examen de la superficie topográfica, como las microestructuras sub-superficiales pueden efectuarse mediante microscopía óptica (OM), electrónica de barrido (SEM) y electrónica de transmisión (TEM) [10]. Se pueden identificar los cuatro principales mecanismos de desgaste: adhesivo, abrasivo, químico y fatiga. (Figura 2.4)

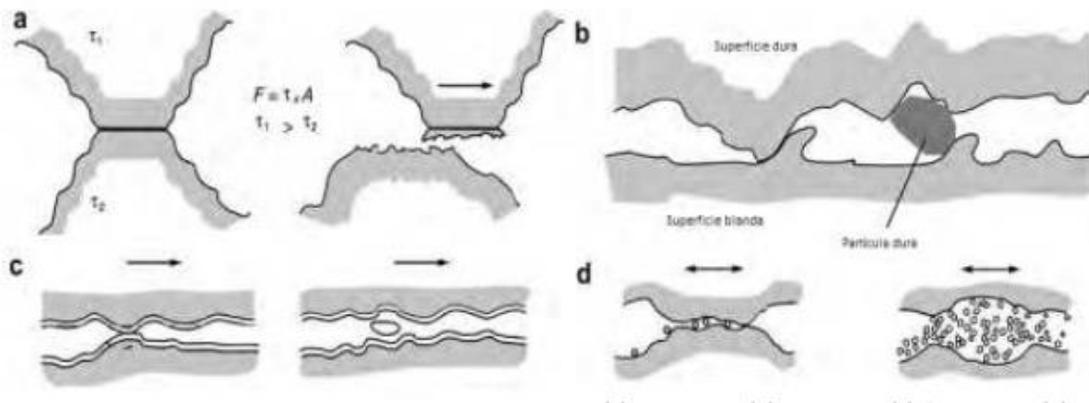


Figura 2.4 Los mecanismos básicos de desgaste (a) adhesivo, (b) abrasivo, (c) fatiga y (d) desgaste químico.

2.4.2.1 Desgaste adhesivo

El desgaste adhesivo se produce cuando dos cuerpos sólidos nominalmente planos están en contacto deslizante, ya sea lubricados o no. La adhesión (o unión) se produce entre las

asperezas superficiales, que luego se rompen debido al esfuerzo de deslizamiento, pudiendo resultar en el desprendimiento y/o transferencia de fragmentos de una superficie a la otra. Como el deslizamiento continúa, los fragmentos transferidos pueden actuar como protuberancias duras y producir abrasión al salir de la superficie sobre la que se transfieren, y se transferirán de nuevo a la superficie original, o bien desprenderse y formar partículas de desgaste sueltas que también actúa como abrasivos [11,12].

Con el aumento del daño o sobrecarga debido a las tensiones, la velocidad o la temperatura en la zona de contacto, la adhesión puede incrementarse y resultar en el arrastre del material. Esta forma de daño está relacionada con un gran aumento del coeficiente de fricción y el desgaste, provocado usualmente por la falta y/o falla de la lubricación a altas velocidades de deslizamiento [10].

La mayoría de los sólidos se adherirán al contacto con otro sólido, en la medida que se cumplan ciertas condiciones. La tendencia a formar regiones adheridas, depende de las propiedades físicas y químicas de los materiales en contacto, al igual que de los valores de carga aplicados y las propiedades de los materiales que están sobre las superficies, y finalmente de la rugosidad [13].

2.4.2.2 Desgaste abrasivo

La norma ASTM G40-92 define el desgaste abrasivo como la pérdida de masa resultante de la interacción entre partículas o asperezas duras, que son forzadas contra una superficie y se mueven a lo largo de ella dejando un surco y removiendo material [14].

Este mecanismo de desgaste consiste en el desplazamiento y eliminación de material de una o de las dos superficies en contacto, produciendo daño por deformación plástica y fractura. El desgaste abrasivo puede clasificarse en abrasión de dos cuerpos y abrasión por tres cuerpos (figura 2.5). En abrasión de dos cuerpos el desgaste es causado por rugosidades duras pertenecientes a una de las superficies en contacto. La abrasión de tres cuerpos se presenta cuando una partícula abrasiva de mayor dureza que las superficies de los materiales actúa como elemento interracial entre los cuerpos en contacto.

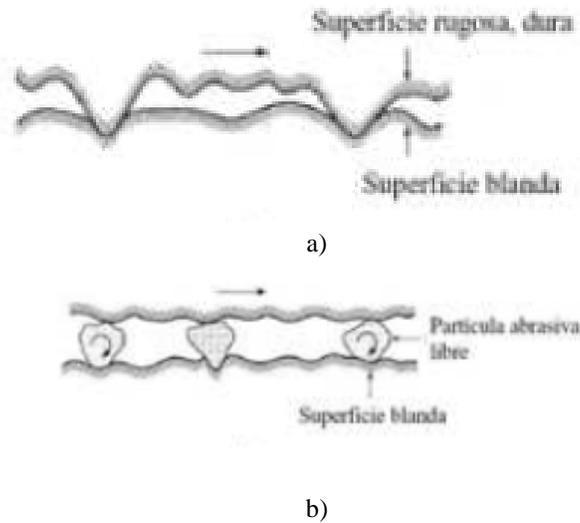


Figura 2.5 Desgaste abrasivo (a) de dos cuerpos (b) de tres cuerpos

2.4.2.3 Desgaste por fatiga de contacto

Los repetidos ciclos de carga y descarga a los cuales los materiales son expuestos pueden inducir la formación de grietas, que eventualmente, después de un número crítico de ciclos resultaran en la rotura de la superficie con la formación de grandes fragmentos. La forma y distribución de estos campos de esfuerzo se hallan influenciadas por la geometría de contacto, las propiedades elásticas y plásticas de los materiales y la intensidad de las cargas normales y tangenciales aplicadas en estas regiones, existen dos tipos de grietas: superficiales y sub-superficiales (fig. 2.6). [11].

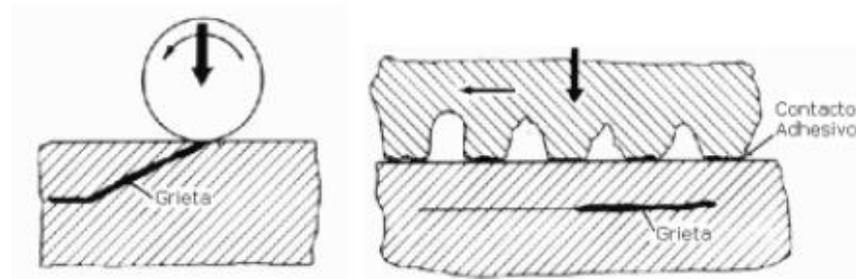


Figura 2.6 Tipos de grietas

2.4.2.3 Desgaste químico

El desgaste corrosivo o químico se produce en una amplia variedad de situaciones, tanto lubricadas como no lubricadas. La característica fundamental de esta forma de desgaste es una reacción química concurrente entre el material desgastado y un medio corrosivo, que

puede ser un reactivo químico, lubricante reactivo o incluso aire. [13]. Este tipo de desgaste está asociado a los siguientes fenómenos

- Remoción de pequeñas partículas metálicas ocasionada por la ruptura de contactos adhesivos metal-metal que se producen en algunas regiones de contacto y por las altas temperaturas pueden oxidarse.
- La reacción química entre las superficies y el ambiente que influyen en la formación de películas protectoras.
- Partículas de desgaste de origen metálico y no metálico que pueden comportarse como un abrasivo
- Agrietamiento de las películas superficiales generado por los altos esfuerzos en las zonas de contacto, la alta deformación del material de las superficies, o por el proceso de microfatiga.

2.4.3 Lubricación

Lubricación es el proceso mediante el cual la fricción y el desgaste de dos superficies solidas en movimiento relativo se ven reducidos significativamente al interponer un lubricante entre ellas. El objetivo de la lubricación es separar las superficies en movimiento mediante una película de material sólido, líquido o gaseoso con la cual se evitara cualquier daño de las superficies y además se encargara de disipar el calor generado por la fricción y de eliminar las impurezas producto del desgaste. La lubricación puede tomar diferentes regímenes, dependiendo de la geometría de los cuerpos en contacto, la rugosidad y textura de las superficies deslizantes, la carga de contacto, la presión y la temperatura, las velocidades de rodamiento o deslizamiento, las condiciones ambientales, las propiedades físicas o químicas de lubricante y las propiedades de las capas superficiales [16].

Cuando se utilizan lubricantes líquidos o gaseosos se puede hacer la siguiente subdivisión:

- **Lubricación de película gruesa:** Se refiere a este modo de lubricación cuando el espesor de la película lubricante que separa las asperezas es mucho mayor que el tamaño de las moléculas del lubricante.

- **Lubricación de película delgada:** En este modo de lubricación el espesor de la película es menor, por lo cual parte de la carga es soportada por el fluido, mientras que el resto la soportan los contactos entre las asperezas. También suele llamarse lubricación mixta.
- **Lubricación frontera:** Aquí, toda la carga es soportada por las asperezas que están en contacto, las cuales solamente están lubricadas por una película superficial que es del orden molecular [16].

Dentro de la lubricación de película gruesa se encuentran los siguientes regímenes de lubricación:

Lubricación Hidrodinámica: Cuando un fluido lubricante está presente entre dos superficies deslizantes, se genera una película gruesa presurizada a consecuencia de la velocidad de las superficies, con la cual se reduce la fricción y el desgaste.

Lubricación Hidrostática: Cuando la velocidad de las superficies no es suficiente como para generar la gruesa capa de lubricante, suele utilizarse un lubricante que es presurizado externamente para que se genere dicha película, siendo a esto a lo que se le da el nombre de lubricación hidrostática.

Lubricación Elastohidrodinámica (EHL): Este régimen de lubricación está presente cuando la presión que se ejerce al sistema produce una deformación elástica de la superficie, que es del mismo orden de magnitud que el espesor de la película lubricante, por lo cual la influencia de la deformación en el comportamiento de la lubricación se vuelve un parámetro significativo.

2.5 Método de Pin on disk

El desgaste rara vez es catastrófico, más bien se refleja en cambios dimensionales por consecuentemente una disminución de la eficiencia de las condiciones de operación. Al presentarse el desprendimiento de pequeñas partículas debido al desgaste en sistemas con claros y/o tolerancias pequeñas, éste puede representar mayor problema que los cambios dimensionales de los componentes [9]

El desgaste es un proceso que en la práctica resulta difícil de medir, por lo que generalmente su medición se basa en pruebas experimentales en laboratorios que simulan

determinadas condiciones de operación. La manera más simple de resumir los datos obtenidos en pruebas de desgaste se basa en observar los cambios de dimensión, volumen o masa en condiciones específicas, o bien los mismos parámetros por unidad de tiempo [8]

Con el fin de manejar de manera adecuada los efectos de las diferentes variables que intervienen en los procesos de desgaste, los equipos de prueba diseñados buscan la mayor aproximación en la simulación del proceso de desgaste. El método Pin-on-disk es utilizado para medir el desgaste por deslizamiento. La norma ASTM G99 establece que este método consiste básicamente en un disco rotatorio el cual se encuentran en contacto con un pin teniendo una carga aplicada sobre el disco por medio de un brazo mecánico o algún otro mecanismo, lo que genera una órbita sobre la superficie del disco (Fig 2.7). El desgaste se mide en términos del volumen perdido tanto del pin como del disco o bien de alguno de los dos dependiendo el caso. El análisis de los datos obtenidos en este tipo de pruebas generalmente incluye el análisis de las marcas generadas por el desgaste sobre el pin y el disco de prueba, graficando el efecto el desgaste sobre el perfil de la parte desgastada [15]. Así como ésta observación en el desarrollo de las pruebas, existen otras características que se deben de considerar, sin embargo, es importante tener presente las características básicas de cualquier equipo de prueba ya que al ser consideradas y con ayuda de un procedimiento adecuado, los resultados obtenidos resultan ser bastante confiables.

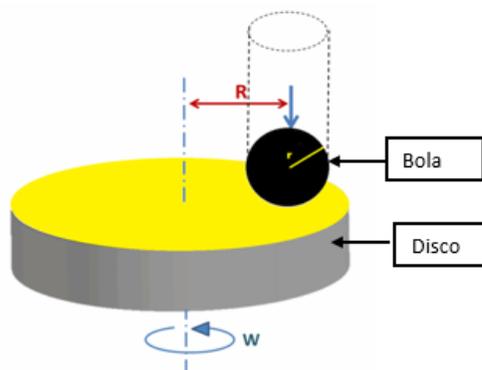


Figura 2.7 Método pin on disk

2.6 REFERENCIAS

- [1] Tool Steels Metals Handbook, Vol. 1, tenth ed. Properties and selection: Iron and high performance alloys, ASM International, Ohio (1997)
- [2] Machinery's Handbook E. Oberg, F.D.Jones, H.L.Horton, H.H. Ryffel, Industrial Press Inc. 27th Ed, New York (2004)
- [3] Materiales y Procesos de Fabricación, Vol 1, E.P. DeGarmo, J.T. Black, R.A. Kohser, Editorial Reverté, S.A. 2^a Ed. Barcelona (2002)
- [4] Aceros: Metalurgia Física, Selección y diseño. J.A. Pero-Sanz, CIE Dossat 2000, Madrid (2004)
- [5] Tratamiento Térmico de los Aceros”, Apraiz Barreira J. Ed. Limusa, 9^o edición, España (1997)
- [6] Superfast Optical Roughness Measurement; EMG Automation GmbH Industriestra ße 1;5782 Wenden, Germany Rev 04/ 08-2008.
- [7] “Tratamiento Químico Térmico de los Metales”, Lajtin Yu Editorial Mir., Moscú
- [8] Engineering Mechanics, Static and Dynamics. B.I.Sandor Prentice Hall, 2ed., NJ.
- [9] Tribophysics, Nam P. Suh, Edit. Prentice Hall, USA. (1986)
- [10] Tribology: friction and wear of engineering materials. Hutchings, I. M. Ed. Arnold, Bristol. (1992).

- [11] Principles and applications of tribology, Bhushan, B. second edition. John Wiley & Sons. (2013).

- [12] Sliding and adhesive wear, Ludema K. ASM Handbook Vol 18, Ed. ASM International, Ohio, USA. (1995)

- [13] Engineering tribology, Stachowiak, G. W. y Batchelor, A. W. fourth edition. Butterworth-Heinemann. Elsevier Inc. (2014).

- [14] Abrasive Wear, Joseph H. Tylczak, Albany Oregon, ASM Handbook Vol 18, Ed. ASM International, Ohio, USA. (1995)

- [15] Anual book of ASTM standars "Metal s test methods and analytical procedures", Norma ASTM "Wear and erosion; Metal corrosion", (1993).

- [16] Design of friction and wear experiments. Volumen 18, edition 10th edition ASM

Capítulo 3 METODOLOGÍA

3.1 Esquema general de la metodología

El presente trabajo se divide en dos etapas. La primera es la preparación de muestras para obtener diferentes acabados y superficiales y la segunda parte es el análisis de los mecanismos de desgaste. A continuación se realiza una descripción de la metodología experimental desarrollada en esta investigación (fig. 3.1).

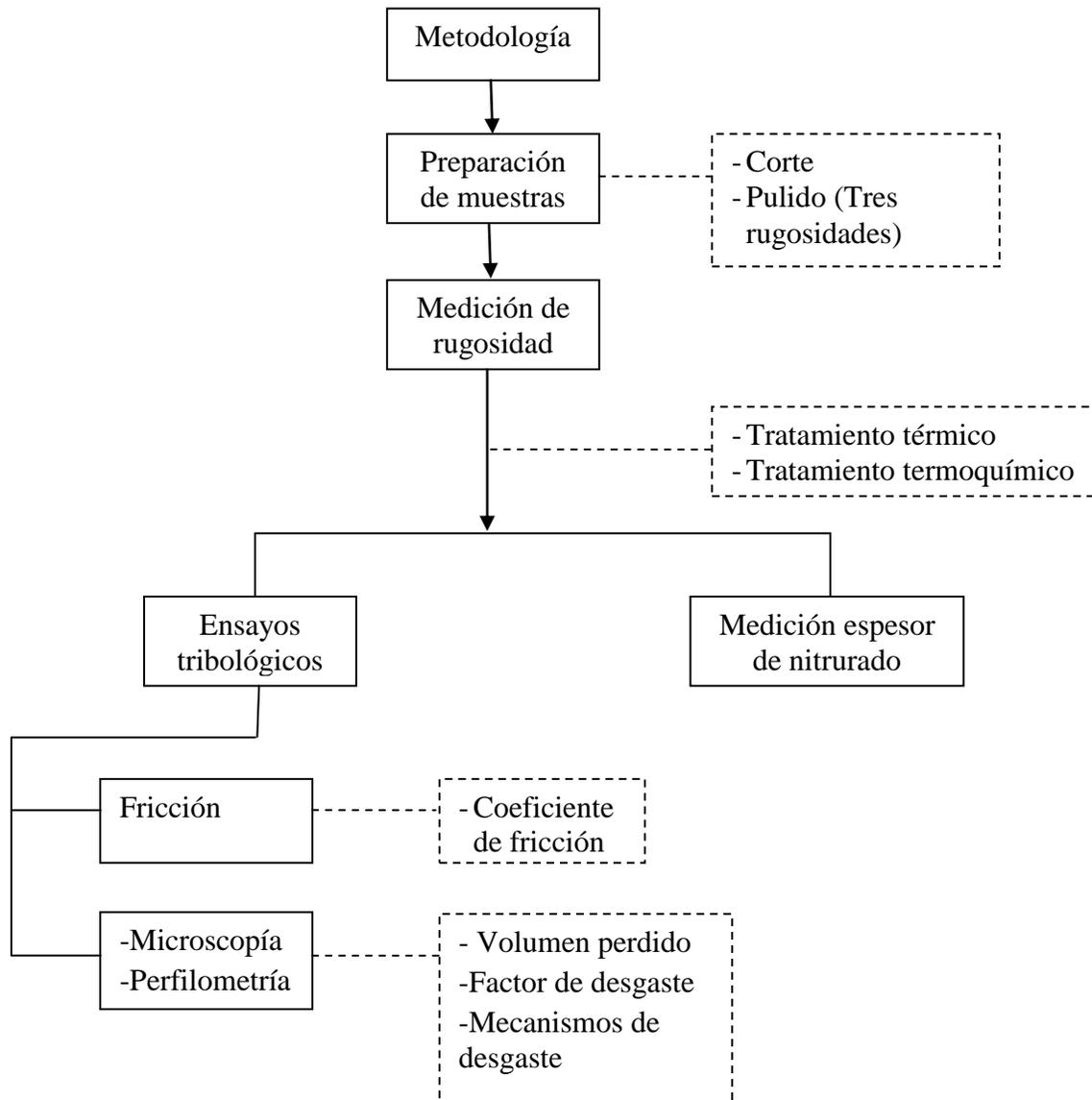


Figura 3.1 Esquema general de la metodología

3.2 Materiales

Para el desarrollo de esta investigación se utilizó una barra de acero para herramienta tipo AISI H13 fabricado por la empresa SCHMOLZ + BICKENBACH (Querétaro, México). La composición química de este acero se presenta en la tabla 3.1 (ANEXO A).

Tabla 3.1 Composición químicas del acero tipo H13

Composición química %							
C	Cr	Mn	Mo	P	S	Si	V
0.400	4.850	0.490	1.250	0.013	0.002	1.080	0.910

3.3 Preparación de muestras

Las probetas ensayadas a fricción y desgaste fueron manufacturadas a partir de una barra redonda de 25.4 mm de diámetro de un acero para herramienta tipo AISI H13; en cuanto a la forma de corte de la muestra se debe tener en cuenta que esta operación debe realizarse en condiciones tales que no afecten la estructura superficial de la misma. Por lo tanto se debe cuidar que la temperatura del material no se eleve demasiado durante este proceso, por tal motivo el corte del material se llevó a cabo con una máquina de sierra de cinta con refrigerante. Las dimensiones y propiedades geométricas finales de las probetas se indican en la figura 3.2.

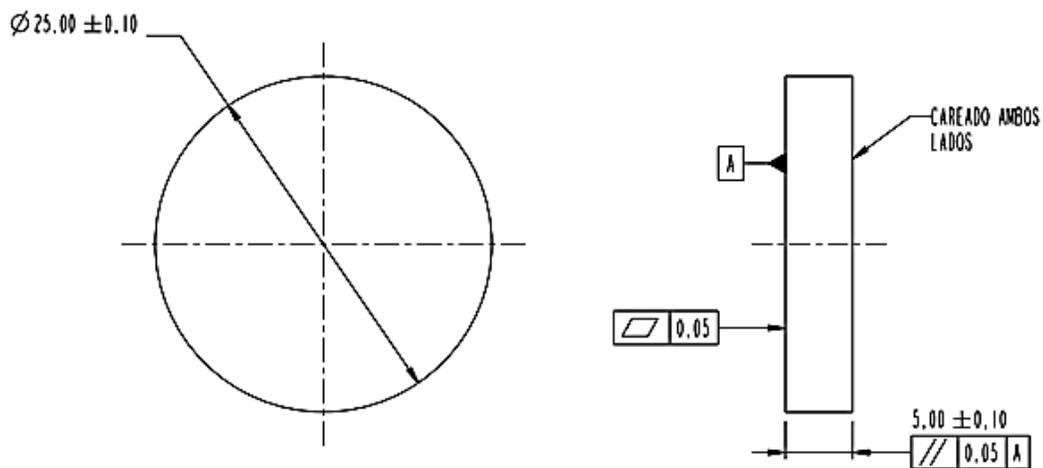


Figura 3.2 Especificación de probeta (cotas en mm).

Seguido de esta operación las muestras se limpiaron con etanol y se secaron con aire caliente para retirar cualquier suciedad y/o residuo. Se montó la muestra en el porta-probetas asegurándose de que esta estuviera bien sentada en la base (Fig. 3.3) con una pulidora LaboPol-1 marca Struers las probetas fueron desbastadas y pulidas gradualmente mediante lijas de carburo de silicio de diferentes tamaños de grano.

Durante tiempos determinados la muestra es apoyada ligeramente sobre la superficie del abrasivo el cual se coloca sobre el disco rotativo de la pulidora ya mencionada y girando a 250 rpm, durante la operación se deja fluir una corriente de agua constante la cual limpia los pequeños desprendimientos de material y a su vez lubrica y refrigera la zona desbastada (Fig. 3.4), cabe mencionar que al cambiar de un abrasivo a otro se lava bien la probeta para no transportar partículas desprendidas del abrasivo anterior y se rota la muestra a 90° de tal manera que el rayado sea perpendicular al anterior, obteniendo así tres acabados superficiales distintos los cuales se agrupan en tres categorías: piezas desbastadas gradualmente hasta con un abrasivo de tamaño de grano de 120, 400 y 1000. Los diferentes abrasivos y tiempos de ciclos utilizados para conseguir dichos acabados superficiales se indican en la tabla 3.2.



Figura 3.3 Montaje de muestra



Figura 3.4 Pulido de pieza

3.4 Ensayo de rugosidad

Nuevamente la muestras son limpiadas con etanol absoluto y colocada en una mesa anti-vibratoria, el palpador del rugosímetro surfet SJ-400 marca Mitutoyo es situado en la superficie de la muestra y se ejecuta el ensayo de rugosidad bajo un parámetro Ra de

acuerdo a la norma ISO 4287:1997 con una longitud de evaluación de 4.0 mm (Fig. 3.5), este ensayo es realizado en tres ocasiones en cada probeta como se observa en la figura 3.6 para corroborar la homogeneidad de la rugosidad en toda el área de la superficie.

Tabla 3.2 Metodología de pulido

Categoría	Tamaño de grano del abrasivo	Tiempo (s)
Rugosidad 1	80	90
	120	60
Rugosidad 2	80	90
	120	60
	400	60
Rugosidad 3	80	90
	120	60
	400	60
	600	60
	800	60
	1000	60

3.5 Tratamientos térmicos y termoquímicos

Las condiciones de los tratamientos térmicos son establecidas por el proveedor obteniendo una dureza de 52.2 HRC. EL nitrurado lo realiza la empresa Oerlikon Balzers (Querétaro, México) mediante un proceso comercial utilizando la técnica de nitruración gaseosa (ANEXO B y C).

3.6 Medición de espesor de capa del proceso de nitrurado

Mediante una máquina de electroerosión por hilo una muestra de acero H13 nitrurada es cortada de forma transversal (Fig. 3.7). La sección cortada se prepara mediante un desbaste con lija de carburo de silicio desde No. 80 hasta No. 1500, posteriormente se pule con alúmina de 0.05 μm con un paño MDChem. Para revelar la estructura se ataca químicamente utilizando un reactivo Nital al 2% durante 15 segundos.



Figura 3.6 Ensayo de rugosidad

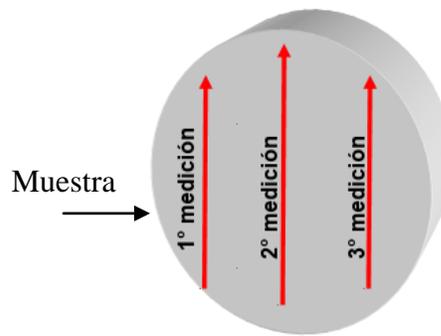


Figura 3.5 Medición de rugosidad



Figura 3.7 Muestra cortada de forma transversal

3.7 Ensayo de fricción y desgaste

Los ensayos de fricción se llevaron a cabo en un tribómetro CSM Instruments mediante pruebas de pin-on-disk de acuerdo a la norma ASTM G99-05 a temperatura controlada de 25 °C y 100 °C para la condición en seco (Fig. 3.8) y húmedo respectivamente. Para el ensayo con lubricación se emplearon 70 ml de disolución de grafito base aceite (Fig. 3.9). La carga normal aplicada en ambos tribosistemas fue de 10 N, que genera un esfuerzo de contacto de 1190 MPa, el cálculo se realizó usando las ecuaciones de esfuerzos de contacto de Hertz tomando como carga máxima el esfuerzo de cedencia del acero tipo AISI H13, como contraparte se utilizó un pin de bola de 6.0 mm de diámetro de carburo de tungsteno (WC) con una microdureza, rugosidad y módulo de elasticidad de 1370 (HV0.5), 0.02 μm y 670 GPa, respectivamente. La velocidad lineal se estableció en 25 mm/s de acuerdo a las especificaciones operativas del equipo. La distancia de desplazamiento del ensayo fue de 1000 m, la cual corresponde a 80,000 ciclos aproximadamente del proceso de forja.

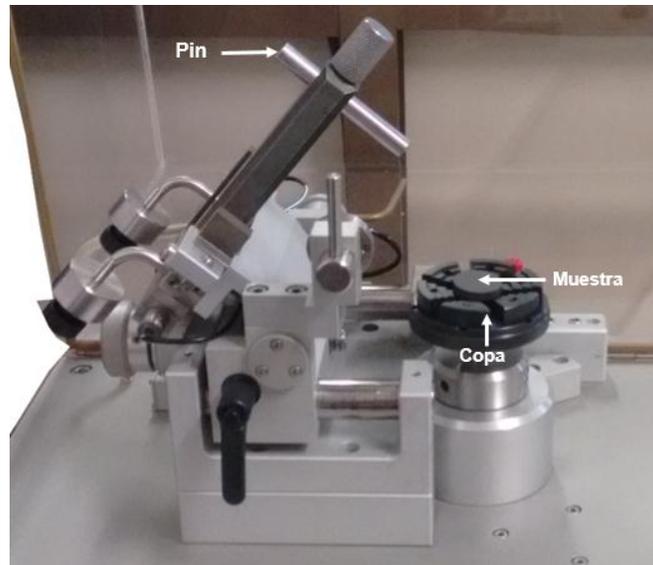


Figura 3.8 Configuración para ensayo en seco

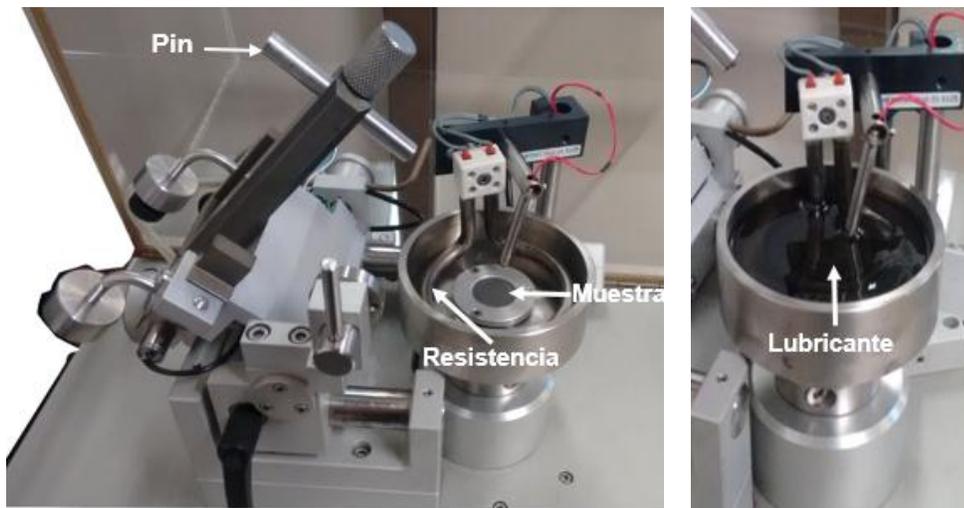


Figura 3.9 Configuración para ensayo con lubricante

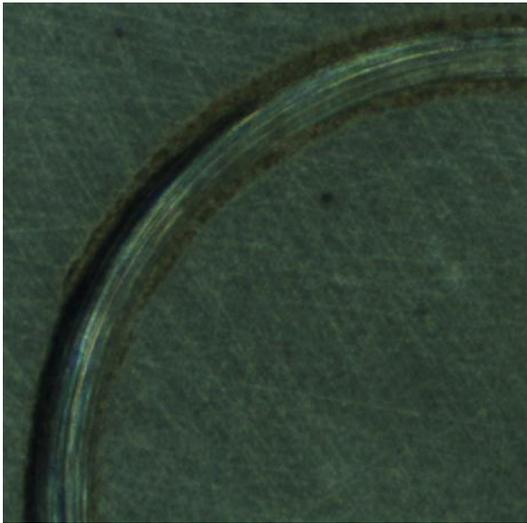
3.8 Microscopia óptica

3.8.1 Medición de ancho de huella

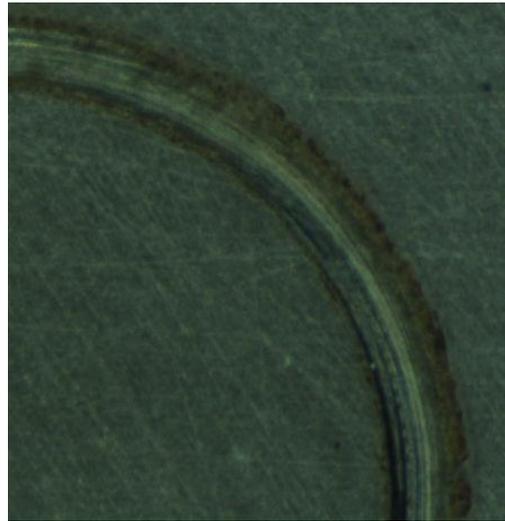
La microscopia óptica es empleada para realizar la medición del ancho de huella, para lo cual la pista de desgaste es seccionada en cuatro partes y utilizando un microscopio Stereo marca Zeiss (Fig. 3.10) se toma una micrografía a cada sección de la huella de desgaste como se observa en la figura 3.11.



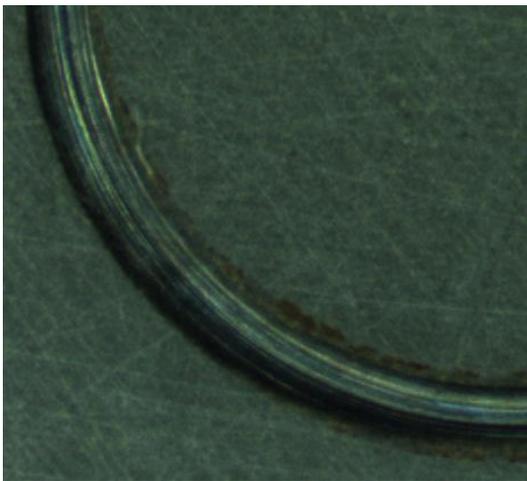
Figura 3.10 Microscopio Stereo



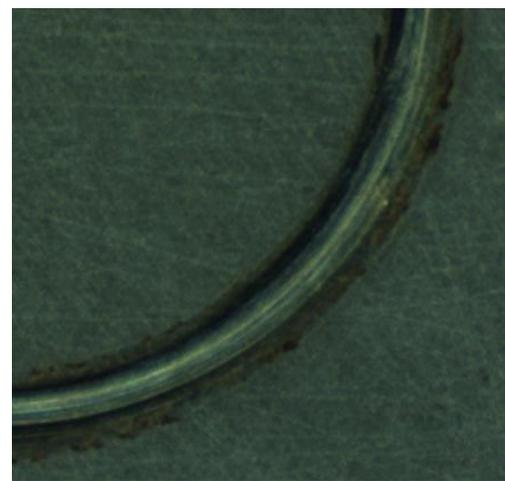
a)



b)



c)



d)

Figura 3.11 Pista de desgaste: Cuadrante I (a) Cuadrante II (b) Cuadrante III (c) Cuadrante IV (d)

Se realizan 25 mediciones en cada cuadrante de la pista de desgaste utilizando el Software ZEN™ (Fig. 3.12) y se calcula un promedio de estas mediciones.

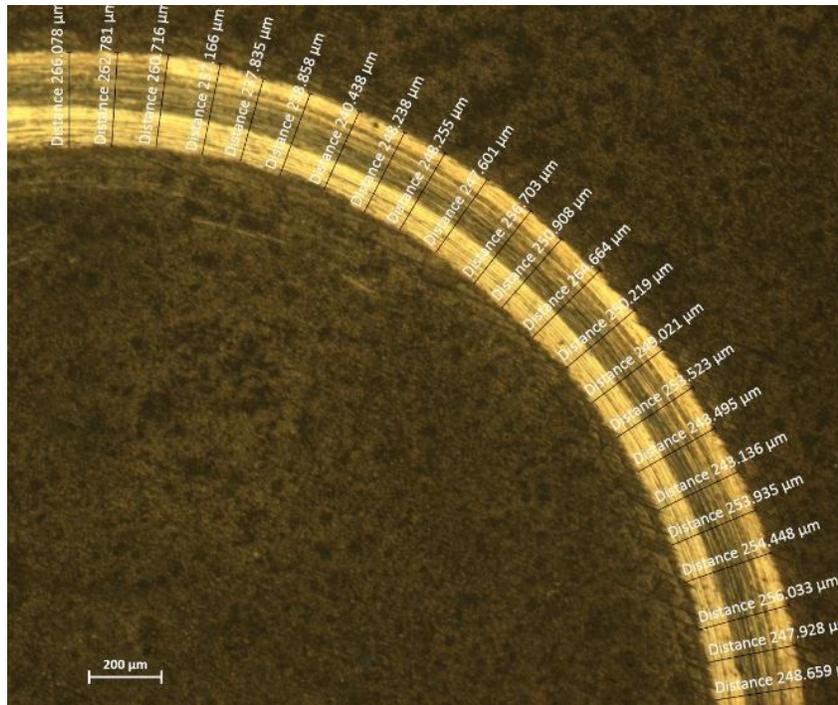


Figura 3.12 Medición de la pista de desgaste

3.8.1.1 Volumen perdido y tasa de desgaste

Para el cálculo del volumen perdido de acuerdo a la norma ASTM G99-05, se calculó mediante la siguiente fórmula asumiendo que no existe desgaste significativo del pin (contraparte).

$$Volumen\ perdido = 2\pi R[r^2 \sin^{-1}(d/2r) - (d/4)(4r^2 - d^2)^{1/2}] \quad \text{Ecuación 3.1}$$

- Dónde:
- R= El radio de la pista de desgaste
 - r= Es el radio el pin
 - d= El ancho de la pista de desgaste

Por último el factor de desgaste se calculó mediante la siguiente relación:

$$Tasa\ de\ desgaste = \frac{V}{F*s} \quad \text{Ecuación 3.2}$$

- Dónde:
- V= Volumen perdido
 - F= Fuerza aplicada
 - s= Distancia recorrida

3.8.2 Mecanismo de desgaste

Para determinar el tipo de desgaste generado en la pista de desgaste, se lleva a cabo por medio de microscopia óptica; se obtienen micrografías de la huella a 100 X para los ensayos en seco y a 200 X para los ensayos con lubricante, utilizando la técnica de campo claro con un microscopio metalográfico Axio Imager A1 (Fig. 3.13)



Figura 3.13 Microscopio metalográfico Axio Imager A1

3.9 Perfil de huella.

Por perfilometría se realizan 12 mediciones del perfil de huella utilizando un rugosímetro SurfTest SJ-400 de Mitutoyo. Los perfiles se obtuvieron situando el palpador del rugosímetro en el centro del radio de la huella de desgaste y ejecutando el ensayo bajo un parámetro Rz en base a la norma ISO 4287:1997 con una longitud de evolución de 4.0 mm pasando por la huella de desgaste tal y como se observa en la figura 3.14 y posteriormente con ayuda del software OriginPro 8 se obtiene la gráfica del perfil.

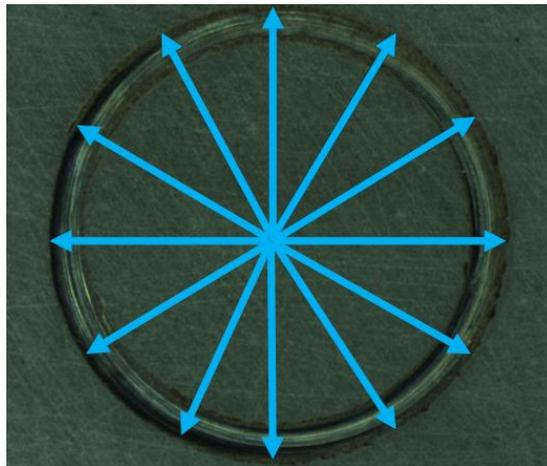


Figura 3.14 Medición de perfiles de huella.

Capítulo 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Medición de rugosidad

De acuerdo a la preparación descrita en la sección 2.4 se consiguieron los tres diferentes acabados superficiales. Para apreciar de manera significativa las tres categorías de rugosidad en la figura 4.1 se muestra la gráfica de rugosidad promedio de cada categoría. En la gráfica se muestra un primer valor en Ra el cual se denominará R1 con un valor promedio de $0.42\ \mu\text{m}$ seguido de un segundo valor denominado R2 con un valor promedio $0.08\ \mu\text{m}$ y finalmente un valor denominado R3 de $0.03\ \mu\text{m}$; en base a estos valores se considera que R1 presenta una rugosidad burda, R2 a rugosidad media y R3 una rugosidad fina.

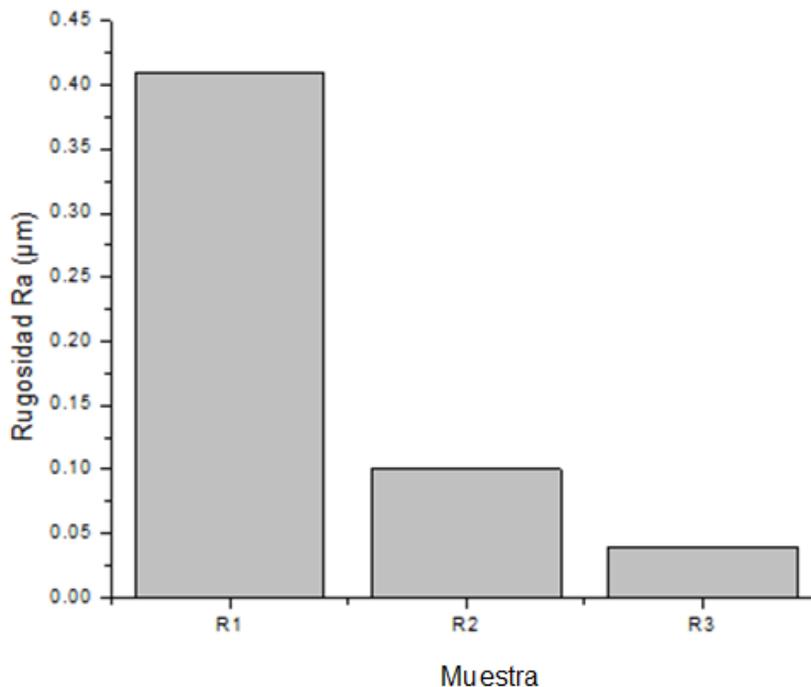


Figura 4.1 Rugosidad promedio Ra del acero AISI H13.

4.2 Medición del espesor de la capa de nitrurado

El espesor de la capa nitrurada se obtuvo por medio de un microscopio metalográfico con la técnica de campo claro y el software ZENTM. En la figura 4.2 se muestra la micrografía a una magnificación 100 X de la sección transversal de una muestra de acero H13 nitrurado, en la que se observa un espesor uniforme a lo largo de la sección transversal con un valor promedio de $67.28\ \mu\text{m}$ que de acuerdo a las especificaciones proporcionadas por el

proveedor el valor medido es de 80 μm , por lo que el valor se encuentra por debajo de estas especificaciones.

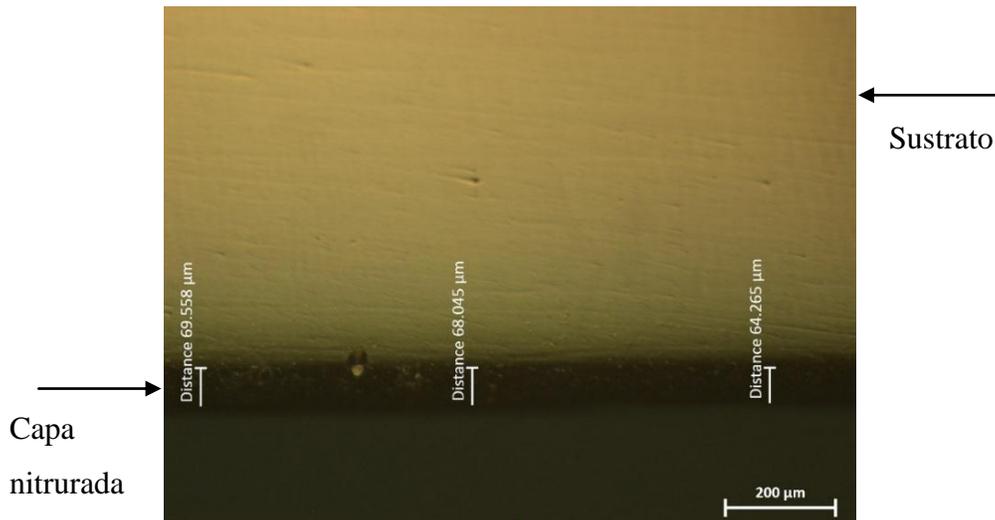


Figura 4.2 Medición del espesor de la capa de nitruado

4.3 Análisis tribológico de acero H13 nitruado en seco

4.3.1 Coeficiente de fricción

El comportamiento de la curva del coeficiente de fricción del ensayo pin on disk para las muestras R1, R2 y R3 del acero H13 nitruado en condición en seco se muestra en la figura 4.3. Durante los primeros 100 m se observa que para la muestra R1-S (Rugosidad burda) el coeficiente de fricción se eleva de manera muy significativa alcanzando un valor promedio de $0.8 \mu_k$ a partir de este punto hasta los 550 m se observa un comportamiento estable con ligeras fluctuaciones y a partir de los 600 m hasta el término de la prueba presenta una ligera tendencia a seguir aumentando, finalmente alcanza un valor promedio de $0.82 \mu_k$. Las muestras R2-S y R3-S (Rugosidad media y fina) por el contrario mantienen un comportamiento más estable desde los 100 m hasta el término del ensayo con pequeñas oscilaciones alcanzando valores de coeficiente de fricción de 0.68 y $0.69 \mu_k$, respectivamente.

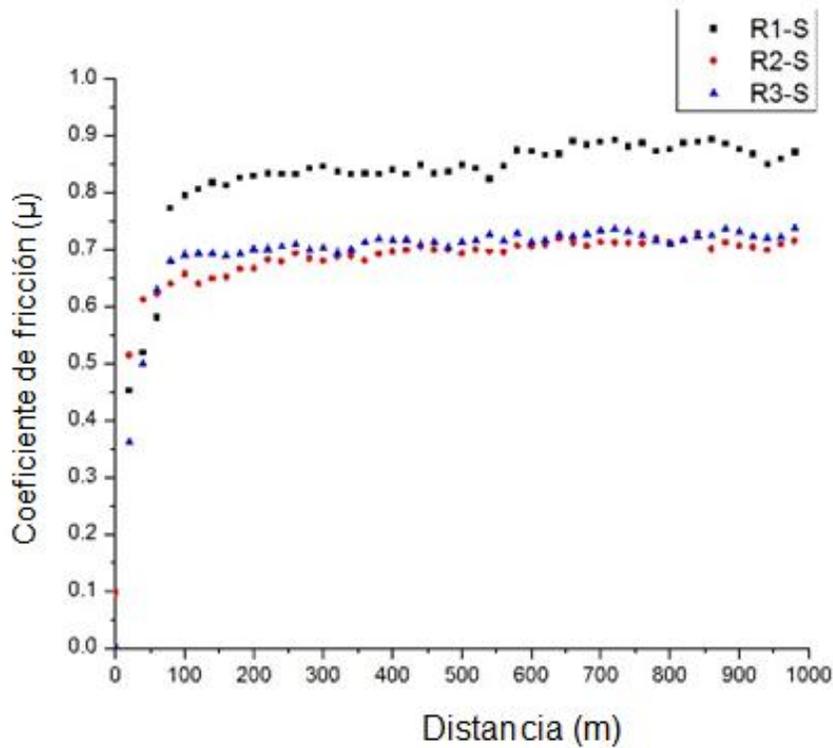


Figura 4.3 Coeficiente de fricción para las pruebas en seco

Como puede observarse en la figura 4.3, existe una variación en el coeficiente de fricción, siendo éste mayor para la muestra R1-S (Rugosidad burda) que se encuentra un 15% mayor respecto a los valores de R2-S y R3-S. Este comportamiento podría atribuirse a que las partículas desprendidas durante las pruebas de fricción quedan atrapadas en las marcas del desgaste abrasivo, mismas que actúan como nuevas superficies rugosas que incrementan el coeficiente de fricción. Sin embargo, las muestras R2-S y R3-S, a pesar de tener rugosidades iniciales diferentes muestran un coeficiente de fricción muy similar aunque el valor del factor de desgaste para la probeta R3-S disminuye un 75% al tener un menor ancho de huella (Tabla 4.1).

4.3.2 Volumen y tasa de desgaste

En esta sección se analiza el volumen perdido y el factor de desgaste, en las figuras 4.2 a, 4.2 b y 4.2 c se muestran las imágenes representativas de las huellas de desgaste generadas en las pruebas de fricción para las probetas R1-S, R2-S y R3-S, observándose una disminución del ancho de huella con forme disminuye la rugosidad; el valor promedio del ancho de huella para R3 (Rugosidad fina) disminuye un 20 % respecto al valor promedio del ancho de huella R1 (Rugosidad burda) mientras que los perfiles correspondientes a cada

huella evidencian la profundidad del desgaste y la acumulación del material sobre la superficie.

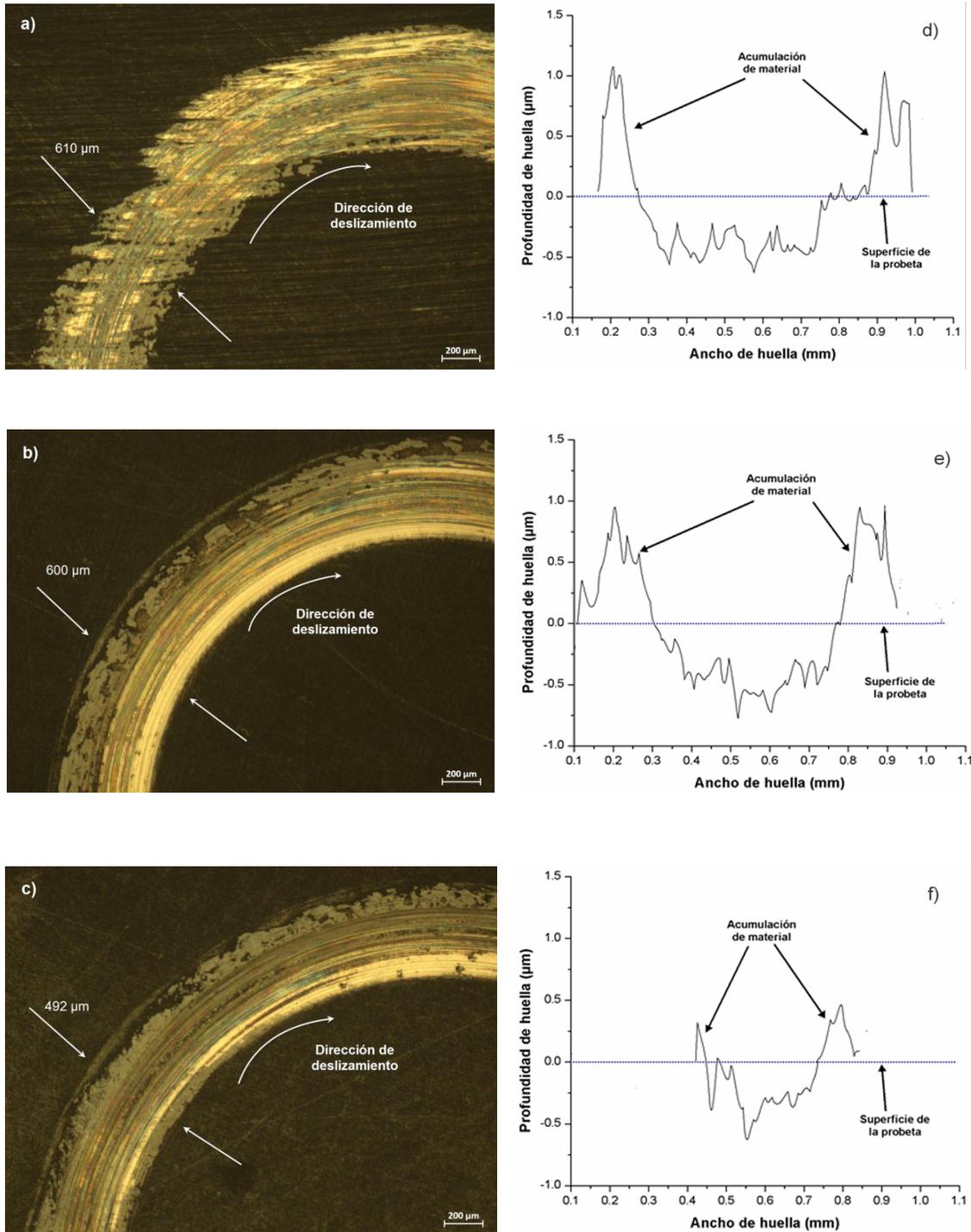


Figura 4.4 Micrografías ópticas (50X) de los anchos de la huella en condición en seco: a) R1, b) R2, c) R3 y perfiles de huella: d) R1, e) R2 y f) R3.

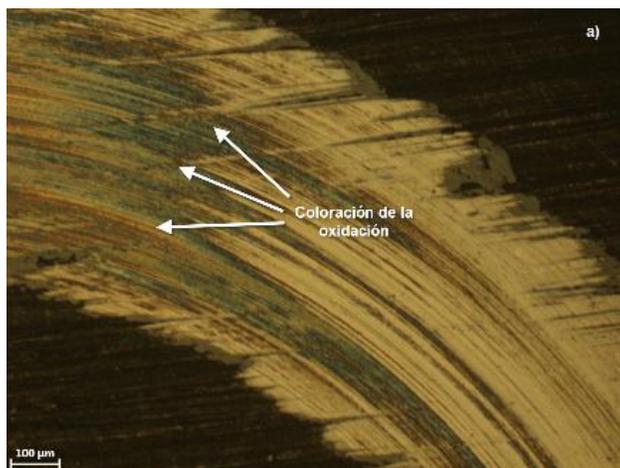
Una vez medidos los anchos de huella, se calcularon los volúmenes perdidos de material y los factores de desgaste con las ecuaciones 3.1 y 3.2, respectivamente, mismos que se presentan en la tabla 4.1. De acuerdo a los valores obtenidos se observa una tendencia descendente del volumen perdido y el factor de desgaste conforme disminuye la rugosidad superficial de hasta un 49 % de R3 (Rugosidad fina) respecto a R1 (Rugosidad burda).

Tabla 4.1 Valores promedio del coeficiente de fricción, volumen perdido y factor de desgaste para las muestras R1-S, R2-S y R3-S

Probeta	Volumen perdido (mm ³)x10 ⁻⁴	Factor de desgaste (mm ³ /Nm)x10 ⁻⁸
R1-S	817.61	817.61
R2-S	793.26	793.26
R3-S	419.39	419.39

4.3.3 Análisis de mecanismos de desgaste

En la figura 4.5 se muestran las micrografías donde se observan las superficies desgastadas de las probetas R1-S, R2-S y R3-S, en las cuales se observan surcos en dirección del deslizamiento, fenómeno característico de un desgaste abrasivo. Se puede observar que algunos de estos surcos presentan colores café, azul y negro, que hacen suponer que se presentó oxidación en la superficie, esta característica se presenta en mayor proporción en la probeta S3.



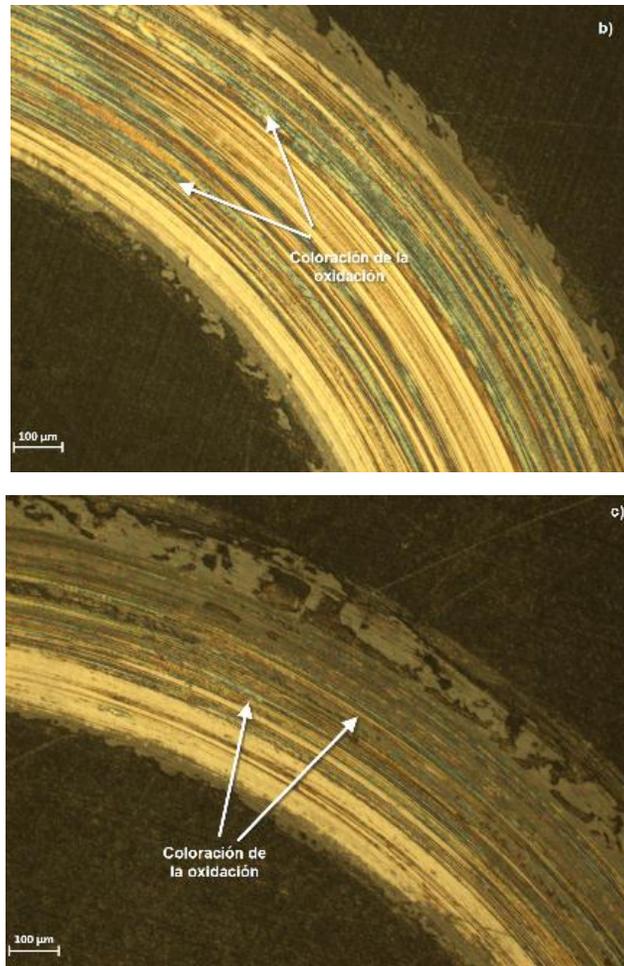


Figura 4.5 Micrografías ópticas (100X) de las superficies desgastadas: a) R1-S, b) R2-S y c) R3-S

El desgaste abrasivo es el mecanismo de desgaste predominante y está presente en las tres probetas. También se observa en el perfil de las huellas de desgaste una acumulación de material que no solo es debido a la deformación plástica del material por los elevados esfuerzos de contacto sino también a las partículas de desgaste que se van adhiriendo por la acción de la fuerza aplicada a ese mismo material desplazado (Fig. 4.5).

Por otra parte, la oxidación de la superficie tal como se observa en los surcos de colores en la figura 4.5, el cambio en la coloración de los surcos está relacionado con el aumento de la temperatura de la pieza a lo largo de toda la prueba siendo los de color café los primeros en presentarse, mientras que los azules aparecen conforme se incrementa la temperatura, debido a la fricción en la superficie desgastada.

4.4 Análisis tribológico de acero H13 nitrurado con lubricante

4.4.1 Coeficiente de fricción

En la figura 4.6 se observa una gráfica de los valores obtenidos del coeficiente de fricción de los diferentes acabados superficiales correspondientes a las pruebas en condiciones en lubricante; para el caso de R1-L presenta un valor máximo al inicio de la prueba de $0.135 \mu_k$ disminuyendo paulatinamente hasta los 200 m, a partir de este punto el coeficiente de fricción se mantiene estable obteniendo un valor promedio de $0.11 \mu_k$, en el caso de la muestra R2-L se observa un comportamiento estable en todo el transcurso de la prueba con una ligera tendencia a seguir aumentando obteniendo un valor promedio de $0.10 \mu_k$, por último, para la muestra R3-L alcanza su valor máximo siendo este de $0.125 \mu_k$ al inicio de la prueba disminuyendo gradualmente hasta los 550 m donde a partir de este punto el coeficiente de fricción se mantiene estable hasta el término del ensayo arrojando un valor promedio de $0.10 \mu_k$.

Como puede observarse en la figura 4.6 el comportamiento del coeficiente de fricción en la condición húmeda no varía significativamente y se mantiene estable a lo largo de la prueba.

4.4.2 Volumen y tasa de desgaste

En la figura 4.7, se observa las micrografías a una magnificación de 200 X representativas de las huellas de desgaste generadas en las pruebas de fricción para las probetas R1-L, R2-L y R3-L en condición húmedo, en ellas se muestra que el valor del ancho de huella no es influenciado por la rugosidad, siendo la rugosidad media (R2) la que tiene el valor menor de ancho del ancho de huella así como de volumen de desgaste y factor de desgaste y los perfiles de huella se corrobora el ancho de huella obtenidos por medio de microscopía, se observa además la profundidad de la misma.

Los volúmenes perdidos de material y los factores de desgaste se presentan en la tabla 4.2 De acuerdo a los valores obtenidos se observa que la rugosidad media (R2) el volumen perdido y la tasa de desgaste disminuye hasta un 72 % respecto a la rugosidad burda (R1).

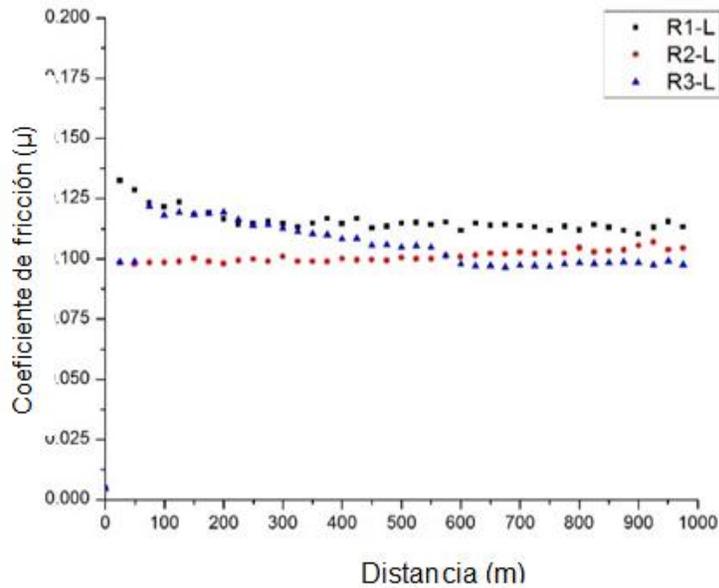


Figura 4.6 Coeficiente de fricción para las pruebas con lubricante

4.4.3 Análisis de mecanismos de desgaste

En la figura 4.8 se muestran las micrografías donde se observan las superficies desgastadas de las probetas R1-L, R2-L y R3-L, en las cuales se observan también desgaste abrasivo pero en menor grado.

En la figura 4.9 se muestra una gráfica del comportamiento del coeficiente de fricción para las dos condiciones de prueba; en seco y con lubricante. Se puede observar que en la condición en seco el coeficiente de fricción es influenciado respecto a la rugosidad de muestra mientras a diferencia en la condición con lubricante de los valores del coeficiente de fricción se ve un comportamiento constante a lo largo de la distancia de deslizamiento.

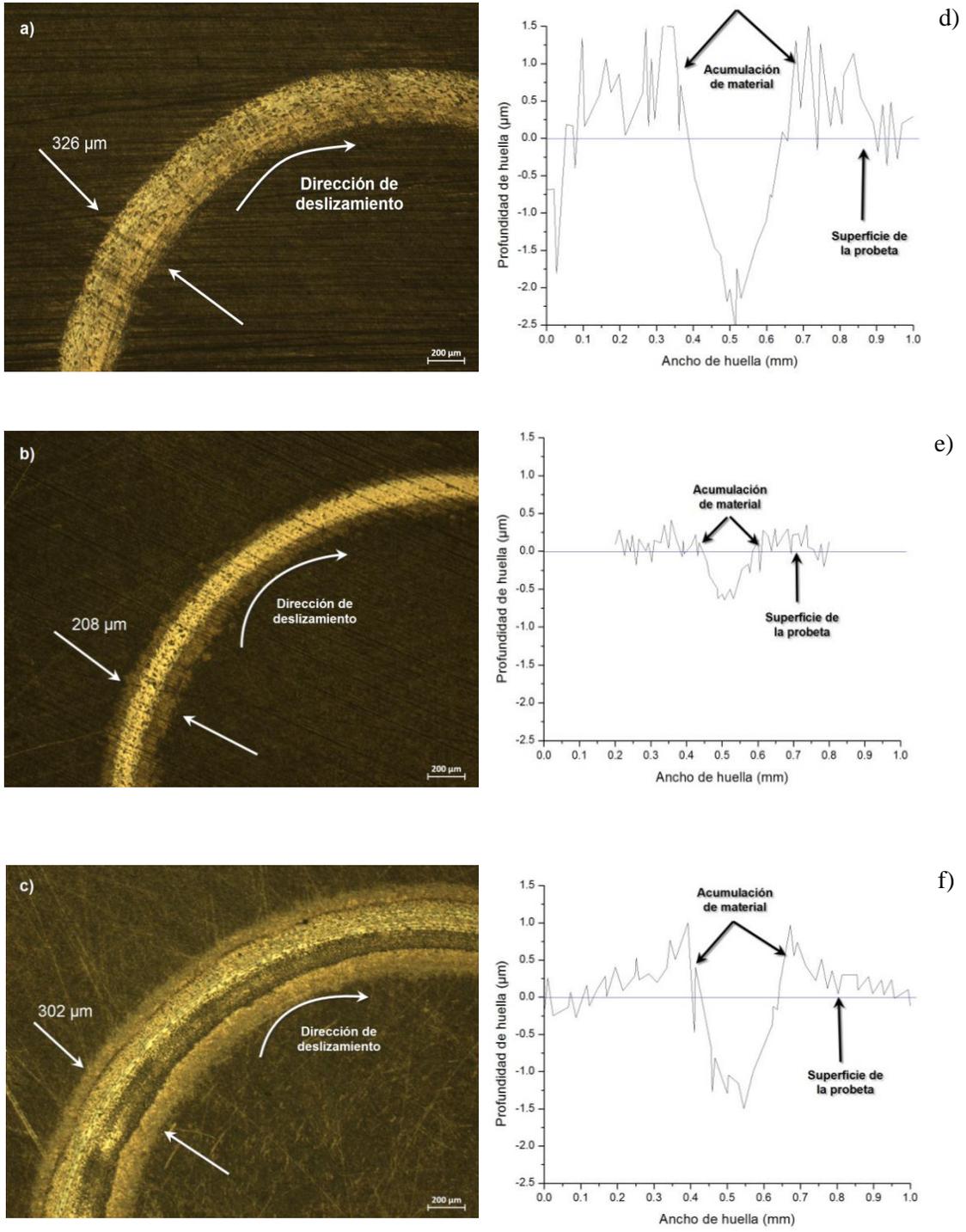


Figura 4.7 Micrografías ópticas (50X) de los anchos de la huella en condición en húmeda: a) R1, b) R2, c) R3 y perfiles de huella: d) R1, e) R2 y f) R3.

Tabla 4.2 Valores promedio del coeficiente de fricción, volumen perdido y factor de desgaste para las muestras R1-L, R2-L y R3-L

Probeta	Volumen perdido (mm ³)x10 ⁻⁴	Factor de desgaste (mm ³ /Nm)x10 ⁻⁸
R1-L	124.05	124.05
R2-L	33.68	33.68
R3-L	92.25	92.25

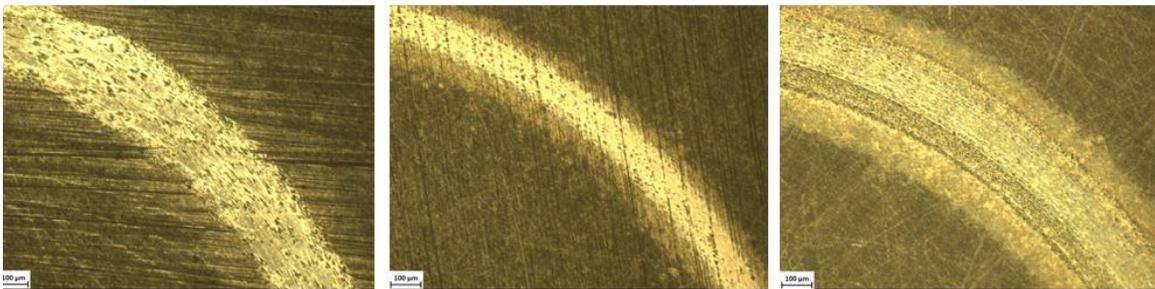


Figura 4.8 Micrografías ópticas (200X) de las superficies desgastadas: a) R1-L, b) R2-L y c) R3-L

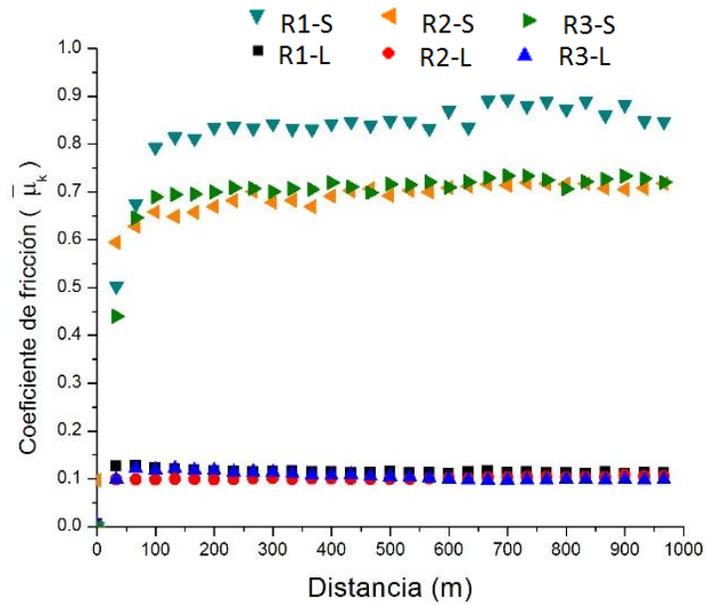


Figura 4.9 Coeficiente de fricción de ambos tribosistemas, seco (S) y con lubricante (L)

Finalmente en la Tabla 4.3 se muestra un resumen de los valores de coeficiente de fricción para las muestras R1, R2 y R3 en las dos condiciones de prueba; en seco y con lubricante.

Tabla 4.3 Coeficiente de fricción para las dos condiciones de prueba

MUESTRA	CONDICIÓN	RESULTADO	
		CARGA [N]	COEF. DE FRICCIÓN [μ k]
R1-S	SECO	10	0.8267 \pm 0.0923
R2-S	SECO	10	0.6848 \pm 0.0486
R3-S	SECO	10	0.6959 \pm 0.0785
R1-L	LUBRICADO 100 °C	10	0.1163 \pm 0.0051
R2-L	LUBRICADO 100 °C	10	0.1011 \pm 0.0053
R3-L	LUBRICADO 100 °C	10	0.1051 \pm 0.0084

Por último en la figura 4.10 se muestra de manera gráfica el valor del factor de desgaste para ambos tribo-sistemas, donde se observa la disminución significativa del valor del factor de desgaste, disminuyendo hasta un 70% para las pruebas con lubricante en comparación de la condición en seco.

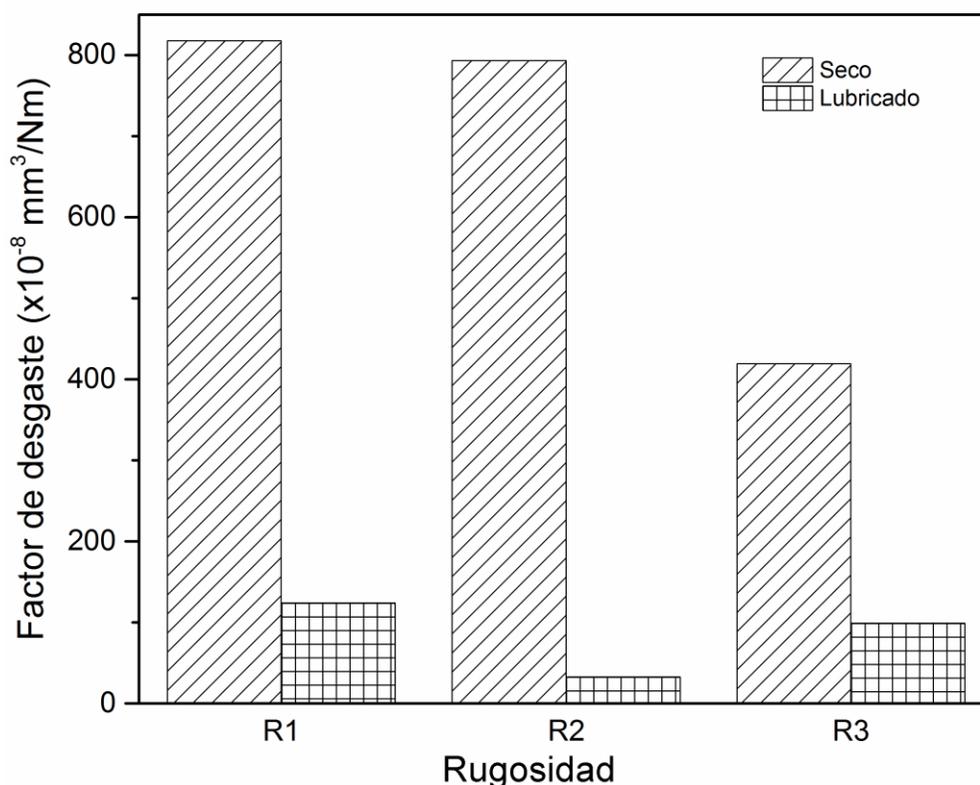


Figura 4.10.- Factor de desgaste para condiciones en seco y con lubricación.

CONCLUSIONES

Para el acero H13 nitrurado el comportamiento del coeficiente de fricción en las pruebas en seco se presentó una variación, siendo este mayor para la rugosidad R1 que presenta un valor 15% mayor respecto a la rugosidad R2 y R3. Este comportamiento podría atribuirse a que las partículas desprendidas durante las pruebas de fricción quedan atrapadas en las marcas del desgaste abrasivo, mismas que actúan como nuevas superficies rugosas que incrementan el coeficiente de fricción, por otro lado para las pruebas con lubricante el coeficiente de fricción no se ve afectado por la rugosidad superficial de las probetas manteniéndose estable para las tres rugosidades y además el valor del mismo disminuye hasta un 76% respecto a las pruebas en seco.

Con respecto al volumen perdido y el factor de desgaste para las pruebas en seco se ven influenciadas por el acabado superficial del acero, ya que presentan una tendencia a aumentar conforme se incrementa la rugosidad superficial, este comportamiento ya ha sido observado por otros investigadores usando diferentes materiales metálicos, mientras que para las pruebas con lubricante el volumen perdido y el factor de desgaste es independiente a la rugosidad superficial, siendo la rugosidad media (R2) con la cual se obtuvo el menor valor de estos parámetros.

Respecto al mecanismo de desgaste para los dos tribo-sistemas, el desgaste por abrasión es el predominante para ambos casos presentándose oxidación en la superficie para pruebas en seco debido a que existe interacción entre la superficie de la probeta y el ambiente.

En general, las rugosidades R3 (0.03 Ra) y R2 (0.08 Ra), en condiciones en seco y lubricadas, respectivamente, presentan un mejor comportamiento al desgaste; sin embargo aún faltan hacer más estudios para llegar a tener un criterio de rugosidades más amplio para confirmar la tendencia que presenta el factor de desgaste.

ANEXOS

ANEXO A. Certificado de material

SCHMOLZ + BICKENBACH Providing special steel solutions 		Comptor Ventas Conlato - Queretaro Pedido No. 02/25/2015 3850069909/10 02/24/2015 No. 8000012640/0004 Lic. 02/25/2015		Pedido cliente: INSTITUTO TEC. CELAYA Entrega/Pos. de No. Material 40102531		Mill Cert.: 182385 Certificado Inspeccion 3.1 Ac. to EN 10204 02/25/2015			
Destinatario: Ventas Conlato - Queretaro		No. Pedido produccion 3649000919		Ventas Conlato - Queretaro Pedido No. 02/25/2015 3850069909/10 02/24/2015 No. 8000012640/0004 Lic. 02/25/2015		Standard cliente: Industry Standard:			
Dimension A 25.5000 mm		Dimension B 0.0000 mm		Dimension C 1800.0000 mm		No. Material 40102531			
Composicion quimica en %									
Heat-No.	C	Cr	Mn	Mo	P	S	Si	V	
255374	0.400	4.850	0.450	1.250	0.013	0.002	1.080	0.910	
Propiedades mecanicas									
Producto / Steel making Process X40CrMoV5-1 redondo +AC		Dureza Standard:		Prueba de tension Standard:		Temperatura Referen Dureza HRC		Prueba de impacto Standard:	
Paso Entrega PZ		Job No.: Detail No.: Part No.:		HB 215		Promed.		Prueba magnetica	
Pruebas adicionales								Pruebas	
All data indicated serve as a information - only the original data from our supplier are valid. Todos datos indicados se entienden para informacion - solamente los datos originales de nuestro proveedor son los vigentes.									

ANEXO B. Certificado de calidad para tratamiento térmico



CERTIFICADO DE CALIDAD (Tratamiento Térmico)

Cliente No.: 5587
 Nombre del Cliente: Rosalia Cruz Mancera
 Dirección: Soto y Gama 118
 Población: Celaya
 Teléfono: 461 136 66 33

Folio: 11523193-8-2015
 Fecha: martes, 18 Agosto, 2015

Oerlikon Balzers Coating Mexico, S.A. de C.V.
 Matriz:
 Acceso III No. 304 y 306
 Col. Ind La Montaña
 Queretaro, Qro 76150
 Tel. +52 (442) 209 68 00
 Fax: +52 (442) 209 68 19

Sucursal:
 Blvd. Futuro 520
 Parque Industrial Cormoran
 Saltillo, Coah 25020
 Tel. +52 (844) 413 59 56
 Fax: +52 (844) 413 59 30
 info.coating.mexico@oerlikon.com
 www.oerlikon.com/coating/mexico

Certificamos que las partidas que se enlistan a continuación, han sido templadas conforme a nuestros procedimientos planteados, para obtener la tenacidad y resistencia que requieren las piezas.

1. Datos Generales y Estados de las Herramientas después del proceso

Partida	Orden	Referencia Artículo Cliente	Tipo de Tratamiento Térmico	Herramienta o Producto Tipo de Acero	Lote de Tratamiento	Dureza Obtenida en Balzers
1	11523193	H SIEMENS	BA111H RM	Material para BA111H RM Acero T1 H13	BA099370	52 HRc
Datos de Ingresos y Valores Solicitados						
Dureza final HRc			52-54	Apariencia de las piezas: Homogénea		
Peso en kg			1			
Piezas por pieza			54			

Observaciones:

Elaborado por:

Hector Ramirez Aviles
 Operador Líder TTV

Autorizado por:

Ing. Rolando Aguilera
 Gerente de Calidad

ANEXO C. Certificado de calidad del nitrurado

	CERTIFICADO DE CALIDAD	Oerlikon Balzers Coating Acceso III No. 304/306 Col. Ind. La Montaña Tel. (442) 209 68 00 Lab. (442) 209 68 24
---	-------------------------------	---

Cliente: Rosalía Cruz Mancera
 Dirección: Soto y Gama 118, Emiliano Zapata, Celaya.
 Guanajuato.
 Tel. S/N

Folio: S/N
 Fecha: 26 de Agosto del 2015
 Referencia: BMX-LCPN-4526-15

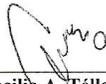
Certificamos que las partidas que se enlistan a continuación, han sido procesadas conforme a nuestros procedimientos planteados, para obtener la dureza superficial y profundidad de capa total que requieren las piezas. Se utilizó la norma ISO 4970 para la determinación de la profundidad de capa.

1. Datos Generales

Partida	Orden	Tipo de acero	No. de piezas	Tipo de herramienta/Ref. del cliente.	Lote de tratamiento termoquímico	Tipo de tratamiento térmico
1	11524319	H13	56	S/N	BA089372	Nitrurado

2. Estado de las herramientas después del proceso.

Partidas	Profundidad de Capa Total	Dureza Superficial de nitrurado	Apariencia general
1	0.08 mm	1145.3 HV0.05	Homogénea

Autorizado por: 

I.M. Cecilia A. Téllez Núñez
 Ingeniero de Estudios

Elaborado / revisado por: José Luis Andrés Ugalde	Validado por: Rolando Aguilera	Número de documento : 0478
Autorizado por: Lourdes Ramírez	Fecha: 18/07/11	Revisión: C Número de página : 1 / 1

ANEXO D. Constancia de asistencia al VII Congreso Nacional de Ciencia e Ingeniería en Materiales 2016



**INFLUENCIA DE LA RUGOSIDAD INICIAL EN EL
COMPORTAMIENTO TRIBOLÓGICO DE
UN ACERO H13 NITRURADO**

José Luis Martínez Carreño

Instituto Tecnológico de Celaya
lutz_mtz_91@hotmail.com

Luis Daniel Aguilera Camacho

Instituto Tecnológico de Celaya
daniel.aguilera@itcelaya.edu.mx

Benjamín Arroyo Ramírez

Instituto Tecnológico de Celaya
benjamin.arroyo@itcelaya.edu.mx

J. Santos García Miranda

Instituto Tecnológico de Celaya
santos.garcia@itcelaya.edu.mx

Karla Judith Moreno Bello

Instituto Tecnológico de Celaya
karla.moreno@itcelaya.edu.mx

Resumen

Se investigó la influencia de la rugosidad superficial en el comportamiento tribológico de un acero AISI H13 nitrurado mediante ensayos de fricción en seco. Se prepararon tres diferentes rugosidades en los rangos de 0.04 a 0.41 μm . Se observó que para superficies más rugosas se obtienen volúmenes perdidos y factores de desgaste más elevados. Por otro lado, el coeficiente de fricción tuvo una tendencia a incrementar con rugosidades mayores a 0.1 μm ; mientras que debajo de ese valor, los coeficientes de fricción son muy similares. El mecanismo