UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU" DE LAS VILLAS
VERITATE SOLA NOBIS IMPONETUR VIRILIS TOGA. 1948

Facultad de Ingeniería Mecánica e Industrial

Departamento de Ingeniería Mecánica

Trabajo de diploma

Título: Ensayo de rayado al Aluminio AA1060-H18

Autor: Felipe A. Alvarez Machado.

Tutores: Ing. Reniel Estrada Yanes

Dr. Iván Negrín Hernández

Curso: 2015-2016

Pensamiento:

La ciencia es el alma de la prosperidad de las naciones y
la fuente de vida de todo progreso.

Louis Pasteur
(1822-1895) Químico francés

Dedicatoria:

El presente trabajo se lo dedico a toda mi familia en especial a mi madre.

A quienes me han sabido guiar por los caminos de la superación profesional y me han orientado en la vida con su ejemplo, sacrificio y dedicación.

A mis amigos por todos los años compartidos y por apoyarme siempre y a las personas que en algún momento han formado parte de mi vida.

Agradecimientos:

Deseo expresar mis más sinceros agradecimientos a mi tutor el Ing. Reniel Estrada Yanes ya que gracias a su apoyo incondicional y asesoramiento fue posible la realización de este trabajo.

A mis padres porque de ellos siempre estaré agradecido.

A toda mi familia por su ayuda y mantenerse siempre muy unida.

A todos mis amigos por su incondicionalidad, por confiar en mí y estar siempre presentes en los buenos y malos momentos.

A todas las personas que de una forma u otra han contribuido al desarrollo de este trabajo.

A todos los profesores de la Facultad por contribuir en mi formación profesional.

A todos ¡MUCHAS GRACIAS!

Resumen

En el presente trabajo se exponen los principios básicos asociados a la resistencia al rayado de la superficie de un material. Se realizó el ensayo de rayado utilizando un indentador tipo Rockwell C a la superficie de un material de aluminio AA1060-H18 con comportamiento elastoplástico. Se realizaron tres rayas a cada una de las tres probetas variando la velocidad en cada una de las probetas y se efectuaron tres mediciones del ancho de la huella por cada raya para un total de nueve mediciones por probeta. De los principales resultados obtenidos se comprueba que la diferencia de las velocidades no afecta al ancho de la huella, aunque aparentemente con el aumento de la velocidad aumenta la dificultad para medir el ancho de la huella porque sus bordes son más irregulares. Los valores obtenidos de la dureza al rayado del material son razonables al compararlos con resultados de otros investigadores.

Abstract

In this paper the basic principles associated to scratch resistance of the surface of a material are exposed. The scratch test was performed using a Rockwell C type indenter to the surface of an AA1060-H18 aluminum material with elastoplastic behavior. Three scratching were made at each of the three specimens varying the speed in each of the specimens and three measurements of the scratch width for each scratching for a total of nine measurements per specimen were made. The main results it's found that the speed difference does not affect the width of the scratch, although apparently with increasing of the speed increases the difficulty of measuring the width of the scratch because the edges are more irregular. The values obtained from scratch hardness of the material are reasonable when compared with results from other researchers.

Índice:

Introducción……..……..……1
Capítulo 1: Marco teórico……..……..3
1.1 Rozamiento…….……3
1.2 Desgaste……..……..……..……..……..4
1.2.1 Desgaste abrasivo……..…..……5
1.2.2 Desgaste adhesivo……...……6
1.2.3 Desgaste por fatiga superficial……..…7
1.3 Rayado …….……..……8
1.3.2 Ensayo de rayado…….……9
1.4 Resultados obtenidos por otros investigadores……..…..……..12
Conclusiones parciales……13
Capítulo 2: Valoración de la Norma ASTM G171-03 ……..……14
2.1 Características fundamentales del ensayo……..……..……..14
2.2 Importancia del uso del ensayo……..……..……..15
2.3 Descripción general de la máquina de ensayo……..……..15
2.4 Sistema para la medición del ancho de la huella……..……..16
2.5 Calibración……...…….……16
2.6 Preparación de la probeta……..……17
2.7 Limpieza de la probeta.……17
2.8 Inspección del indentador…….……18
2.9 Fuerza normal…….…….……18
2.10 Velocidad del ensayo y longitud de la huella ……..……...18
2.11 Condiciones del ensayo……..……18
2.12 Medición del ancho de la huella.……19
2.13 Número de dureza al rayado……..……19
2.14 Descripción de la máquina de ensayo……..……..19
Conclusiones parciales……21
Capítulo 3: Realización del ensayo de rayado……..……..……22
3.1 Material de la muestra. …….……22
3.2 Análisis de dureza ……24

3.3 Dimensiones de las probetas. ……25
3.4 Preparación de la superficie de las probetas. ……25
3.5 Limpieza de la superficie de las probetas. ……25
3.6 Desarrollo de los experimentos. ……26
3.6.1 Elección de la velocidad de rayado. ……26
3.6.2 Inspección del indentador……26
3.6.3 Pasos para la realización del ensayo de rayado……27
3.6.4 Medición de la huella. ……28
3.6.5 Cálculo de dureza al rayado……29
Conclusiones parciales ……30
Conclusiones generales……31
Recomendaciones: ……32
Bibliografia: ……33
Anexo I ……35

Introducción:

La tribología es la ciencia y tecnología que estudia la lubricación, la fricción y el desgaste de partes móviles o estacionarias. La lubricación, la fricción y el desgaste tienen una función fundamental en la vida de los elementos de máquinas. De estos tres el menos estudiado ha sido el desgaste. El desgaste es conocido desde que el ser humano comenzó a utilizar elementos naturales que le servían como utensilios domésticos. Este fenómeno es una de las formas más importantes de degradación de piezas, elementos mecánicos y equipos industriales [1].

El desgaste puede ser definido como el daño superficial sufrido por los materiales después de determinadas condiciones de trabajo a los que son sometidos. Este fenómeno se manifiesta por lo general en las superficies de los materiales, llegando a afectar la sub-superficie [2]. El resultado del desgaste, es la pérdida de material y la subsiguiente disminución de las dimensiones y por tanto la pérdida de tolerancias. Los daños ocasionados por el desgaste de piezas en equipos industriales, llevan continuamente a cambio de partes en la maquinaria, provocando tiempos de parada de la producción generalmente grandes. Es por esto, que se deben proponer estudios serios relacionados con el área de la tribología. Así cuando se adopta un adecuado método de evaluación para los diferentes materiales y equipos de acuerdo a su ciclo de trabajo, se puede predecir fallas futuras conservando con esto la productividad, la seguridad industrial y la disminución de costos [3].

La modelación a nivel de laboratorio de los procesos tribológicos es de gran importancia, porque posibilita la correcta selección de los materiales a usar en uniones fricciónales y contribuye al ahorro de materiales e incremento de la durabilidad de los mismos.

Con esta percepción de las necesidades requeridas en la industria, se han desarrollado métodos capaces de realizar pruebas que puedan ser reproducibles en cualquier lugar. Debido a esto, organizaciones como la ASTM, DIN, ISO, entre otras, han estandarizado estas técnicas, logrando con esto, el conocimiento general de las condiciones de funcionamiento de las máquinas, de sus dimensiones y de todos los parámetros de operación durante la realización de los ensayos.

El ensayo de rayado puede ser utilizado para la caracterización de los materiales. Durante el ensayo de rayado un penetrador rígido es presionado sobre una probeta y se le aplica una fuerza tangencial, lo que produce un surco en la superficie del material analizado. La huella resultante se mide para determinar la dureza al rayado producto de una carga determinada.

Problema Científico

¿Cómo determinar el número de dureza al rayado de la superficie de un material de aluminio del que se desconoce su denominación para compararlo con resultados obtenidos en otros materiales? Además se desea conocer si la variación de la velocidad influye en las características de la huella.

Objetivo General

Realizar experimentos para medir la resistencia al rayado de la superficie de un material de acuerdo a la norma técnica ASTM G171-03.

Objetivos Específicos

- Investigar los fenómenos ocurridos en el rayado de la superficie del material.
- Realizar los experimentos del material para determinar su resistencia al rayado.
- Investigar el efecto de la variación de la velocidad de rayado sobre las características de la huella.

Capítulo 1: Marco teórico

1.4 Rozamiento

La fricción entre dos superficies en contacto ha sido aprovechada desde la época de nuestros antepasados más remotos para hacer fuego frotando maderas. En la actualidad, representa una gran importancia en el desarrollo económico, pues se estima que se podrían ahorrar muchísima energía y recursos industriales perfeccionando su utilización.

La fricción es la fuerza tangencial de resistencia al movimiento de un cuerpo que, bajo la acción de una fuerza externa, se mueve o tiende a tener un movimiento relativo con respecto a la superficie de otro cuerpo en contacto común [1].

La mayoría de las superficies, aun las que se consideran pulidas, son extremadamente rugosas a escala microscópica. Los picos de las superficies en contacto pueden determinar el área real de contacto, esta aumenta cuando aumenta la presión (la fuerza normal) a causa de la deformación que sufren los picos. Debido a este efecto los metales tienden a soldarse en frío, producto a que las fuerzas de atracción ligan las moléculas de las superficies, posteriormente para que el deslizamiento se produzca estas soldaduras tienen que romperse. Además, existe siempre la incrustación de los picos con los valles, que es el origen del rozamiento estático [2].

Cuando un bloque es deslizado sobre un plano, las soldaduras en frío se rompen y se rehacen constantemente. Pero la cantidad de soldaduras que haya en cualquier momento se reduce por debajo del valor estático, de modo que el coeficiente de rozamiento cinético es menor que el coeficiente de rozamiento estático. Está demostrado, que la presencia de aceite o de grasa en las superficies en contacto evita las soldaduras al revestirlas de un material inerte [2].

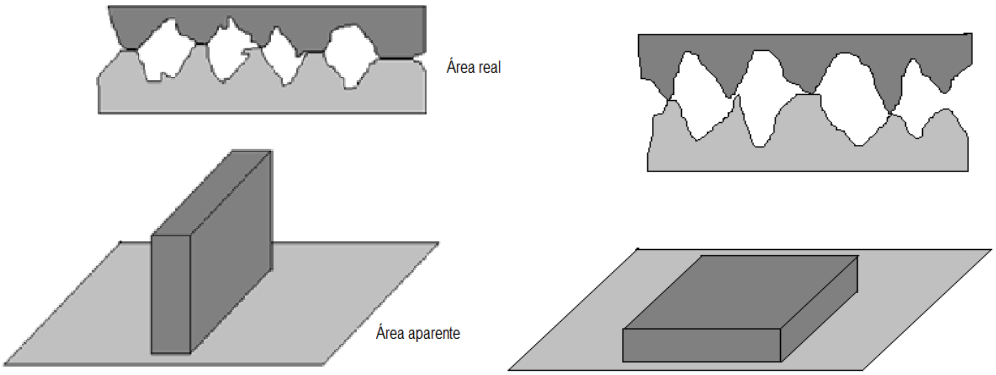

Figura 1.1 Área real y aparente de contacto.

En la figura 1.1 puede mostrarse como se observaría en un microscopio las grandes deformaciones de los picos de las dos superficies que están en contacto, estas dependen de la presión entre ambas superficies, del material del bloque y de la rugosidad superficial del mismo. Se puede observar que el área aparente de contacto difiere del área real de contacto, pues esta última es una pequeña fracción de la superficie aparente de contacto debido a los picos y valles, es decir, el área de la base del bloque [2].

1.5 Desgaste

El desgaste es definido como el proceso de remoción de material de una superficie sólida, como un resultado del movimiento relativo de esta superficie respecto a otra en contacto. En el proceso continuado de desgaste, el material puede ser removido de la superficie y expulsado o puede resultar transferido a la otra superficie o también puede romperse y quedar atrapado dentro del contacto como una partícula libre de desgaste. En el caso de la transferencia de material desde una superficie a otra, la pérdida de masa o volumen neto de la interface sería cero, aunque una de las superficies sería desgastada. En un proceso de contacto tribológico la fuerza de fricción también está asociada a la evolución del desgaste, sin embargo, su relación no es bien entendida. Algunas veces se asume que interfaces de alta fricción exhiben altas tasas de desgaste. Esto no es necesariamente verdad, por ejemplo, las interfaces entre metales pulidos y polímeros exhiben baja fricción y

simultáneamente alto desgaste, mientras que las interfaces entre materiales cerámicos exhiben moderada fricción pero muy bajo desgaste. Sin embargo, esto no es una regla general y hay contradicciones [4].

El desgaste puede ser bueno o malo. En los casos cuando se escribe con un lápiz, se borra una escritura o se pulen piezas, el desgaste es necesarios y útil; sin embargo, es indeseado en casi todas las aplicaciones de maquinaria donde es importante mantener indefinidamente la forma de las piezas y su integridad superficial en ejes, cojinetes, retenes o engranajes.

1.5.1 Desgaste abrasivo

Se llama desgaste abrasivo el que sufre la superficie de un elemento de máquina como resultado de la acción cortante o por ralladura de un cuerpo o partículas duras [5,6].

El desgaste abrasivo está determinado por la presencia de partículas abrasivas en la zona de fricción y la destrucción de la superficie o como resultado de la deformación plástica local, microrrayaduras y microcortes cuando en el medio en que trabaja la pieza existen elementos que tienen o desprenden partículas de alta dureza [7].

El mecanismo de separación de las partículas de la superficie de contacto se origina debido a que las irregularidades del material más duro se introducen en la estructura del más blando mediante el deslizamiento plástico. En presencia de un movimiento tangencial, la superficie dura se deslizaría formando surcos en la superficie de menos dureza, pudiendo desprender al mismo tiempo material de este.

La destrucción del metal producto de microcortes o debido a la deformación plástica está estrechamente relacionada con las condiciones de trabajo de la pieza y de la naturaleza de las partículas abrasivas. Se ha establecido experimentalmente [8,9] que el mecanismo de desgaste abrasivo queda determinado fundamentalmente por la relación entre los valores de dureza del material base (Hm) y la dureza de las partículas abrasivas (Ha) figura 1.2.

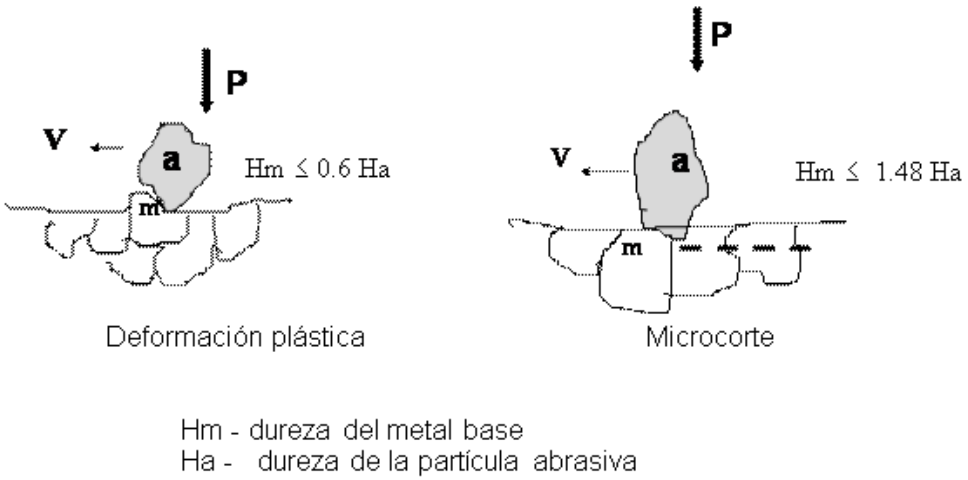

Figura 1.2 Representación esquemática para el caso del desgaste abrasivo por microcortes y por separación plástica.

1.5.2 Desgaste adhesivo

Adhesión o desgaste adhesivo se denomina en muchas ocasiones como desgaste severo y constituye el punto de partida para desarrollar el proceso de deterioro entre las superficies de los metales al producirse un rozamiento sobre ellos [10]. En el mecanismo de desgaste adhesivo el papel principal lo juega la interacción entre los materiales, y surge como resultado de la destrucción superficial de uno o de ambos materiales en contacto. En la figura 1.3, se muestra la forma clásica mediante el cual se desarrolla el desgaste adhesivo.

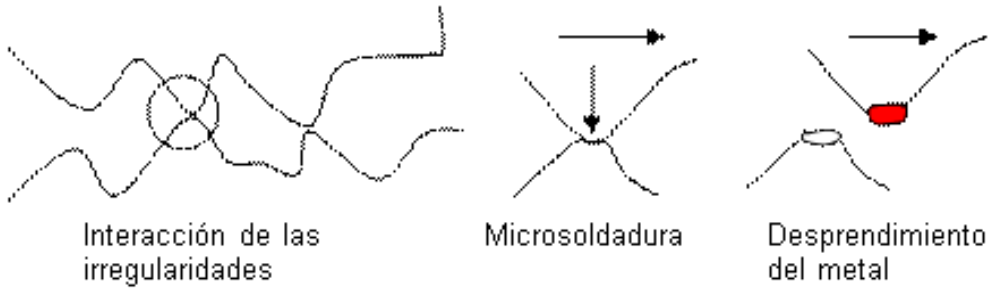

Figura 1.3 Características del desgaste adhesivo.

1.5.3 Desgaste por fatiga superficial

El desgaste por fatiga superficial generalmente se considera debido a la acción de tensiones o esfuerzo superficiales, sin existir necesariamente otras interacciones físicas entre las superficies de los cuerpos sólidos. Este proceso de desgaste está relacionado con ciclos de tensiones repetitivas en el contacto por rodadura o por deslizamiento. En este caso el deterioro del material se produce por la existencia de tensiones variables, es decir, la superficie de trabajo se encuentra sometida en el transcurso del período de trabajo tanto a tensiones de tracción como de compresión.

Se ha demostrado que desde el punto de vista físico, el estudio de la fatiga por contacto consiste fundamentalmente en elevar la concentración de tensiones[10], determinante en los procesos de nacimiento y propagación de grietas por fatiga. Los modelos que se emplean para la forma clásica del desgaste por fatiga pueden emplearse además para comprender las recientes teorías del desgaste, basadas precisamente en la formación y propagación de grietas, como se puede observar en la figura 1.4.

Figura 1.4 Surgimiento del desgaste por Fatiga superficial.

1.6 Rayado

Rayado es el término empleado para designar un tipo especial de abrasión (en realidad se trata de una incisión) causada por el rozamiento de dos superficies en movimiento relativo entre sí, que por lo general son dos materiales en el que uno posee mayor dureza y da paso a mayor deformación en el otro, este fenómeno puede encontrarse en infinidades de componentes del sector industrial.

Es conocida también como la imposición de un corte o marca superficial en la superficie de una pieza. Un ejemplo de la susceptibilidad del metal al rayado se puede apreciar en las pruebas de dureza al rayado figura 1.5 [11] .

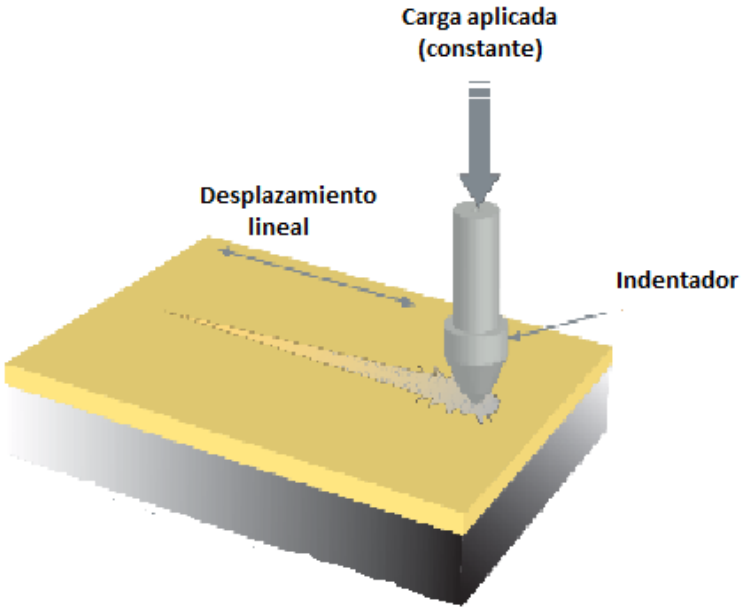

Figura 1.5 Ensayo de rayado.

1.3.1 Resistencia al Rayado

La necesidad de cuantificar la resistencia al rayado ha llevado al desarrollo de numerosos métodos de ensayos, algunos estandarizados a través de organismos oficiales, por ejemplo la norma ASTM G171-03 [12]., y otros que han sido estandarizados por compañías particulares y en ocasiones ni se llegan a normalizar. Por el momento no hay un método aceptable establecido para la caracterización

cuantitativa de la resistencia al rayado, actualmente para poder evaluar esta propiedad, debemos remitirnos a las normas que Original Equipment Manufacturer (OEM) ha ido desarrollando para conseguir medir la resistencia al rayado.

Para una correcta definición empleada, habría que prestar atención a los términos en los que se van a basar y diferenciar las diferentes normas que actualmente existen: línea o señal larga, visible, superficie, objeto punzante y, por supuesto, la especificación final, así para la medida de la resistencia al rayado habría que prestar especial atención a la visibilidad de las rayas o la influencia que estas tengan sobre las propiedades ópticas de los objetos. Conjuntamente a la medida de deformación superficial causada por el rayado, se realiza un escaneado óptico, espectroscopia óptica y un análisis de imagen que pueden ser estudiados para observar los cambios en color y brillo.

La medida de control visual podría usarse para suplementar a todos estos ensayos determinando el grado de resistencia al rayado pero este será, por supuesto, el valor más subjetivo y puede ser, a la vez, la prueba final más importante en cuanto a si es válida o no una pieza. Después de todo, es el ojo humano el que siempre hace un juicio final sobre la cuantificación del daño sufrido en la superficie [13].

1.3.2 Ensayo de rayado

El ensayo de rayado consiste en la aplicación de una carga sobre la superficie de un determinado material. Esto se logra presionando una punta de un material muy duro sobre la zona del material a ensayar. Al tiempo que la muestra es desplazada a una velocidad determinada, las tensiones resultantes en la interface causan marcas y escoriaciones en el recubrimiento. El punto de inicio de fractura se denomina carga crítica. A partir del análisis de las marcas dejadas por el indentador y la fuerza aplicada, es posible conocer propiedades y características del material ensayado como: el módulo de elasticidad, la tensión a la cedencia o el coeficiente de fricción [14].

Este ensayo se realiza en una máquina especialmente diseñada que aplica la carga a través de un sistema de pesas y palancas. El valor de la dureza, según se lee en

un indicador de carátula especialmente graduado, es un número arbitrario que está inversamente relacionado con la profundidad de la huella. No existe ningún valor de dureza de Rockwell designado para un solo número porque resulta necesario indicar cual indentador y cual carga se emplearon al hacer el ensayo. En este procedimiento debido a la pequeñez de la penetración y a la manera en que se le mide, se pueden obtener algunas diferencias en la selección y preparación de las probetas, en comparación con otros modelos debido a las características del ensayo y los materiales estudiados.

En el artículo "Standard Test Method for Scratch Hardness of Materials Using a Diamond Stylus on the Micro-Tribometer mod. CETR-UMT 2. [15]" se brinda una información más detallada para desarrollar este proceso, en cuanto a datos normalizados, medidas y limitaciones de acuerdo a la norma ASTM G171-03. En esta norma aparecen registrados los datos y requisitos fundamentales que se deben tener en cuenta a la hora de realizar el ensayo.

Uno de los requisitos con los que debe cumplir este análisis es que la superficie del fondo deba estar libre de escama, suciedad u otras materias extrañas que puedan aplastarse o fluir bajo la presión de ensayo afectando así los resultados. Todos los ensayos de dureza deben hacerse sobre un solo espesor del material; el número de dureza determinado por penetración en una superficie curva es erróneo debido a la forma de la superficie. La velocidad y el tiempo de la aplicación de la carga principal deben establecerse, respetarse, y reportarse al comparar los resultados. Por ejemplo en caso de tener una superficie aceitada generalmente se obtienen lecturas ligeramente más bajas que las secas debido a la fricción reducida en el penetrador.

Existen dos tipos de fuerzas que actúan durante el proceso de ensayo de rayado. La primera es la carga normal aplicada durante el ensayo, esta carga es soportada por el área de contacto entre el indentador y el material ensayado. El segundo componente de la fuerza es la fricción, que es la reacción a la deformación realizada por el indentador durante su desplazamiento sobre la superficie del material en la dirección tangencial de avance. Ambas fuerzas anteriores son ortogonales y pueden ser utilizadas independientemente para realizar los cálculos de dureza y resistencia

al material. Basados en este concepto, dos parámetros pueden ser definidos: dureza de rayado (scratch hardness) que corresponde a la carga normal, y la dureza tangencial (tangential hardness), que corresponde a la fuerza de fricción [14].

Mediante el ensayo de rayado se trata de medir en el material estudiado la capacidad de resistir a una deformación superficial permanente, producida por una corta tensión mecánica sobre la superficie visible. Esta resistencia proveniente del material es denominada dureza, la misma se define como la oposición que ofrecen los materiales a alteraciones como la penetración, la abrasión, el rayado, la cortadura, las deformaciones permanentes, entre otras [14], y pueden ser medidos por tres tipos de durezas:

1. Dureza Dinámica: consiste en la reacción o resistencia elástica de un material al chocar contra un cuerpo duro.
2. Dureza a la Penetración: no es más que la resistencia que opone los materiales a dejarse penetrar por otros más duros y dentro del mismo existen tres métodos: el Brinell, el Vickers y el Rockwell.
3. Dureza al Rayado: consiste en la resistencia que oponen los materiales a ser rayados por otros más duros y también se puede obtener por tres ensayos: ensayo de Mohs, ensayo a la lima y ensayo de Martens.

A escala de uso Industrial la dureza se mide utilizando un durómetro para el ensayo de penetración. Dependiendo del tipo de punta empleada y el rango de cargas aplicadas, se designan diferentes escalas por lo que se tienen en cuenta los distintos rangos de dureza. El interés de la determinación de la dureza en los aceros estriba en la correlación existente entre la dureza y la resistencia mecánica, siendo un método de ensayo más económico y rápido que el ensayo de tracción, por lo que su uso está muy extendido.

En el trascurso del ensayo denominado como procedimiento experimental se tienen en cuenta la profundidad del curso que es función de la resistencia al rayado del material.

El valor exacto de penetración puede variar ligeramente de punto a punto dependiendo de las propiedades superficiales del material. En el ensayo convencional es posible modificar las siguientes variables: número de rayas y carga aplicada, que pueden ser constante o progresiva [15]. Una vez finalizado el ensayo, el proceso de los datos proporciona la siguiente información:

- Profundidad de penetración, no es más que la profundidad a la que penetra el indentador cuando se aplica la carga que ha sido programada, teniendo como referencia la información topográfica obtenida en el barrido inicial.
- Profundidad residual, consiste en la profundidad que queda después de realizado un rayado teniendo en cuenta como referencial inicial la información topográfica.
- Porcentaje de recuperación, que es la magnitud en función de los valores de profundidad de penetración y profundidad residual.

1.4 Resultados obtenidos por otros investigadores

El tribómetro Nanovea fue empleado para realizar las pruebas de dureza al rayado en tres metales (Al6061, Cu110 y SS304) utilizando un indentador tipo Rockwell C. Las pruebas se realizaron para las tres muestras bajo los mismos parámetros: fuerza 10 N y velocidad 20 mm/min. Los parámetros de la prueba se resumen en la tabla 2. Después de la prueba realizada se usa al profilómetro óptico para medir el ancho de la huella [16].

Tabla 2: Resultados del ancho de la huella y dureza al rayado.

Material	Ancho de la huella (mm)	HS_P (GPa)
Al6061	170	0.88
Cu110	228	0.49
SS304	92	3.01

Conclusiones parciales

- El desgaste es un fenómeno que aparece siempre que dos elementos se encuentren en contacto y exista movimiento relativo entre ellos. Existen diversos mecanismos para que se produzca el desgaste, sin embrago el más común es el desgaste abrasivo, que aparece cuando partículas duras se desplazan sobre una superficie con una fuerza determinada. El rayado se considera como un caso particular de desgaste abrasivo.
- La necesidad de medir la resistencia de los materiales al rayado ha llevado al desarrollo de numerosos métodos para la realización de este ensayo. Uno de los métodos más utilizados es el que establece la norma ASTM G 171-03.

Capítulo 2: Valoración de la Norma ASTM G171-03 [12].

En este capítulo se tiene en cuenta lo establecido en la norma técnica ASTM G171-03 con el objetivo de seguir una metodología para el ensayo de rayado ajustándose a los parámetros de la norma.

2.1 Características fundamentales del ensayo

Este ensayo consiste en la realización del rayado en una superficie sólida por un indentador Rockwell C, a lo largo de un recorrido determinado, con una fuerza normal constante y con velocidad constante. El promedio del ancho de la huella realizada se determina y se usa para calcular el número de dureza al rayado en unidades de presión. El número de dureza al rayado, al contrario del número de dureza cuasi-estático, involucra una combinación diferente de propiedades de la superficie porque el indentador, en este caso un penetrador de diamante, se mueve tangencialmente a lo largo de la superficie. Por consiguiente, el estado tensional que aparece bajo el penetrador en el rayado difiere del producido en la indentación cuasi-estática. Los números de dureza al rayado son, en principio, una forma más apropiada de medir la resistencia al daño de la superficie del material en procesos como la abrasión producto del contacto de dos cuerpos que los números de la indentación cuasi-estática.

Como opción, se puede medir la fuerza de rayado durante la realización del ensayo y se puede usar para calcular el coeficiente de arrastre del indentador, que es una medida adimensional de la resistencia de la superficie ensayada a la deformación debida al movimiento tangencial del indentador.

Este ensayo se realiza normalmente en condiciones sin lubricación y a temperatura ambiente; no obstante se puede realizar con diferentes condiciones de lubricación y elevadas temperaturas. Esta norma permite la realización del ensayo en ambas condiciones siempre y cuando las condiciones de ensayo sean reportadas totalmente.

El efecto de la humedad ambiental y otras condiciones atmosféricas pueden afectar los resultados en dependencia de la sensibilidad del material ensayado a las

condiciones ambientales. Si tales efectos son detectados durante la realización del ensayo, deben tomarse medidas para controlar las condiciones ambientales y reportar las mismas.

2.2 Importancia del uso del ensayo

Este método de ensayo es aplicable a una gama amplia de materiales. Éstos incluyen metales, aleaciones, y algunos polímeros. El criterio principal es que en el proceso de rayado se produce una huella medible en la superficie que está siendo analizada, sin causar una fractura catastrófica ni un gran daño en la superficie del material. El daño severo en la superficie analizada, cuando el ancho de la huella no es claramente medible o que los bordes se cortan o se tuercen, invalida el uso de este método para determinar el número de dureza al rayado. Partiendo de que el grado y el tipo del daño superficial en el material pueden variar con la carga aplicada, la aplicabilidad de este ensayo en ciertos tipos de materiales puede ser limitada por la máxima carga a que pueden hacerse las mediciones del ancho de la huella válidas.

La resistencia de un material a la abrasión por un solo punto puede ser afectada por su sensibilidad al estado deformacional en el proceso de deformación. Por consiguiente, este ensayo se desarrolla a bajas velocidades de desplazamiento del penetrador. El uso de una baja velocidad de rayado minimiza también el efecto del calentamiento friccional.

Este ensayo usa las medidas del ancho de la huella resultante después de retirar el penetrador para calcular el número de dureza al rayado. Por consiguiente, este refleja la deformación permanente resultante del rayado y no el estado instantáneo de la combinación de las deformaciones elásticas y plásticas de la superficie.

2.3 Descripción general de la máquina de ensayo

La máquina consiste en un penetrador rígido y un dispositivo porta probetas que es el sistema para la aplicación de la carga normal sobre el indentador mientras este se desplaza por la superficie de la probeta a velocidad constante y generalmente posee el equipamiento necesario para medir el ancho de la huella. Opcionalmente,

el aparato puede equiparse con un sensor para medir la magnitud de la fuerza de rayado.

El proceso de desplazamiento se puede obtener moviendo la probeta y manteniendo fijo el indentador o manteniendo fija la probeta y moviendo el indentador, esto siempre a velocidad y fuerza normal constante. La estructura debe ser lo suficientemente rígida para resistir las cargas normales, laterales y tangenciales asociadas al proceso de rayado sin que aparezcan deflexiones elásticas o plásticas indebidas. El desplazamiento del penetrador puede ser en línea recta o en forma angular.

2.4 Sistema para la medición del ancho de la huella

Para la medición del ancho de la huella se debe seleccionar cualquier sistema óptico que permita aumentar la imagen de la huella de forma tal que se pueda medir el ancho con precisión. El sistema debe ser capaz de medir el ancho de la huella con una precisión de por lo menos 2%. En caso de que las características de la superficie del material dificulten la medición correcta de los bordes de la huella puede ser necesario utilizar métodos especiales de iluminación tales como, la iluminación oblicua o microscópica diferencial de contraste de interferencia (DIC).

2.5 Calibración

Las partes de la máquina que requieren ser calibradas son: el sistema de aplicación de la fuerza normal, la velocidad de desplazamiento del indentador y opcionalmente el sensor de la fuerza de rayado.

La fuerza normal que se aplica sobre el indentador mientras se desplaza por la superficie se calibrará de manera tal que esta tenga una variación permisible del 1%. Por ejemplo una fuerza normal de 1 N puede ser aplicada con una exactitud de ± 0.01 N. Los medios para calibrar la máquina serán determinados por el diseñador, sin embargo el método para calibrar la aplicación de la carga se deberá reportar en el informe.

La velocidad del indentador sobre la superficie *s* puede calibrarse de cualquier manera conveniente, como cronometrar el tiempo *t* requerido para producir una huella de longitud *L*. Entonces:

$$s = \frac{L}{t} \tag{1}$$

El sensor para medir la fuerza de rayado debe ser calibrado periódicamente en la dirección de la fuerza, y tan cercano como sea posible en la línea del punto de contacto entre el penetrador y la superficie de la probeta. El intervalo para la calibración se determinará por el usuario y debe garantizar lecturas exactas de la fuerza y compensar cualquier tendencia que pueda presentar la señal electrónica.

2.6 Preparación de la probeta

La preparación de la probeta para el ensayo se debe realizar de tal manera que permita obtener un acabado superficial que facilite la observación y una correcta medición del ancho de la huella. Se recomienda para una superficie pulida una rugosidad en el rango 0.02 a 0.05 μm. Una superficie puede ser impropia para el ensayo de rayado si su rugosidad o porosidad es tal que los bordes de la huella son discontinuos o dentados, o si el penetrador salta en su desplazamiento.

2.7 Limpieza de la probeta

El ensayo de rayado se le puede realizar a diferentes tipos de materiales, por ese motivo no se puede dar un tratamiento específico para la limpieza de las probetas. Estas se limpiarán de una manera tal que la superficie esté libre de virutas, grasa, huellas digitales u otros contaminantes. Metales y aleaciones pueden limpiarse con solventes no polares. Los plásticos requerirán un limpiador alternativo para lentes u otros similares. No deben usarse solventes o limpiadores que alteren las propiedades de las superficies a ensayar. El método de limpieza, si se utiliza alguno, debe ser descrito en el reporte.

2.8 Inspección del indentador

La punta del indentador debe ser inspeccionada con un microscopio u otro método de inspección topográfico para asegurar que no hay ningún defecto (grietas, virutas) o material adherido producto del proceso de fabricación o de ensayos anteriores. El penetrador se limpiará con una tela suave mojada en acetona o con otro solvente. Residuos de aceite en el penetrador puede lubricar la superficie y reducir el ancho de la huella, lo que llevaría a obtener un número de dureza de rayado mayor que el real. Indentadores defectuosos pueden incrementar la fuerza de rayado y producir estrías en el fondo de la huella.

2.9 Fuerza normal

La fuerza normal se seleccionará de una magnitud tal que permita obtener una huella que se pueda medir sin dificultad, pero esta fuerza no debe ser tan grande que provoque fractura, desprendimiento de material, arranque del recubrimiento, o cualquier otro dañado serio de la superficie. Se pueden utilizar series de rayados a diferentes fuerzas normales para evaluar la resistencia del material al incremento de las tensiones localizadas.

2.10 Velocidad del ensayo y longitud de la huella

La velocidad del ensayo debe ser constante a lo largo de la zona donde se realizarán las mediciones. La norma recomienda variar la velocidad en el rango de 0.2 a 5.0 mm/seg.

La longitud de la huella debe ser por lo menos de 5 mm. Esta huella no necesita ser linear, puede ser en forma de arco, como sería el caso de las máquinas que tienen un diseño rotatorio.

2.11 Condiciones del ensayo

Se debe asegurar que la máquina esté nivelada y que el indentador se encuentre perpendicular a la superficie a ensayar. El penetrador se debe bajar suavemente para aplicar la carga, evitando así daños producto del impacto. Activar el mecanismo

para garantizar la longitud de la huella deseada. Retirar el penetrador de la superficie después de terminar el ensayo. Para repetir el ensayo se debe tomar otra zona de la misma probeta separada al menos 5 veces el ancho de la primera huella y repetir las operaciones para obtener otra huella paralela a la primera. Se repetirá tantas veces como sea necesario, pero se deben realizar al menos tres ensayos para cada valor de fuerza normal.

2.12 Medición del ancho de la huella

Usando un microscopio u otro equipo de amplificación de imagen calibrado, medir el ancho de cada huella en tres zonas equidistantes a lo largo de su longitud. El ancho de la huella se determinará ópticamente. No debe medirse el ancho de la huella cerca del inicio ni el final de la misma para eliminar el efecto de la aceleración y desaceleración del penetrador.

2.13 Número de dureza al rayado

Se debe reportar el promedio del número de dureza al rayado en GPa, obtenido con un mínimo de tres rayas en cada probeta. Así, se realizarán un total de nueve mediciones en cada probeta a la fuerza normal determinada (esto es, tres rayas por probeta y tres mediciones en cada huella).

2.14 Descripción de la máquina de ensayo

La máquina donde se realizó el ensayo fue diseñada según la norma ASTM G 171-03. Esta se encuentra en el laboratorio de resistencia de materiales de la Facultad de Ingeniería Mecánica e Industrial (FIMI). Las principales partes fundamentales de la máquina se observan en la figura 2.1.

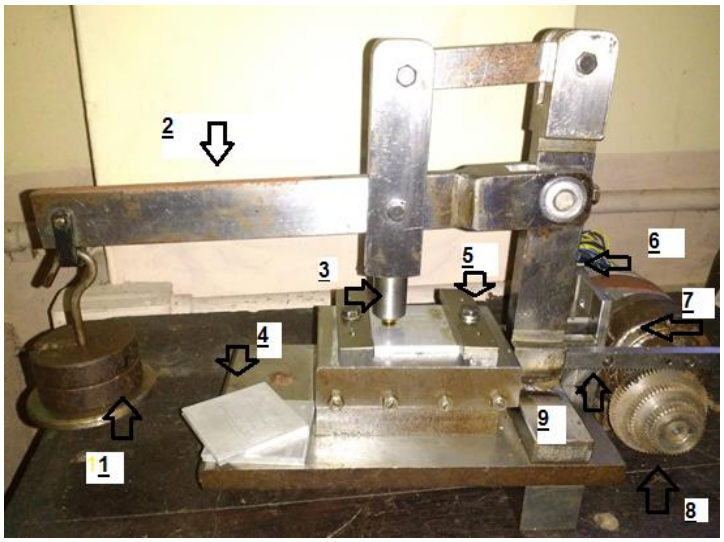

Figura 2.1 Partes fundamentales de la máquina: *1- Porta pesas. 2- Brazo. 3- Porta indentador. 4- Base principal. 5- Porta probeta. 6- Columna. 7- Motor reductor. 8- Bloque de engrane. 9- Cremallera.*

Conclusiones parciales

- El ensayo de rayado es uno de los ensayos más utilizados para caracterizar la superficie de los materiales. Para este ensayo, basado en la norma ASTM G171-03, se recomienda una rugosidad superficial en el rango de 0.2 a 0.5 µm para superficies pulidas y para la limpieza de materiales metálicos utilizar solventes no polares.
- Se recomiendo una velocidad de rayado constante en el rango de 0,2 a 5,0 mm/s. La fuerza normal se selecciona de manera tal que produzca una huella medible en la superficie, pero no deberá ser tan grande como para causar la fractura en la superficie.
- La precisión del instrumento de medición debe ser de un 2% del ancho de la huella. No obstante, la norma permite ajustar el ensayo a otras condiciones que se deseen investigar.

Capítulo 3: Realización del ensayo de rayado

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos en el ensayo de rayado realizado a tres probetas en el laboratorio de resistencia de los materiales en la Facultad de Ingeniería Mecánica e Industrial, para las que se ajustaron los parámetros que permitieron obtener resultados satisfactorios de acuerdo a la norma ASTM G171-03. Primeramente se determinó el tipo de material que poseen las probetas. Luego se preparó la superficie de las probetas utilizando varios papeles abrasivos para lograr un mejor acabado superficial y de esta forma obtener una mejor observación de los límites de las huellas. Fue necesario también limpiar la superficie de la muestra con un disolvente no polar con el objetivo de eliminar huellas dactilares y suciedades. Para concluir se realizó el experimento del rayado donde se produjeron tres rayas a cada probeta. Para determinar la dureza al rayado del material de las probetas se tomaron nueve mediciones a cada una de ellas, o sea, tres por cada huella.

3.1 Material de la muestra.

En un principio se conocía que las probetas eran de aluminio pero se desconocía la composición química de las mismas. Para ello se realizaron en Empresa Fabric Aguilar Noriega, Planta Mecánica de Santa Clara, una serie de cinco disparos figura 3.1 a una muestra con la máquina Spektrometrie Opto-Elektronik marca Belec de fabricación alemana figura 3.2 arrojando los resultados que se muestran en el Anexo I, el promedio se muestra en la tabla 3.1.

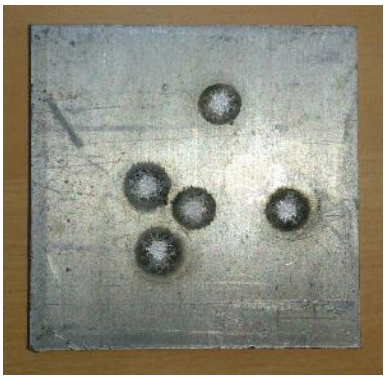

Figura 3.1. Disparos de la probeta

Figura 3.2. Spektrometrie Opto-Elektronik marca Belec

Tabla 3.1: Valor promedio de la composición química de los tres tipos de materiales y el rango del aluminio AA1060

Elemento	**Promedio de los 5 disparos**	**AA1060 Rango**
Silicio (Si):	0.082	0 a 0.25%
Aluminio (Al)	99.61	99.6 a 100%
Hierro (Fe):	0.266	0 a 0.35%
Cobre (Cu):	<0.001	0 a 0.05%
Manganeso (Mn):	<0.001	0 a 0.03%
Magnesio (Mg):	0.005	0 a 0.03%
Cromo (Cr)	<0.001	-
Níquel (Ni)	<0.001	-
Zinc (Zn)	<0.001	0 a 0.05%
Estaño (Sn)	<0.001	-
Titanio (Ti):	0.027	0 a 0.03%
Plomo (Pb)	<0.001	-
Vanadio (V)	0.005	0 a 0.05%
Cobalto (Co)	<0.001	-

Según su composición química la muestra tiene un promedio de aluminio de 99.6% y el porcentaje de los demás elementos coincide con los rangos del aluminio AA1060 que se muestran incluidos en la tabla 3.1.

3.2 Análisis de dureza

La dureza Vickers (HV) se ha medido en un micro durómetro Shimadzu figura 3.2 aplicando 100 g de carga durante 15 s (el ensayo Vickers más convencional). Los resultados de las cinco mediciones realizadas se muestran en la tabla 3.2.

Figura 3.2 Micro durómetro Shimadzu

Tabla 3.2. Dureza HV de las probetas de aluminio

Dureza HV	**HB**
37,2	35,34
31,52	29,944
32,97	31,3215
36,69	34,8555
36,79	34,9505
Promedio	**Promedio**
35,034	33,282

Este promedio de dureza trajo como resultado que el aluminio es un AA1060-H18 ya que la dureza Brinell coincide según los rangos de la MatWeb y cuenta con las propiedades mecánicas siguiente:

Propiedades Mecánicas:

Coeficiente de Poisson	0.33
Dureza Brinell	35 HB
El módulo de Elasticidad	68.9 GPa
Resistencia a la cizalladura	75.8 MPa
Resistencia a la fatiga	44.8 MPa
Resistencia a la tracción	83.0 MPa
Temperatura de fusión	390J/g

3.3 Dimensiones de las probetas.

De acuerdo con las dimensiones del porta-probetas de la máquina, las tres probetas se construyeron de tal forma que sus dimensiones son aproximadamente de 50 mm de ancho, por 50 mm de largo y 5 mm de espesor.

3.4 Preparación de la superficie de las probetas.

Las superficies de las tres probetas se prepararon manualmente en el laboratorio de tribología. Primeramente se rebajó la superficie con un papel abrasivo de numeración 320, luego se giró la probeta un ángulo de 90 grados y se utilizó un papel abrasivo de numeración 400 para rebajar un poco más la superficie, por último, se giró la probeta nuevamente un ángulo de 90 grados para completar el desgaste y preparación de la superficie con un papel abrasivo de numeración 600. Esto permitió que las probetas terminaran con una rugosidad superficial (Ra) de 0.8 µm, la cual fue obtenida en Planta Mecánica por comparación con patrones.

3.5 Limpieza de la superficie de las probetas.

Para eliminar partículas, polvos y otros contaminantes, las probetas se limpiaron con Tolueno ($C_6H_5CH_3$) en el Laboratorio de Química Orgánica de la Facultad de Química-Farmacia. El Tolueno es un disolvente no polar, pues de esta forma se

evita magnetizar la superficie de la probeta y permite que el ensayo de rayado se realice correctamente de acuerdo con la norma ASTM G171-03 [9].

3.6 Desarrollo de los experimentos.

1 – Calibración de la fuerza normal en el indentador.

Utilizando un dinamómetro Kraftmessgerate Halle figura 3.3 se calibró la fuerza normal en el indentador para un valor de 30 N.

Figura 3.3 Dinamómetro Kraftmessgerate Halle

3.6.1 Elección de la velocidad de rayado.

Luego se ajustó la velocidad variando el engrane entre la cremallera y los tres piñones. Para la primera probeta se utilizó el piñón mayor, para la segunda el intermedio y para la tercera el menor, de esta forma la velocidad de deslizamiento del indentador fue de 98 mm/s para la primera probeta, 76 mm/s para la segunda y 53 mm/s para la tercera. Este procedimiento se realizó para observar si tiene influencia la velocidad en la huella de la probeta.

3.6.2 Inspección del indentador

La punta del indentador se inspeccionó con un microscopio óptico metalográfico figura 3.4 verificando así que dicho indentador se encuentra en perfectas condiciones para realizar el ensayo de rayado.

Figura 3.4 Microscópico óptico Metalográfico

3.6.3 Pasos para la realización del ensayo de rayado

- Se retira el porta pesas del brazo.
- Se eleva el brazo y se fija con el tornillo de sujeción.
- Se coloca y fija la probeta.
- Se desplaza el carro superior controlando que el indentador quede aproximadamente 10 mm separado de la brida de sujeción.
- Se ajusta el piñón según sea la velocidad de desplazamiento deseada.
- Se le quita la fijación al brazo mediante el tornillo de sujeción.
- Se coloca el porta pesas con la carga.
- Se presiona el interruptor para iniciar el desplazamiento controlando que no choque el porta indentador con la brida de sujeción del portaprobeta.

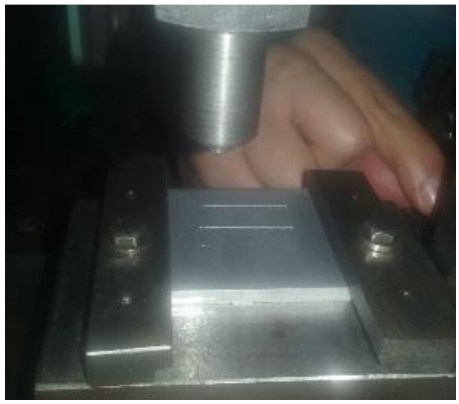

Figura 3.5 Ensayo de rayado

3.6.4 Medición de la huella.

La medición de la huella se realizó con un monocular de baja precisión como se muestra en la figura 3.6 en donde se realizaron tres mediciones en cada raya y nueve en cada una de las probetas, estas mediciones se realizaron por tres personas en particular para contrastar los resultados obtenidos para cada medición tabla 3.3.

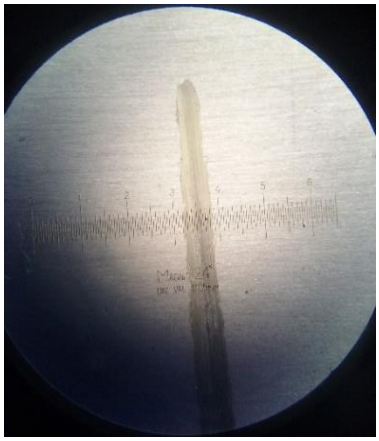

Figura 3.6 Medición de la huella con el monocular

Tabla 3.3 Medidas del ancho de la huella (mm).

Número	**Probeta. 1**	**Probeta. 2**	**Probeta. 3**
1	0.55	0.55	0.55
2	0.65	0.60	0.55
3	0.65	0.65	0.60
4	0.65	0.65	0.55
5	0.60	0.70	0.65
6	0.65	0.75	0.60
7	0.55	0.60	0.60
8	0.60	0.55	0.65
9	0.60	0.55	0.70
Promedio	0.61	0.62	0.61

3.6.5 Cálculo de dureza al rayado

La ecuación 3.1 expresa el número de dureza de rayado (HSp): es una cantidad expresada en unidades de fuerza por unidad de área, que caracteriza la resistencia de la superficie de un sólido a la penetración de un indentador bajo una fuerza normal y velocidad constante [17,18,19].

$$HSp = \frac{8 \times P}{\pi \times w^2} \qquad Eq.\ 3.1$$

Donde :

P→fuerza normal aplicada en(N)

w→ ancho de la huella en (m)

HSp→ número de dureza al rayado en (Pa)

HSp (Dureza al rayado) en GPa			
	Probeta. 1	**Probeta. 2**	**Probeta. 3**
Resultado	0.205	0.199	0.205

Conclusiones parciales

- Como resultado del análisis químico y la dureza del material se pudo determinar que el material de fabricación de la probeta es un aluminio AA1060-H18 ya que los resultados obtenidos coinciden con los resultados de la MatWeb.
- Después de que se ajustó la velocidad variando el engrane entre la cremallera y los tres piñones para cada una de las probetas se obtiene como resultado que la variación de la velocidad no influye en el ancho de la huella y por tanto tampoco influye sobre el número de dureza al rayado, aunque con el aumento de la velocidad se dificultó la localización de los contornos de la huella.
- El resultado del número de dureza al rayado para las probetas número 1 y 3 coindice para un valor de 0.205 GPa y para la probeta 2 este fue ligeramente diferente para un valor de 0.199 GPa. Aun así, son solo diferentes en aproximadamente un 3%, lo que se debe principalmente a los errores en la medición del ancho de la huella.

Conclusiones generales

- El ensayo de rayado se aplica en investigaciones que estudian el mecanismo de desgaste abrasivo en la superficie de materiales y es el principal ensayo para evaluar la resistencia al rayado de un material. El rayado se puede considerar como un caso especial de abrasión en el que una sola partícula desgasta la superficie del material.

- Al analizar la norma ASTM G 171 se define que la máquina para realizar el ensayo de rayado debe incluir como elementos fundamentales un indentador rígido, un dispositivo porta probetas, sistema para la aplicación de la carga normal, y el sistema para garantizar el movimiento relativo entre el penetrador y la probeta.

- Al analizar el efecto de la velocidad de rayado sobre la huella, se obtiene como resultado que la variación de dicha velocidad no influye en el ancho de la huella y por tanto tampoco influye sobre el número de dureza al rayado, aunque con el aumento de la velocidad se dificultó la localización de los contornos de la huella.

- El resultado del número de dureza al rayado para las probetas número 1 y 3 coindice para un valor de 0.205 GPa y para la probeta 2 este fue ligeramente diferente para un valor de 0.199 GPa. Al comparar los números de dureza al rayado con los obtenidos por otros investigadores se observa que este material es menos resistente al rayado que el Al6061, Cu110 y SS304 que poseen un valor de 0.8, 0.49 y 3.01 GPa.

Recomendaciones:

- Realizar modificaciones en la máquina para ajustar las velocidades de desplazamiento del porta probetas de acuerdo al rango recomendado por la norma.
- Incorporar un dispositivo en la máquina para medir en el lugar el ancho de la huella que surge en la probeta rayada.
- Realizar otros ensayos de desgaste con el mismo material de las probetas para establecer posibles relaciones con otras propiedades del material.

Bibliografia:

[1] ASM HANDBOOK COMMITTEE. ASM Handbook: Friction, Lubrication, and Wear Technology. In.: ASM International, 1992, vol. 18.

[2] HUTCHINGS I. M. Tribology: Friction and ware of engeneering materials. University of Cambridge. 1992, 273 pag.

[3] BHUSHAN B. Modern Tribology Hndbook. Department of Mechanical Engeneering. The Ohio State University.

[4] GOMEZ M. A. Caracterización de las propiedades tribológicas de los recubrimientos duros, Barcelona, diciembre de 2005, pag 19

[5] FLEISHER. G. T. Verschleiss and Zuwerlassigteit. Vurlag TechnikBudem. Año; 1980. Pag. 37.

[6] MARTINEZ F. CASTAÑEDA S. Fundamentos teóricos del desgaste abrasivo. Revista Construcción de Maquinaria. No. 8, mayo-agosto, 1983. Pag. 161.

[7] KACHEV V. V. fisch tein BM .Metode pogischionige dolgovechmosti ditalier mschin. E. maschinstroginigi. Moscú 1971 Pag. 213.

[8] Streeter John: Curso sobre recuperación de piezas, Serie técnica, 1980, Pag. 97.

[9] Tenembuam.M.M. Desgaste de los materiales de construcción y los elementos de máquina .Editorial Maschinoestronie, Moscú, 1966, Pag. 114.

[10] Fleisher. G. T. Verschleiss and Zuwerlassigteit. Vurlag TechnikBudem. Año; 1980. Pag. 37.

[11] GARCÍA, Á. F. Física con ordenador: Curso Interactivo de Física en Internet. Dinámica. Fuerza de Rozamiento. Disponible en Internet:<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/dinamica/rozamiento/general/rozamiento.htm>.

[12] Standard Test Method for Scratch Hardness of Materials Using a Diamond Stylus. ASTM Standard designation: G171-03.

[13] INTEREMPRESAS.NET. Mejora de la resistencia al rayado en compuestos de polipropileno. 2003. Disponible en Internet:<http://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/6712-2-Definicion-de-rayado.html>.

[14] SIERRA, A. R., F. J. G. MADARIAGA AND M. A. S. SOTO Ensayo de rayado (scratch-test) de los componentes plásticos bicapa rígido-flexibles usados en el diseño de electrodomésticos y herramientas tipo "soft-touch" (asas de agarre cómodo). Revista de Arquitectura, Diseño y Urbanismo, 2008, (No. 5).

[15] Standard Test Method for Scratch Hardness of Materials Using a Diamond Stylus on the Micro-Tribometer mod. CETR-UMT 2. ASTM G171-03. Disponible en Internet:<http://www.cetr.com/eng/services/pdf/ASTM%20G171-03%20Scratch%20hardness.pdf>.

[16] DUANJIE L. Scratch Harness Measurement Using Mechanical Tester . Revista Nanovea, 2014

[17] ADLER, Thomas A. & WALTERS, Richard P. Wear and scratch hardness of 304 stainless steel investigated with single scratch test. *Wear.* 1993. No. 162-164. 713-720 p.

[18] SINHA, S.K., REDDY, S.U. & GUPTA, M. Scratch hardness and mechanical property correlation for Mg/SiC and Mg/SiC/Ti metal-matrix composites. *Tribology International*. 2006. No. 39.

[19] Standard Test Method for Scratch Hardness of Materials Using a Diamond Stylus. ASTM Standard designation: G171-03.

[20] WANG Zongshen [et al]. Experimental investigation of pure aluminum sheets processed by constrained groove pressing. *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences.* 2014. Vol. 21. pag 121-127.

Anexo I:

Belec Spektrometrie Opto-Elektronik

phone: +49 5401/8709-0
fax : +49 5401/8709-28
e-mail: info@belec.de
Internet: www.belec.de

Hamburger Strasse 12 49124 Georgsmarienhütte

PROTOCOLO DE ANALISIS

Prueba: MUESTRA

Cliente: UCLV

Operador: ANA

programa No. : 41 descriptión del programa : Al, Si < 2% fecha: 2.25.2016

Valor:

no.	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Sn.	Ti	Pb	V	Co	Al.
1	0.088	0.278	<0.001	<0.001	0.008	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.027	<0.001	0.005	<0.001	99.59
2	0.077	0.253	<0.001	<0.001	0.004	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.027	<0.001	0.005	<0.001	99.63
3	0.086	0.261	<0.001	<0.001	0.006	<0.001	<0.001	0.002	<0.001	0.027	<0.001	0.005	<0.001	99.60
4	0.081	0.252	<0.001	<0.001	0.004	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.025	<0.001	0.004	<0.001	99.63
5	0.079	0.285	<0.001	<0.001	0.003	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.028	<0.001	0.005	<0.001	99.59

Media:

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Sn.	Ti	Pb	V	Co	Al.
0.082	0.266	<0.001	<0.001	0.005	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.027	<0.001	0.005	<0.001	99.61

Calidad: 3.0255 Al 99.5

Tabla 1: Composición química de las probetas