

Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

Caracterización microestructural y tribológica de fundición nodular para aplicaciones automotrices.

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de
Ingeniero en Electromecánica.

Presenta

Heriberto Tovar Camacho

San Juan del Río, Qro.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a la Universidad Autónoma de Querétaro, UAQ, campus San Juan del Río y a los maestros que durante el tiempo que fui parte de la comunidad estudiantil me brindaron su apoyo, tolerancia y que compartieron conmigo de sus conocimientos. Un agradecimiento en especial para el Dr. Luis Alberto Morales Hernández, por confiar en mí para el desarrollo de esta tesis y por el apoyo brindado.

Un agradecimiento al Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica, CIDETEQ, en especial al M. en C. Federico Manríquez, quien me apoyo con sus conocimientos y me auxilió en el empleo de el equipo del laboratorio de esta institución, para la preparación de las muestras y la realización de las pruebas tribológicas.

Un agradecimiento muy grande, a las personas que de algún modo han contribuido con lo que ahora soy, y son parte de este momento, a mis compañeros y amigos de la carrera que me apoyaron con su buen humor y solidaridad durante todo este tiempo.

Por último pero no menos importante un agradecimiento muy especial a mi familia, ya que ellos son los principales culpables de que esto sea posible, por su infinito amor y apoyo mil gracias.

Gracias a todos.

CAPÍTULO 1	9
1.1 Introducción	9
1.2 Descripción del problema	9
1.3 Objetivos	10
Objetivo general:	10
Objetivos particulares:	10
CAPÍTULO 2	11
2.1 Introducción	11
2.1.1 Acero.....	11
2.1.2 Caracterización y producción de las fundiciones	11
2.1.3 Fundición gris	13
2.1.4 Fundición blanca.....	13
2.1.5 Fundición maleable	14
2.1.6 Fundición dúctil o nodular	15
2.1.7 Hierro de grafito compacto	16
2.2 Tribología.....	16
2.2.1 Desgaste	17
2.2.2 Clasificación del desgaste	19
2.3 Hierro nodular austemperizado.....	20
2.3.1 Propiedades.....	21
2.3.2 Tratamientos térmicos.....	22
2.3.2.1 Austenitización	22
2.3.2.2 Austemperizado	23
2.3.2.3 Etapas de la transformación del austemperizado	23
2.4 Utilización del hierro nodular	25
2.5 Estado del arte	28
CAPÍTULO 3	30
3.1 Material de análisis	30
3.2 Preparación de muestras	30
3.2.1 Corte:	31
3.2.2 Encapsulado:	31
3.2.3 Desbaste:.....	32
3.2.4 Pulido:.....	33
3.2.5 Toma de imágenes:	33
3.3 Tribómetro y partes principales.	34
3.3.1 Parámetros introducidos en el programa para la prueba tribológica	35
3.3.2 Pruebas de desgaste con tribómetro perno sobre disco	36
3.3.3 Desarrollo de las pruebas de desgaste con el tribómetro.....	37
3.4 Medición de la huella de desgaste	41

3.4.1	Proceso de medición de la huella de desgaste.....	42
3.5	Uso del software imágenes.....	43
CAPÍTULO 4	50
4.1	Análisis microestructural.....	50
4.2	Resultados de procesamiento de imágenes.....	51
4.2.1	Características microestructurales.....	51
4.2.1.1	Nodularidad.....	51
4.2.1.2	Compacidad.....	52
4.2.1.3	Granulometría.....	52
4.2.1.4	Porcentaje de grafito.....	53
4.2.1.5	Densidad nodular.....	54
4.3	Volumen perdido.....	55
4.4	Graficas de coeficiente de fricción.....	56
4.5	Análisis del volumen perdido.....	62
4.6	Resumen de resultados.....	71
CONCLUSIONES	72
BIBLIOGRAFÍA	74
Apéndice	76

Índice de Figuras	Pág.
Figura 1 Hojuelas de grafito en hierro fundido gris (x100).	13
Figura 2 Fundición blanca antes del tratamiento térmico (x100).	14
Figura 3 Fundición maleable ferrítica con nódulos de grafito (x100).	14
Figura 4 Microestructura de una fundición dúctil o nodular.	15
Figura 5 Estructura de la fundición de grafito compacto (x100).	16
Figura 6 Imagen microscópica del desgaste en una fundición nodular.	20
Figura 7 Proceso de austemperizado. (Acosta, 2000)	23
Figura 8 Diagrama de transformación isotérmica, mostrando la trayectoria térmica de un tratamiento térmico de austemperizado típico para el hierro nodular 1.5%Ni-0.3%Mo. (Acosta 2000)	24
Figura 9 Partes automotrices, fabricadas con hierro nodular. (Acosta, 2000).	25
Figura 10 Diagrama a bloques de la preparación de las muestras.	30
Figura 11 Corte de pieza a) Pieza completa b) Pieza seccionada c) Piezas para montar en probeta.	31
Figura 12 a) Maquina de encapsulamiento b) Resistencia actuando sobre el tubo de fundido c) Disipador de calor d) Muestras encapsuladas	32
Figura 13 Lijadora con diferentes tamaños de lijas.	32
Figura 14 Maquina pulidora con discos de pasta de diamante y disco de alúmina.	33
Figura 15 a) Microscopio empleado en la captura de las imágenes b) Imagen de la microestructura de una muestra.	34
Figura 16 Partes principales del tribómetro (marca CSM).	34
Figura 17 Esquema de proceso de la prueba tribológica.	37
Figura 18 Nivelación del brazo porta perno.	38
Figura 19 Ajuste de las tuercas de balanceo del brazo porta perno.	38
Figura 20 Sujeción de la muestra en chuck del tribómetro	38
Figura 21 Incidencia del balón sobre la muestra	39
Figura 22 Aplicación de la carga de 2 Newton.	39
Figura 23 Ajuste del radio de la huella.	39
Figura 24 Diferentes radios de la huella de desgaste (r es el radio de huella)	40
Figura 25 Grafica del coeficiente de fricción arrojada por el tribómetro	41
Figura 26 diagrama a bloques del proceso de medición de la huella de desgaste	41
Figura 27 Imagen de la reglilla graduada captada por medio del microscopio	42

Figura 28 Huella de desgaste.....	43
Figura 29 Pantalla principal del programa imágenes.	44
Figura 30 Comando Nodularidad.	45
Figura 31 Partículas con diferentes nodularidades.	45
Figura 32 Medida de la rejilla graduada en mm y en pixeles.....	46
Figura 33 Comando Compacidad.	46
Figura 34 Diferentes niveles de compacidad.....	47
Figura 35 Comando Granulometría.	47
Figura 36 Diferentes tamaños de nódulos.	47
Figura 37 Comando Porcentaje Volumétrico.	48
Figura 38 Partículas de grafito en negro y matriz en blanco	48
Figura 39 Seccionamiento de la pieza.	50
Figura 40 Imágenes características de cada muestra y numero de imágenes tomadas de cada una.	50
Figura 41 Grafica de nodularidad de las muestras.	51
Figura 42 Grafica de compacidad de las muestras	52
Figura 43 Grafica de granulometría de las muestras	52
Figura 44 Grafica de porcentaje de grafito de las muestras.	53
Figura 45 Grafica de la densidad nodular de las muestras.	54
Figura 46 Grafica de volumen perdido para cada muestra.....	55
Figura 47 Grafica de coeficiente de fricción pieza A.....	56
Figura 48 Grafica del coeficiente de fricción pieza B.....	58
Figura 49 Grafica de coeficiente de fricción pieza C	59
Figura 50 Grafica de coeficiente de fricción pieza D.....	60
Figura 51 Grafica de coeficiente de fricción pieza E	61
Figura 52 Grafica de volumen perdido para cada paro	64
Figura 53 Grafica de la tasa de desgaste para cada paro	65
Figura 54 Grafica de porcentaje de tasa de desgaste para cada paro.....	66
Figura 55 Grafica de coeficiente de fricción de la prueba tribológica de la sección A con paros	67
Figura 56 Grafica de volumen perdido para cada paro	68
Figura 57 Grafica de la tasa de desgaste para cada paro	69
Figura 58 Grafica de porcentaje de tasa de desgaste para cada paro.....	70

Figura 59 Grafica de coeficiente de fricción de la prueba tribológica de la sección E con
paros71

Índice de tablas	Pág.
Tabla 1 Propiedades típicas de las fundiciones	12
Tabla 2 propiedades mecánicas de los hierros nodulares Austemperizados (norma ASTM A-897M-90).....	22
Tabla 3 Aplicaciones del Hierro Nodular Austemperizado (Acosta, 2000).....	26
Tabla 4 Parámetros empleados en las pruebas tribológicas	35
Tabla 5 Tabla de valores de nodularidad de las muestras.	51
Tabla 6 Tabla de valores de porcentaje de grafito de las muestras.	53
Tabla 7 Tabla de los valores de densidad nodular de cada muestra.	54
Tabla 8 Tabla de valores de volumen perdido para cada muestra.	55
Tabla 9 Tabla de de pruebas tribológicas muestra A.....	57
Tabla 10 Tabla de de pruebas tribológicas muestra B.....	58
Tabla 11 Tabla de de pruebas tribológicas muestra C.....	59
Tabla 12 Tabla de de pruebas tribológicas muestra D.....	60
Tabla 13 Tabla de de pruebas tribológicas muestra E.....	61
Tabla 14 Valor del volumen perdido para cada paro.....	65
Tabla 15 Valores de tasa de desgaste para cada paro	66
Tabla 16 Valor del volumen perdido para cada paro.....	68
Tabla 17 Valores de tasa de desgaste para cada paro	69
Tabla 18 Tabla de resultados	71

CAPÍTULO 1

1.1 *Introducción*

La mayoría de mecanismos están sujetos a deslizamientos, contactos y rozamiento que provoca desgaste en ellos. El Hierro Nodular es uno de los más utilizados en la Industria Automotriz, debido a las ventajas que presentan con respecto al Acero o el Hierro Gris, por ejemplo, mayor resistencia a la fatiga y mayor resistencia al desgaste, aunque con un costo mayor de fabricación. Por su buena tenacidad el Hierro Nodular está siendo utilizado para la fabricación de piezas que experimentan ciclos de fatiga, ya que por el tipo de estructura cristalográfica que posee, inhibe el crecimiento y propagación de grietas, además posee una alta resistencia al desgaste, como se requiere en cigüeñales, monoblocks, engranes, entre otros.

El objetivo de este trabajo es realizar caracterización microestructural de este tipo de fundición en una pieza automotriz de una misma composición química, pero con variaciones en la microestructura debidas a cambios en su espesor y constitución física y relacionarlos con su resistencia al desgaste.

El análisis de las características micro estructurales será por medio de procesamiento de imágenes con lo cual se observara las variantes que hay en las diferentes secciones de una misma pieza, las cuales serán comparadas con los resultados obtenidos de las pruebas tribológicas y poder determinar qué tipo de microestructura es más resistente al desgaste.

1.2 *Descripción del problema*

Actualmente las fundiciones nodulares tienen una gran aplicación en mecanismos expuestos a ciclos de fatiga ya que debido a la microestructura que posee inhibe el crecimiento y propagación de grietas además posee una alta resistencia al desgaste.

Es necesario relacionar aun más la microestructura de este tipo de fundiciones para poder producir piezas de mayor resistencia al desgaste con espesores relativamente pequeños.

1.3 *Objetivos*

Objetivo general:

Analizar la relación que existe entre las características microestructurales y el comportamiento tribológico de una fundición nodular para una pieza automotriz.

Objetivos particulares:

Caracterizar una pieza de fundición nodular, utilizada para un yugo de cruceta, microestructural y tribológicamente.

Estudiar el comportamiento tribológico en base al espesor.

Analizar el efecto de la densidad nodular

Analizar el efecto de la distribución nodular en las características tribológicas.

2.1 *Introducción*

En este capítulo detallaremos los conceptos que se utilizarán en el desarrollo de este trabajo, empezando por la clasificación del hierro y las variedades de fundición que existen de este metal así como las características de cada una de estas fundiciones. Se realizará un enfoque principal al hierro nodular austemperizado, tratando sus propiedades y tratamientos térmicos que son aplicados a este tipo de hierro. También se definirán los conceptos básicos de tribología y desgaste.

2.1.1 **Acero**

El hierro puro (Fe) se utiliza muy poco para la fabricación de objetos debido a que es un material suave y débil, en cambio, se utiliza ampliamente cuando se le adiciona carbón (C), ya que el hierro adquiere dureza y resistencia. El efecto benéfico del carbón, aunque crea problemas para fabricarlo, es ventajoso cuando se encuentra en un rango de 0.17% al 2% (figura 6), a estas aleaciones o mezclas se les conoce como Aceros, de los cuales existe una gran variedad dependiendo de la cantidad de elementos químicos adicionalmente agregados (Silicio, Manganeso, Cromo, etc.) y la velocidad de enfriamiento, entre otros factores.

2.1.2 **Caracterización y producción de las fundiciones**

Para producir algún tipo de hierro fundido, se debe de controlar cuidadosamente la solidificación eutéctica frecuentemente agregando modificadores para promover un crecimiento eutéctico adecuado. Las propiedades típicas a parecen en la Tabla 1

Tabla 1 Propiedades típicas de las fundiciones

	Resistencia mecánica a la tensión (psi)	Esfuerzo de cedencia (psi)	% E	Notas
Fundiciones grises:				
Clase 20	12,000 - 40,000			
Clase 40	28,000 - 54,000			
Clase 60	44,000 - 66,000			
Fundiciones maleables:				
32510	50,000	32,500	10	Ferrítico
35018	53,000	35,000	18	Ferrítico
50005	70,000	50,000	5	Perlítico
70003	85,000	70,000	3	Perlítico
90001	105,000	90,000	1	Perlítico
Fundiciones dúctiles:				
60-40-18	60,000	40,000	18	Recocido
65-40-12	65,000	45,000	12	Ferrítico fundido
80-55-06	80,000	55,000	6	Perlítico fundido
100-70-03	100,000	70,000	3	Perlítico fundido
120-90-02	120,000	90,000	2	Templado y revenido
Fundiciones de grafito compacto				
Baja resistencia	40,000	28,000	5	90%
Alta resistencia	65,000	55,000	1	80%

2.1.3 Fundición gris

La fundición gris contiene muchos agrupamientos o celdas eutécticas de grafito en hojuelas interconectadas, como se observa en la Figura 1. El punto en el cual se conectan estas hojuelas es el núcleo original de grafito. La inoculación ayuda a producir celdas eutécticas más pequeñas, mejorando así la resistencia. Las fundiciones grises se clasifican mediante un número de clasificación que van del 20 al 80; una fundición gris clase 20 tiene una resistencia nominal a la tensión de 20,000 psi, sin embargo, en piezas fundidas gruesas, las grandes hojuelas de grafito y la matriz ferrítica producen resistencias a la tensión tan bajas como 12,000 psi, en tanto que en fundiciones delgadas, se forma grafito y perlita finos, con resistencias a la tensión cercanas a 40,000 psi. Se pueden obtener resistencias aún mayores reduciendo el equivalente de carbono, mediante la aleación o mediante tratamiento térmico.

Las hojuelas de grafito concentran esfuerzos, causando baja resistencia y ductilidad, pero la fundición gris tiene varias propiedades atractivas: alta resistencia a la compresión, buena maquinabilidad, adecuadas resistencias al desgaste por fricción, y a la fatiga térmica; efectiva conductividad térmica y amortiguamiento contra la vibración.



Figura 1 Hojuelas de grafito en hierro fundido gris (x100).

2.1.4 Fundición blanca

Un grupo de hierros fundidos blancos altamente aleados se utilizan por su dureza y resistencia al desgaste por abrasión. Se agregan elementos como el cromo, el níquel y el molibdeno, de manera que, además de los carburos de

aleación que se forman durante la solidificación, se puede producir martensita durante el tratamiento térmico posterior.

En la Figura 2 se muestra la microestructura de la fundición original blanca.

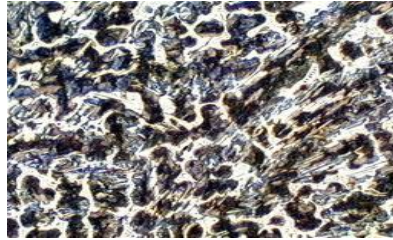


Figura 2 Fundición blanca antes del tratamiento térmico (x100).

2.1.5 Fundición maleable

La fundición maleable se produce al tratar térmicamente la fundición blanca no aleada del tres por ciento carbono equivalente (2.5% C, 1.5%Si). Durante el tratamiento térmico de maleabilización, se descompone la cementita formada durante la solidificación y se producen nódulos o agrupamientos de grafito. Los nódulos o carbono de revenido, a menudo parecen palomitas de maíz como se observa en la Figura 3. La forma redonda del grafito permite que se obtengan una buena combinación de resistencia y ductilidad.

La producción de fundición maleable requiere de varios pasos. Los nódulos de grafito se nuclean al calentarse lentamente la fundición blanca. Durante la primera etapa de grafitización (PEG), la cementita se descompone en austenita estable y en fases gráficas conforme el carbono en el Fe_3C se difunde hacia los núcleos de grafito. Después del PEG, la austenita se transforma durante el enfriamiento.

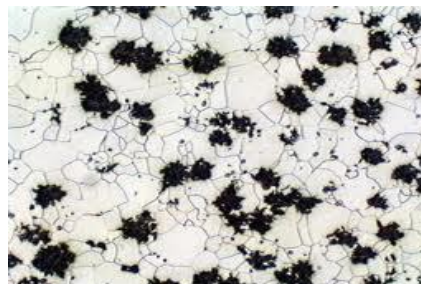


Figura 3 Fundición maleable ferrítica con nódulos de grafito (x100).

2.1.6 Fundición dúctil o nodular

El hierro fundido dúctil o nodular se produce tratando con magnesio un hierro bruto líquido, con un relativo alto equivalente de carbono; lo cual provoca que durante la solidificación crezca grafito esferoidal.

En la Figura 4 aparece la estructura típica del hierro dúctil.

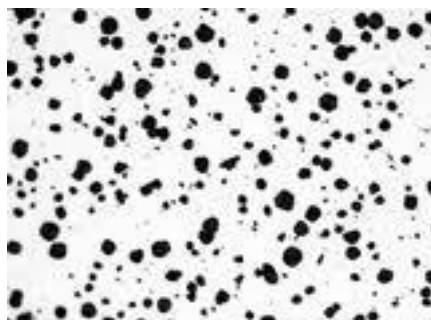


Figura 4 Microestructura de una fundición dúctil o nodular.

Para producirlo se requiere de varios pasos.

Desulfurización. La presencia de azufre provoca que el grafito crezca en forma de hojuelas. Se obtiene hierro con bajo contenido de azufre al fundir en hornos que durante la fusión eliminan la presencia de azufre en el hierro o mezclándolo con un agente desulfurizante, como el carburo de calcio.

Nodulación. En este paso se agrega magnesio el cual elimina cualquier azufre y oxígeno que aun quede en el metal líquido y deja un residuo de 0.03% Mg, que causa el crecimiento de grafito esferoidal. El magnesio es agregado aproximadamente a 1500°C. Desafortunadamente se vaporiza aproximadamente a los 1150°C.

La atenuación o evaporación gradual y no violenta del magnesio también deben ser controladas. Si no se vacía el hierro en los minutos posteriores a la nodulación, el hierro se convierte en fundición gris.

Inoculación. Debido a que el magnesio es un estabilizador de carburos provoca que durante la solidificación se forme fundición blanca. Por tal motivo después

de la nodulación se debe inocular el hierro con aleaciones FeSi. El efecto de la inoculación también se atenúa con el tiempo.

2.1.7 Hierro de grafito compacto

En esta fundición la forma del grafito es intermedia entre grafito en hojuelas y esferoidal, con numerosas barras redondas interconectadas al núcleo de la celda eutéctica como se observa en la Figura 5. Este grafito, que a veces se conoce como grafito vermicular, también se forma cuando el hierro dúctil se atenúa.

El grafito compacto permite resistencias mecánicas y ductilidades que exceden a las de la fundición gris, permitiendo que el metal conserve una buena conductividad térmica y propiedades de absorción de la vibración. El tratamiento para la fundición de grafito compacto es similar a la de la fundición dúctil. Sin embargo, durante la nodulación solo se introduce aproximadamente 0.015% Mg. (Askeland, 2008)

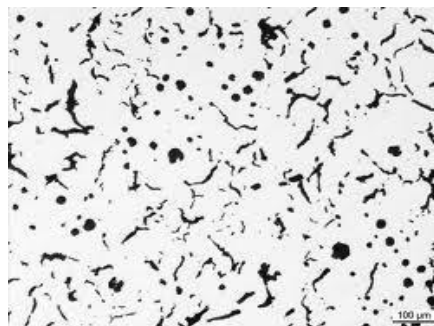


Figura 5 Estructura de la fundición de grafito compacto (x100).

2.2 Tribología.

La palabra tribología, proviene del griego tribo que significa fricción o rozamiento y logos que significa estudio. Etimológicamente significa estudio de los fenómenos de fricción o rozamiento. El concepto de tribología fue usado por primera vez en Gran Bretaña, por el profesor Peter Jost el 9 de marzo de 1966, y definiéndola como: la ciencia y la tecnología que estudia las superficies que

están en contacto y movimiento relativo así como los fenómenos que de ello se derivan. (Stolarski, 1991)

2.2.1 Desgaste

El desgaste es el desprendimiento de partículas que ocurre en la superficie de sólidos, que se encuentran en contacto y movimiento relativo, sometidas a una carga. El movimiento puede ser en forma unidireccional o de vaivén, ya sea deslizante, rodante o puede ser la combinación de estos dos últimos. (Raymond, 1994)

Al igual que la fricción, el desgaste es complejo, generalmente involucra varios mecanismos en la forma como se remueve el material, lo que genera cambios irreversibles en la superficie, o bien en la subsuperficie. Esto, repercute en el funcionamiento correcto de los sistemas; de igual forma, afecta el aspecto económico (Hutchings, 1992). Una de las formas de aumentar la resistencia al desgaste en los componentes, es incrementando dureza de las superficies. Esto se logra, generalmente, por medio de tratamientos superficiales en los metales, que al depositar, difundir o alterar la microestructura superficial de los aceros, se logra obtener una capa con mayor dureza que en el núcleo.

Cabe señalar que el comportamiento del desgaste no solo depende de la dureza, la temperatura y carga; además existen otros factores de igual importancia que afectan o determinan las características del desgaste (Raymond, 1994); que son:

1. Variables relacionadas con la metalurgia.

Dureza

Tenacidad

Constitución y estructura

Composición química

2. Variables relacionadas con el servicio.

Materiales en contacto

Presión

Velocidad

Carga superficial

Acabado de la superficie

3. Otros factores que contribuyen.

Lubricación

Corrosión

Medio ambiente

La carga es otro factor de gran importancia que es considerado, junto con la dureza para poder determinar la pérdida de volumen, como lo muestra a continuación la ecuación semi-empírica del desgaste de Archard (Hutchings, 1992). La Ecuación 1 determina la pérdida de volumen por desgaste.

$V = \frac{KWL}{3H}$	(1)
----------------------	-----

Donde:

V - Pérdida de volumen por unidad de distancia deslizada.

k - Constante, usualmente llamada coeficiente de desgaste.

W - Carga aplicada.

L - Deslizamiento.

H - Dureza de la superficie.

Cabe resaltar que el comportamiento del desgaste ante la variación de la carga es directamente proporcional, como lo confirma la ecuación de Archard. Pero sin olvidar que los materiales que han sido sometidos a tratamientos superficiales, tienen dos módulos de elasticidad, uno para la capa y otro para el sustrato; al aplicarles una carga sobre éstos, se generan esfuerzos en la interface, haciendo que sufra agrietamientos o la fractura el recubrimiento, dependiendo de la intensidad de la misma; lo que aumenta la posibilidad de desprendimiento de material con mayor facilidad e incrementando la tasa de desgaste del material.

Existen diferentes formas de mostrar el comportamiento del desgaste, generalmente se presentan por medio de gráficas, dentro de las más comunes son la pérdida de volumen contra distancia deslizante, número de ciclos, o bien contra tiempo. Donde el material que tiene menor pérdida de volumen, es el que mejor resiste el desgaste, en las condiciones que se realizan los ensayos.

2.2.2 Clasificación del desgaste

Existe una variedad de mecanismos que generan el desgaste; en 1957 Burwell, publicó en la revista *Wear*, una clasificación de los mecanismos de desgaste, más aceptada hasta la actualidad, para la comunidad científica. En este trabajo solo se describirán dos de estos mecanismos, los cuales son: por deslizamiento (adhesivo) y por abrasión. Desgaste por deslizamiento (adhesivo): Ocurre cuando se encuentran en contacto dos superficies y se desplazan una sobre otra, donde las crestas de las superficies en contacto fluyen plásticamente, formando fuertes uniones endurecidas (soldadura en frío), a medida que se rompen por la tracción tangencial, por lo que los sólidos desprenden material. Existe una gran influencia de varios parámetros sobre este mecanismo entre los que se encuentran:

Estructura cristalina, orientación del cristal y fuerza cohesiva.

En la siguiente Figura (6) se muestra un proceso de desgaste en una fundición nodular.

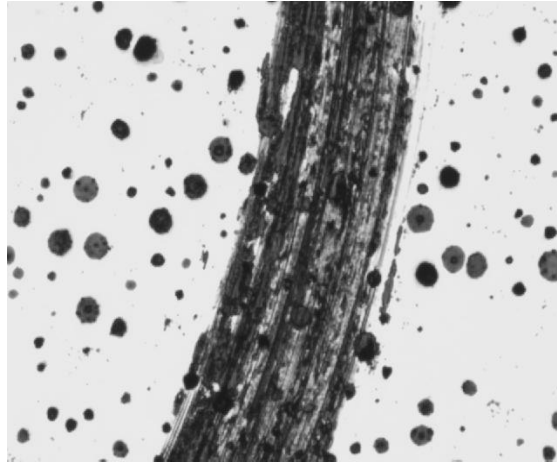


Figura 6 Imagen microscópica del desgaste en una fundición nodular.

Desgaste por abrasión: Cuando permanecen atrapadas partículas duras entre las superficies que se deslizan; provocan el desprendimiento de material en forma de viruta y la formación de surcos, como lo muestra la micrografía 6. Las partículas pueden originarse por la contaminación de la interfase o bien por residuos del mismo desgaste. También es posible este tipo de desgaste cuando las asperezas duras de un material penetran a otro de menor dureza, generando el desprendimiento de material; este proceso es similar al maquinado de materiales, donde las asperezas funcionan como herramienta de corte, solo que a nivel microscópico.

2.3 Hierro nodular austemperizado

Esta aleación es la más reciente dentro de la familia de los Hierros Nodulares y representa a un grupo de aleaciones de Hierro que ofrecen una buena

combinación de resistencia mecánica, dureza y resistencia al desgaste. Este tipo de aleaciones además, tiene una excelente capacidad de deformación y alta tenacidad, así como buena resistencia al desgaste y resistencia a la fractura, es por ello que estas aleaciones son utilizadas para reducir el peso y el costo en la fabricación de diversos componentes.

2.3.1 Propiedades

Las propiedades relevantes de los Hierros Nodulares Austemperizados son obtenidas por medio de un tratamiento térmico (con un control riguroso de la temperatura y el tiempo del tratamiento) y tiene como objetivo desarrollar una matriz con una estructura de bainita con ferrita (60%) y austenita retenida (estructura con alto contenido de carbón).

La austenita retenida es térmicamente estable a bajas temperaturas, pero es difícil de maquinar. Sin embargo, bajo condiciones adecuadas de esfuerzos, puede transformarse localmente en martensita (estructura dura y frágil). La ventaja de esta característica hace que los Hierros Nodulares Austemperizados sean utilizados en piezas en las que se desea que la dureza del material aumente conforme se van experimentando tensiones de carga locales, por ejemplo en flechas o en cojinetes. Además, los esfuerzos superficiales pueden ser puestos deliberadamente en una pieza antes de entrar en servicio, por ejemplo se Pueden inducir esfuerzos térmicos superficiales en una pieza, con los que se logra obtener una excelente resistencia al desgaste y a los esfuerzos por fatiga, esto se aplica por ejemplo en la fabricación de dientes de engranes o las superficies de rodamiento de los cigüeñales.

Los Hierros Nodulares Austemperizados tienen las siguientes aplicaciones generales:

Grado 1400-1100-1 y 1600-1300, son utilizados básicamente para engranes y aplicaciones donde es necesario tener una resistencia al desgaste.

Grado 1400-1100-1, se utilizan en piezas donde se sacrifica un poco la resistencia al desgaste, con el fin de aumentar el límite de ductilidad y tenacidad.

En la Tabla 2 se presentan las principales propiedades mecánicas de los Hierros Nodulares Austemperizados, de acuerdo a la norma ASTM.15

Tabla 2 propiedades mecánicas de los hierros nodulares Austemperizados (norma ASTM A-897M-90)

Grado	Resistencia a la tensión (Mpa)	Esfuerzo de cedencia (Mpa)	Deformación (%)	Resistencia Al impacto (j)a	Dureza (HB)c
850-550-10	850	550	10	100	269-321
1050-700-7	1050	700	7	80	302-363
1200-850-4	1200	850	4	60	341-444
1400-1100-1	1400	1100	1	35	388-477
1600-1300	1600	1300	B	b	444-555

(a) Sin entalla

(b) Sin especificación

(c) La dureza no es requisito y sólo se indica con fines informativos.

2.3.2 Tratamientos térmicos

El Hierro Nodular Austemperizado se obtiene por medio de dos tratamientos térmicos continuos, los cuales se detallan a continuación:

2.3.2.1 Austenitización

El tratamiento térmico de austenitización consiste en calentar la aleación dentro de un rango de temperatura entre 815 a 920°C, con la finalidad de formar estructuras cristalinas de Austenita homogénea. La temperatura elegida para este tratamiento depende de la siguiente etapa del proceso, así como del tipo

de estructura final buscada. Una vez que se ha seleccionado la temperatura de austenitización, la temperatura es controlada con una diferencia de $\pm 10^{\circ}\text{C}$.

2.3.2.2 Austemperizado

Una vez la aleación se ha transformado en Austenita homogénea, se transfiere rápidamente al horno de austemperizado, en donde se utilizan diferentes tipos de baños de sales para mantener la temperatura en un rango de 230 a 400°C , en este paso se busca la transformación de la Austenita en Bainita (Ausferrita). De acuerdo con las propiedades requeridas de la aleación, es como se selecciona la temperatura de austemperizado, aquí el control de temperatura y el tiempo del tratamiento térmico es de suma importancia. En la Figura 7 se muestra este proceso.

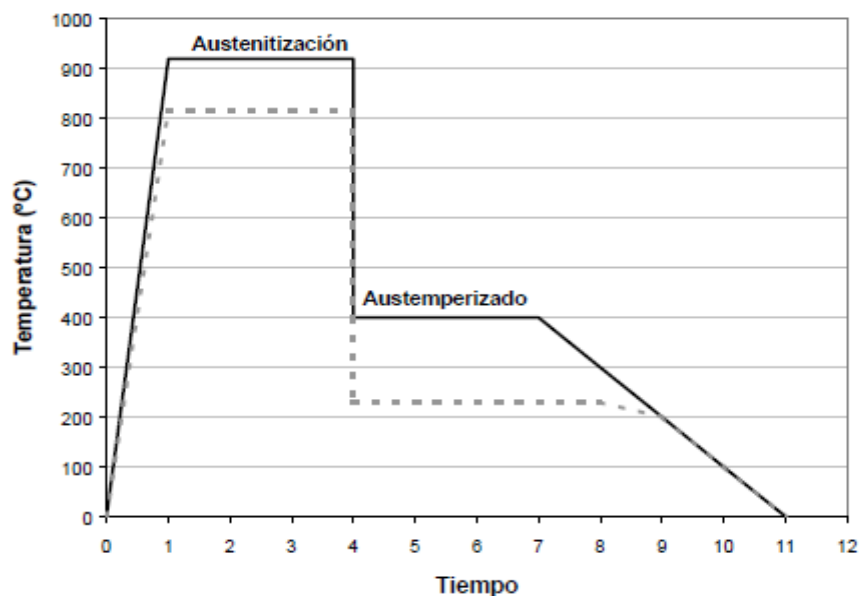


Figura 7 Proceso de austemperizado. (Acosta, 2000)

2.3.2.3 Etapas de la transformación del austemperizado

En la Figura 8, se puede apreciar un ciclo típico del tratamiento térmico de austemperizado, en donde la pieza de fundición es austenitizada (formación de Austenita) entre 850 y 950°C , templada posteriormente en un baño de sal o aceite en un rango de temperatura de 300 - 500°C y mantenida a esta temperatura por el tiempo necesario para lograr la transformación [9] de la austenita en bainita.

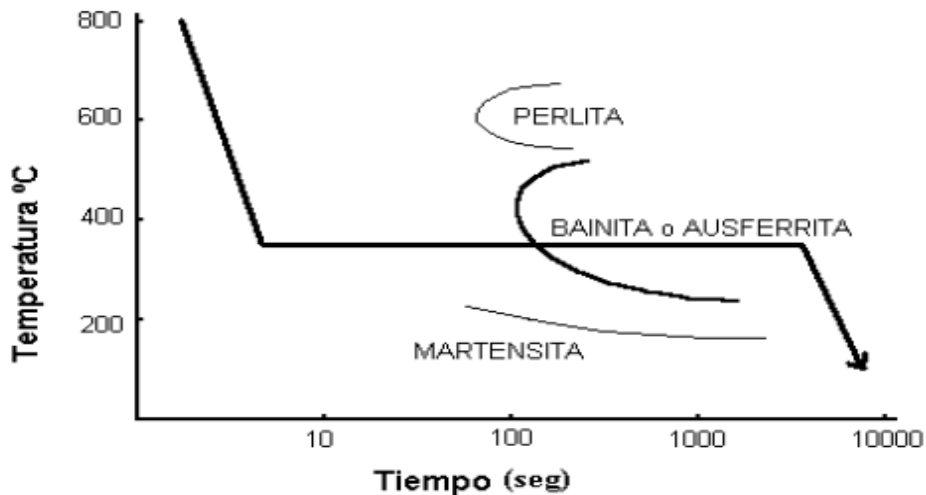
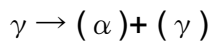


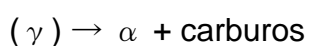
Figura 8 Diagrama de transformación isotérmica, mostrando la trayectoria térmica de un tratamiento térmico de austemperizado típico para el hierro nodular 1.5%Ni-0.3%Mo. (Acosta 2000)

La transformación isotérmica, en el intervalo de temperatura del austemperizado se realiza en dos etapas:

Etapa 1 (transformación parcial de austenita):



Etapa 2 (descomposición de la austenita metaestable):



Donde:

γ : austenita homogénea [10]

(α) : ferrita sobresaturada con carbono

(γ) : austenita metaestable con alto contenido de carbono

A : ferrita

α + carburos: Bainita superior o inferior

González, Hallen y Císneros evaluaron las propiedades en tensión, impacto y a la fatiga de dos hierros nodulares aleados con Cu-Mo y con Ni-Mo, austemperizados tanto a 370°C como a 315°C, con el fin de obtener microestructuras de bainita gruesa y bainita fina respectivamente.

Los resultados de estos estudios mostraron que, en ambas aleaciones es posible obtener una buena combinación de resistencia mecánica y resistencia a la fatiga mediante el austemperizado. Para una misma composición química, se obtuvo mayor resistencia mecánica y mayor resistencia a la fatiga con la temperatura de austemperizado de 315°C, aunque la energía de impacto Charpy fue mucho mayor con la temperatura de austemperizado a 370°C. Los hierros nodulares con Cu-Mo demostraron tener una resistencia a la fatiga mayor que los aleados con Ni-Mo.

2.4 Utilización del hierro nodular

En la Figura 9, se muestran algunas partes automotrices, fabricadas con Hierro Nodular.






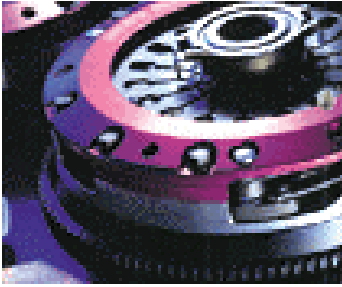


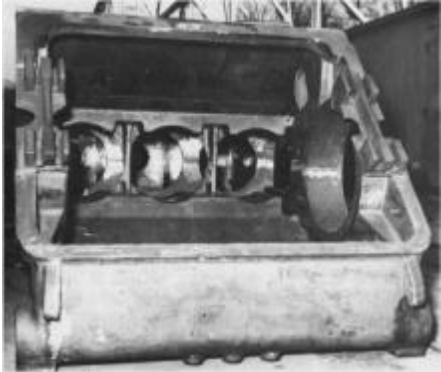
Figura 9 Partes automotrices, fabricadas con hierro nodular. (Acosta, 2000)

A continuación en la Tabla 3, se muestran algunas de las aplicaciones típicas del Hierro Nodular Austemperizado en la industria automotriz, en la que se

señala las ventajas al emplear este tipo de material, con respecto al material sustituido.

Tabla 3 Aplicaciones del Hierro Nodular Austemperizado (Acosta, 2000)

Nombre de la Pieza	Material Reemplazado	Ventajas	Imagen
Engranajes axiales (transmisión)	Acero Forjado	<ul style="list-style-type: none"> · Mayor Producción · Menores costos · Mejor maquinabilidad · Operación más silenciosa · Reducción de peso 	
Engranajes de tiempo de Motor Diesel	Acero 1022 Forjado	Reducción del 30% en costos	
Cigüeñal	Acero Forjado	<ul style="list-style-type: none"> · Menor costo · Mayor resistencia a la fatiga · Mayor Durabilidad · Reducción de peso 	

<p>Disco de Embrague</p>	<p>Acero Aluminio</p>	<ul style="list-style-type: none"> · Menor Costo · Menor Peso · Mejor resistencia al desgaste 	
<p>Engranajes de caja de transmisión</p>	<p>Acero Forjado</p>	<ul style="list-style-type: none"> · Menor costo de producción · Operación silenciosa · Reducción de peso 	
<p>Calibrador del disco de frenado</p>	<p>Acero</p>	<p>Menor peso</p>	
<p>Caja de transmisión para acoplar el árbol de levas</p>	<p>Acero</p>	<ul style="list-style-type: none"> · Mayor resistencia al desgaste · Mejor maquinabilidad · Menor peso 	

2.5 Estado del arte

Borrajo et al, en el 2000. Propusieron una fórmula para predecir el conteo nodular en fundiciones mediante el análisis de las curvas de enfriamiento de bloques escalonados de pared comprendidos entre 6.35 y 38.1 mm. de la experimentación concluyeron que reduciendo el tiempo de solidificación aumenta notablemente el conteo nodular de la fundición esferoidal.

Hatate et al, en el 2001. Analizaron la influencia de la forma del grafito en el desgaste y la fatiga, cambiándolo de esferoidal a hojuelas, encontrando un considerable aumento para estas últimas, en las pérdidas por desgaste, tanto en pruebas secas como en lubricadas.

Jairo et al, en el 2004 de acuerdo a resultados obtenidos en pruebas tribológicas realizadas en varios tipos de bronce y aceros se pudo concluir que la mejor combinación tribológica fue el par acero SAE 1045 – bronce SAE 64 y aceite como lubricante para los molinos de caña de azúcar.

Morales-Hernández et al, en el 2007. Desarrollaron un método para medir nódulos de grafito, basado en técnicas de procesamiento morfológico de imágenes (esto permite medir de forma automática las inclusiones). Este sistema permite mostrar la distribución granulométrica y tener una mejor comprensión de la microestructura del material.

Victoria, en el 2008. Caracterizo tribológicamente el acero AISI 1017 utilizado en las tazas de las flechas cardan y las comparo con 4 aleaciones de Fe-C procesadas por metalurgia de polvos observando que a medida que incrementa el contenido de carbono, la densidad se incrementa y presento la mejor resistencia al desgaste en condición lubricada. Por lo que concluyo que es factible manufacturara las tazas por este método que resulta más sencillo y económico.

Zanin, et al, en 2008. Analizando el desgaste de bronce al aluminio con un tribómetro diseñado y construido para reproducir las condiciones críticas de operación de dispositivos electrónicos giratorios de microondas con la finalidad

de que mantengan un contacto eléctrico adecuado y poder determinar su vida útil.

Morales-Hernández et al, en 2009. Introducen el concepto de curva de compacidad para caracterizar la distribución espacial de nódulos. Este concepto se define como la granulometría de las aperturas. Los cálculos fueron realizados utilizando las herramientas morfológicas básicas, como la apertura, la erosión y la dilatación.

Morales-Hernández et al, en el 2009. Mediante la técnica de morfología matemática, realizaron la caracterización de nódulos de grafito analizaron principalmente, la circularidad de los nódulos y la compacidad de la matriz.

Cano, et al en el 2010 realizaron experimentos en recubrimientos duros y observo que para películas delgadas de TiAlN el coeficiente de fricción es mayor para la película depositada a 50° en comparación con una depositada a 150°.

3.1 Material de análisis

Para el desarrollo de las pruebas se utilizara una pieza automotriz, correspondiente a la horquilla de un eje cardan, el cual tiene una composición química de las siguientes proporciones: C=3.5-3.9%, Mn=0.15-0.35%, Si=2.25-2.75% S=0.01-0.025%, P=0.05%max

La pieza será seccionada en 5 muestras seleccionadas en base a su espesor, lo cual seguramente tendrá afectación en la microestructura de los nódulos de grafito para cada una de estas muestras.

3.2 Preparación de muestras

A continuación, por medio de un diagrama a bloques, se describe el proceso general para la preparación de las muestras, para posteriormente realizar la toma de imágenes y la prueba tribológica.

Se empleo un promedio de 4 horas, durante 5 dias para la preparación de estas muestras.

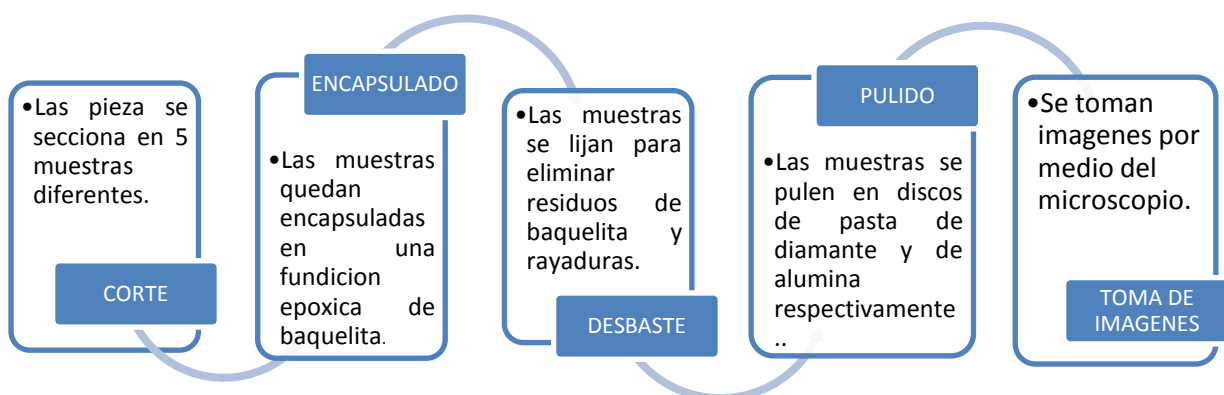


Figura 10 Diagrama a bloques de la preparación de las muestras.

3.2.1 Corte:

La pieza se secciona en 5 pequeñas partes menores a 1". Para lo cual se utiliza una cortadora de desbaste. Las secciones de corte son determinadas en base a sus diferencias en sus características físicas.

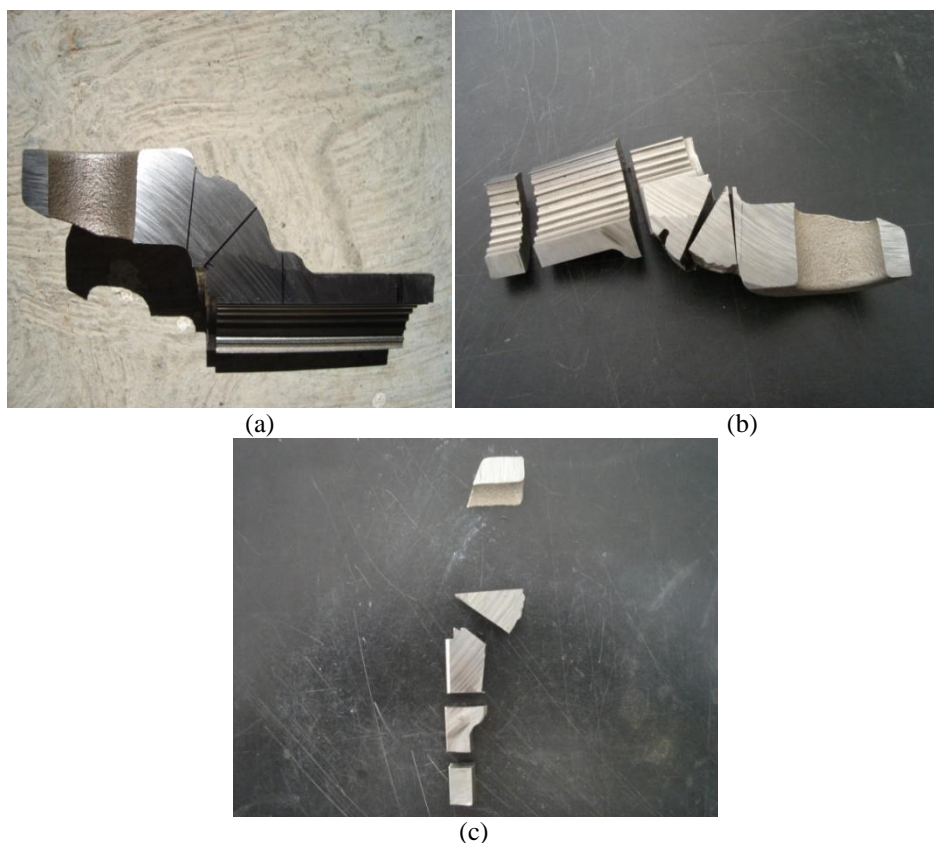


Figura 11 Corte de pieza a) Pieza completa b) Pieza seccionada c) Piezas para montar en probeta.

3.2.2 Encapsulado:

El encapsulado de las piezas se realiza en un aparato que cuenta con una prensa hidráulica y una resistencia, la cual calienta un tubo en el que se coloca la muestra y baquelita en grano, que será derretida por el calor de la resistencia y comprimida por la presión de la prensa, la presión debe de mantenerse constante durante la solidificación de la baquelita. Posteriormente se debe de enfriar el tubo por medio de un disipador de calor, una vez frio el tubo se quita la presión y se retira la pieza ya encapsulada este proceso nos permite la fácil manipulación y sujeción durante las pruebas tribológicas.

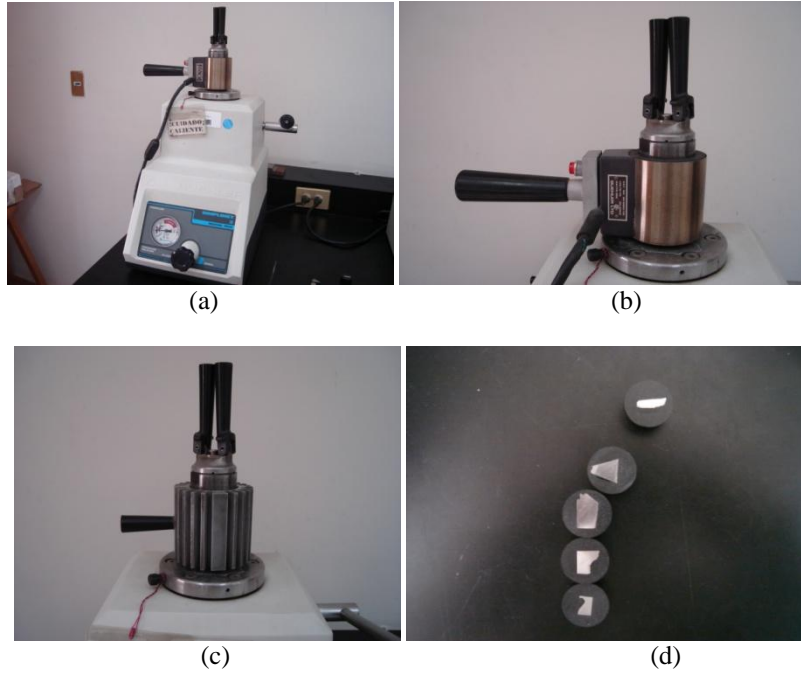


Figura 12 a) Maquina de encapsulamiento b) Resistencia actuando sobre el tubo de fundido c) Disipador de calor d) Muestras encapsuladas

3.2.3 Desbaste:

Una vez encapsulada la pieza se procede a realizar el desbaste de las muestras para retirar el material de baquelita que quede impregnado sobre ellas y que es necesario para eliminar líneas o raspaduras en la pieza por medio de varias lijas que van de N° 150, 200, 300, 400 y finalmente es posible encontrar en el mercado N°1500. Antes de pulir con la siguiente lija se debe girar en 90° la muestra, a fin de eliminar el rayado realizado con la lija anterior. Las operaciones de pulido intermedio con lijas de esmeril se hacen en húmedo.



Figura 13 Lijadora con diferentes tamaños de lijas.

3.2.4 Pulido:

El pulido se realiza posteriormente al desbaste esto con la finalidad de eliminar líneas que son imperceptibles para el ojo humano y así poder obtener imágenes de buena calidad y sin líneas que puedan afectar al procesamiento de las imágenes. El proceso de pulido se lleva a cabo en un disco de pasta de diamante y uno de alúmina, que giran en sentido horario. Primero se utiliza el disco de pasta de diamante para eliminar ralladuras y posteriormente el de alúmina el cual contiene partículas abrasivas esto con la finalidad de facilitar la observación de la microestructura y realizar una toma de imágenes de calidad.



Figura 14 Maquina pulidora con discos de pasta de diamante y disco de alúmina

3.2.5 Toma de imágenes:

Se realiza por medio del software del microscopio y se capturan en la computadora, para posteriormente realizar la caracterización nodular de cada sección de la pieza. Se tomaron las imágenes necesarias para cada sección, esto debido a que el software necesita analizar entre 2000 y 2500 nódulos de grafito para realizar una correcta caracterización.



Figura 15 a) Microscopio empleado en la captura de las imágenes b) Imagen de la microestructura de una muestra.

3.3 Tribómetro y partes principales.

En la Figura 16 se muestra el tribómetro CSM Instruments Standard Tribometer (TRB) empleado en las pruebas de desgaste así como sus partes principales.

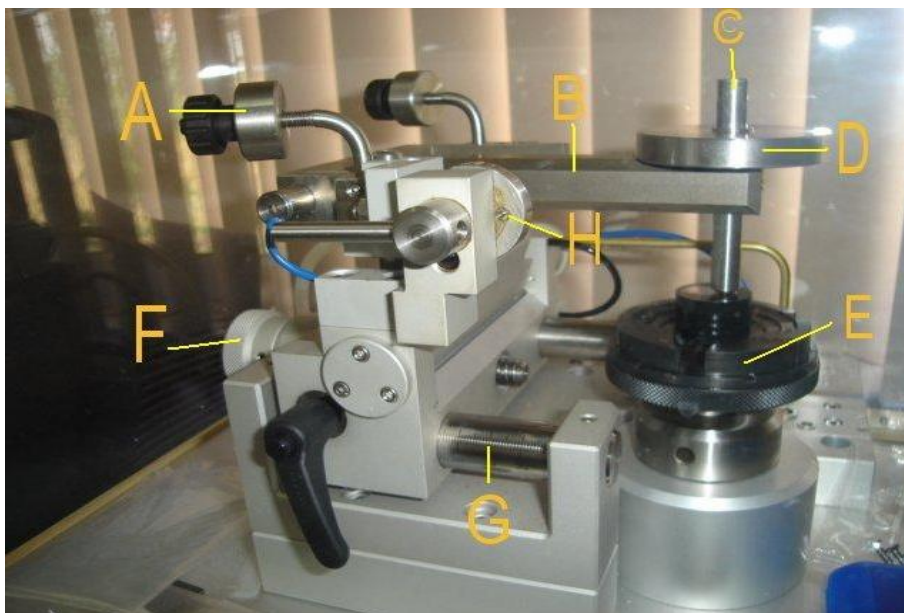


Figura 16 Partes principales del tribómetro (marca CSM).

A) Tuerca de nivelación de carga: estas tuercas son empleadas para compensar el peso del brazo porta perno y del mismo perno, esto con el fin de que la carga normal aplicada sea únicamente la de 2 Newtons.

B) Brazo porta perno: es un brazo rectangular el cual tiene un barreno para colocar el perno y poderlo ajustar a la altura requerida.

C) Perno (PIN): dentro de este se encuentra el balín que es el que incidirá en la pieza, para realizar el desgaste. Este balín es de acero 8620 de dureza 56 HRc de 6 mm de diámetro.

D) Carga de 2 Newton: es una pesa cilíndrica barrenada en su centro, que se coloca en el perno.

E) Chuck de sujeción de muestras: es un pequeño chuck cilíndrico que sujeta las muestras y que gira en sentido horario viéndolo desde la parte superior.

F) Perilla de desplazamiento de carro: por medio de esta perilla desplazamos el carro del brazo porta perno para ajustar el radio de la huella de desgaste.

G) Barra graduada: en esta podemos determinar el desplazamiento del carro porta brazo esta graduada en mm.

H) Seguro tope del brazo porta perno: este tope sirve para apoyar sobre él, al brazo porta perno mientras se nivela ó balancea.

3.3.1 Parámetros introducidos en el programa para la prueba tribológica

Dentro del programa del tribómetro existen parámetros para nuestro experimento Para el perno tenemos la geometría de este y su diámetro. Las variables que se introducen para la prueba son el radio al que se encuentra posicionado el perno, la velocidad lineal, carga normal, numero de vueltas a las que se detendrá la prueba.

Tabla 4 Parámetros empleados en las pruebas tribológicas

Parámetros de las pruebas tribológicas	
Diámetro del pin	6 mm
Radio de Huella de desgaste (es el radio justado en la barra graduada).	2.5 - 3 mm
Velocidad lineal	15 cm/s
Carga normal	2 Newton
Numero de vueltas	10000

3.3.2 Pruebas de desgaste con tribómetro perno sobre disco

En la siguiente imagen se muestra el proceso de preparación que se lleva a cabo, para realizar las pruebas de desgaste en el tribómetro.

Para la realización de estas pruebas se empleo un tiempo de 1 hora por cada prueba realizada a cada muestra, entre el tiempo que dura la prueba tribológica en el tribómetro, la colocación y la limpieza.

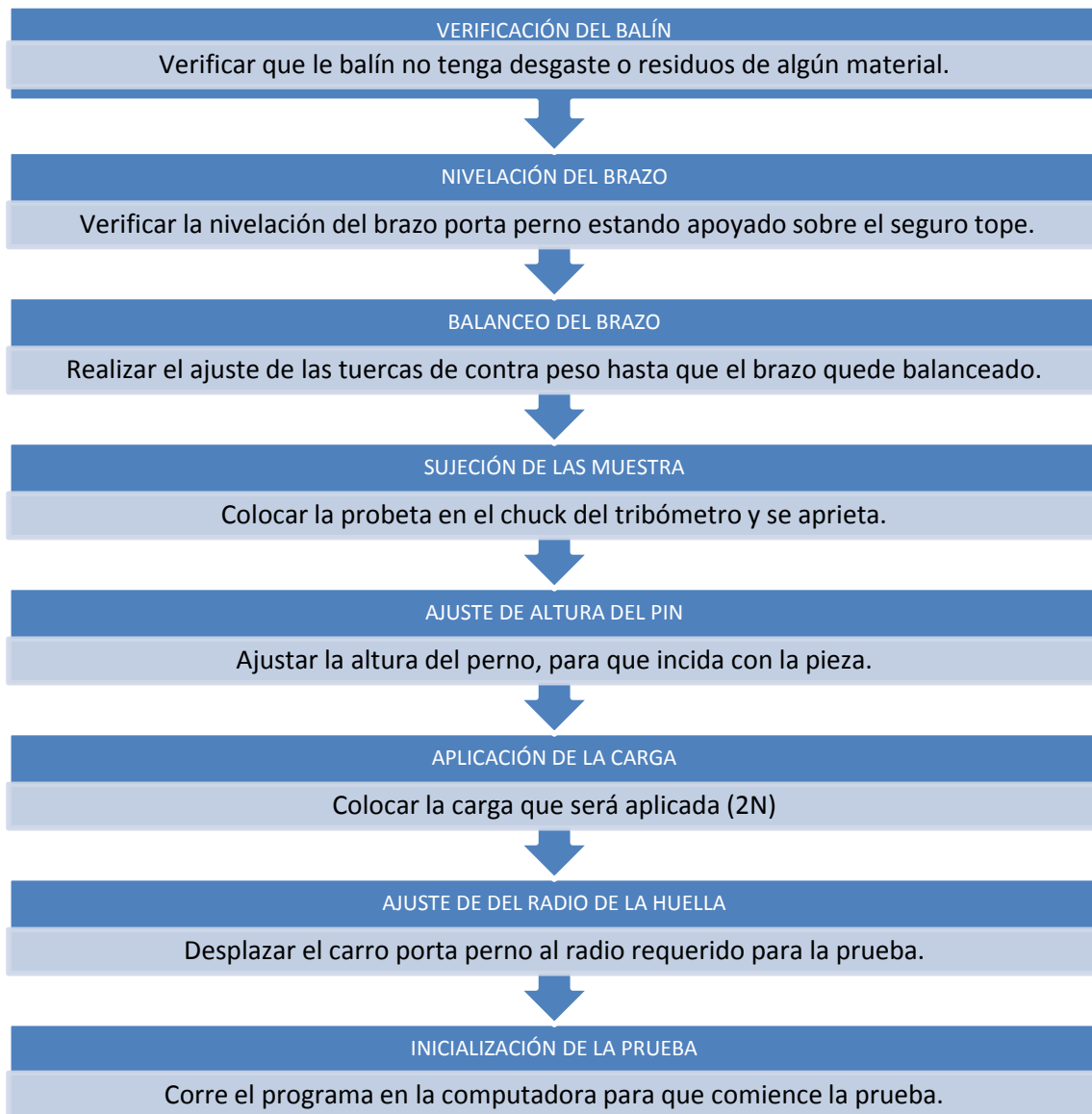


Figura 17 Esquema de proceso de la prueba tribológica.

3.3.3 Desarrollo de las pruebas de desgaste con el tribómetro

La realización de las pruebas de desgaste de tribómetro se lleva a cabo bajo la norma ASTM G 99-05.

Para la realización del experimento con el tribómetro lo primero que se debe hacer es verificar que el balín del perno no presente desgaste en la punta, de alguna experimentación anterior, una vez checado y limpiado se coloca en el brazo porta perno del tribómetro y se verifica que el brazo este nivelado haciéndolo caer sobre el seguro tope.



Figura 18 Nivelación del brazo porta perno.

Una vez checado la correcta nivelación del brazo, se ajustan las tuercas de compensación para que el peso del brazo y pin no influya sobre la pieza y solo sea la carga de 2 N la que se ejerza fuerza sobre la pieza. Para esto se ajustan las tuercas de compensación hasta que el brazo quede balanceado.



Figura 19 Ajuste de las tuercas de balanceo del brazo porta perno

Posteriormente se procede a colocar la pieza en la que se realizara la prueba en el chuck del tribómetro y la apretaremos para que quede sujeta correctamente.



Figura 20 Sujeción de la muestra en chuck del tribómetro

Una vez colocada la pieza se hace incidir el pin sobre ella y se aprieta el opresor que lo sujeta. Para posteriormente colocar la carga de 2 N y retirar el seguro tope, para que la carga actuara sobre la pieza.

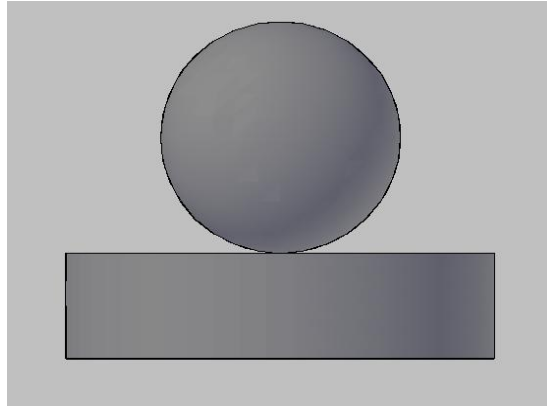


Figura 21 Incidencia del balón sobre la muestra



Figura 22 Aplicación de la carga de 2 Newton.

Posteriormente se ajusta la distancia del radio a la cual se realizara la prueba moviendo el carro de desplazamiento y verificando en la bancada graduada con la que cuenta y apretamos la perilla de fijación



Figura 23 Ajuste del radio de la huella

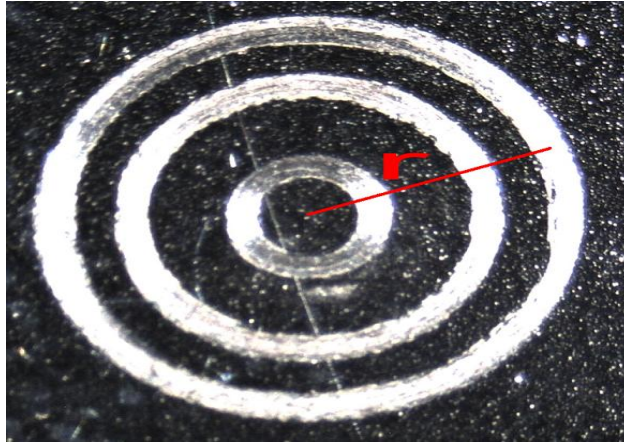


Figura 24 Diferentes radios de la huella de desgaste (r es el radio de huella)

Posteriormente se corre la prueba desde el programa, una vez introducidos los valores de las variables a considerar hasta que cumpla con las vueltas requeridas.

Los resultados que arroja la prueba tribológica son graficas del comportamiento del coeficiente de fricción lo cual nos permite tener una idea de los mecanismos de desgaste que actúan durante la prueba. Lo importante de la prueba es, el tamaño de la huella formado por el perno al termino de la prueba para medirla y calcular el volumen perdido por medio de la formula que es suministrada por la norma ASTM G99-05.

$VOLUMEN PERDIDO = \frac{\Pi(Rh)(Ah)^3}{6Rb}$	(2)
---	------

Donde:

Rh = radio de la huella de desgaste

Ah = ancho de la huella de desgaste

Rb = radio del balín

En la Figura 25 se muestra la grafica del coeficiente de fricción obtenida de la prueba realizada en el tribómetro.

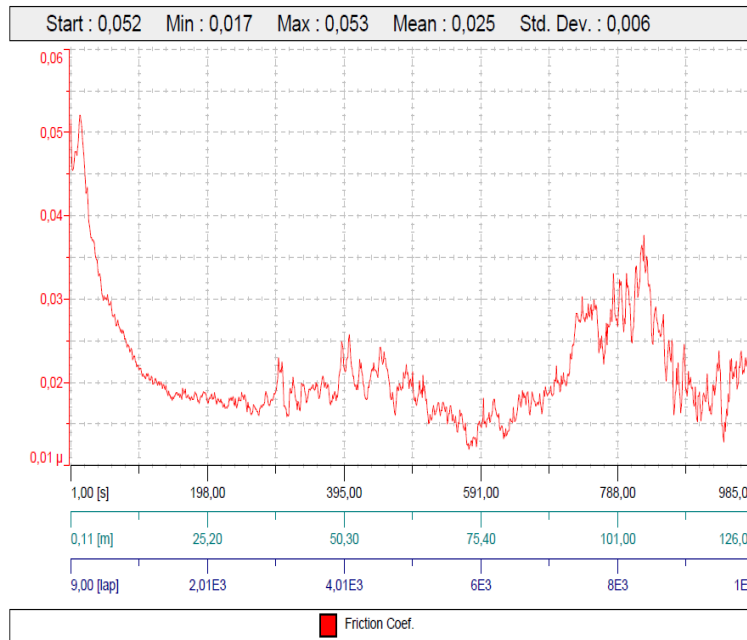


Figura 25 Grafica del coeficiente de fricción arrojada por el tribómetro

3.4 *Medición de la huella de desgaste*

En la Figura 26, se muestra un diagrama a bloques del procedimiento general para la medición de la huella de desgaste producida por el tribómetro sobre las piezas y el cálculo del volumen perdido de cada una de ellas.

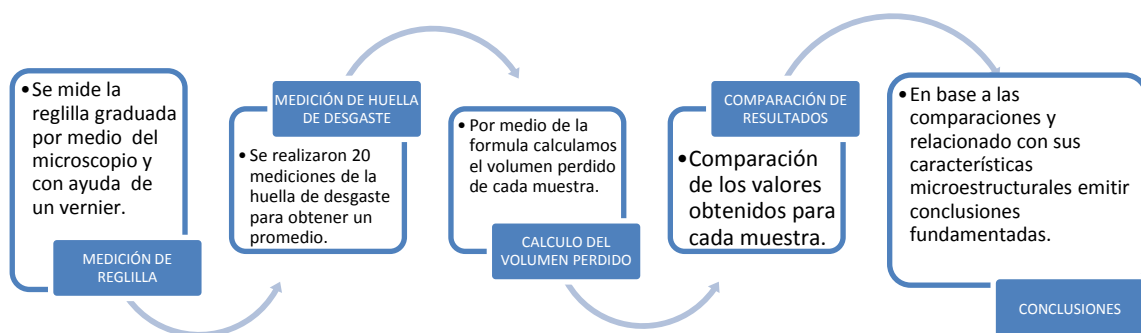


Figura 26 diagrama a bloques del proceso de medición de la huella de desgaste

3.4.1 Proceso de medición de la huella de desgaste

Para realizar la medición de la huella de desgaste, medimos la reglilla graduada por medio del microscopio y de un vernier, para determinar la equivalencia que tiene la medición realizada en el monitor del microscopio a un incremento de 50X, con una medida en micras. Se mide la distancia que existe entre 2 líneas de graduación mayor que equivale a 200 micras (0.2 mm.), como se muestra en la Figura 27, la cual es igual a 22 mm. medidos en la pantalla del microscopio con el vernier, por lo que un milímetro medido en la pantalla equivale a 9.09 micras (9.09×10^{-3} mm.).

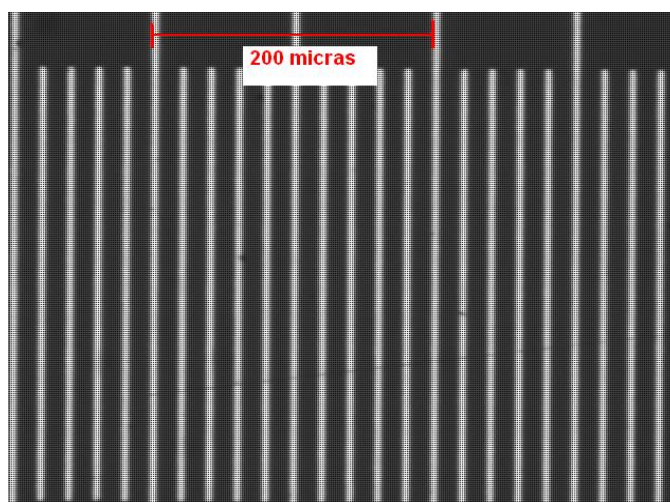


Figura 27 Imagen de la reglilla graduada captada por medio del microscopio

Posteriormente se realiza la medición de huella de desgaste de cada muestra, para lo cual se sigue el mismo proceso que en la medición de la reglilla. Se tomaran 20 medidas por cada huella, ya que presenta ligera variación en base al posicionamiento, debida a la vibración que se presenta durante la prueba o a posible desbalance en la muestra, se calcula un promedio de estas medidas para facilitar el experimento.

Se tomaron 5 medidas en cada cuadrante del círculo descrito por el pin al final de la prueba tribológica, como se muestra en la Figura 28.

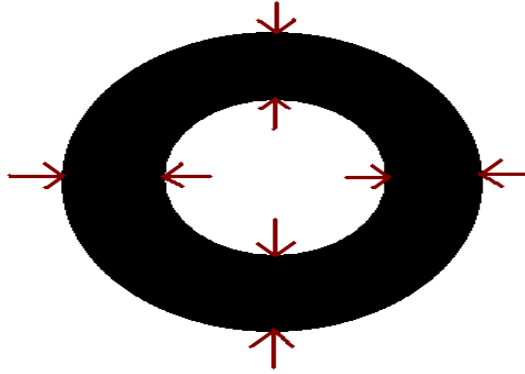


Figura 28 Esquema de la medición de ancho de huella de desgaste en los cuadrantes del círculo

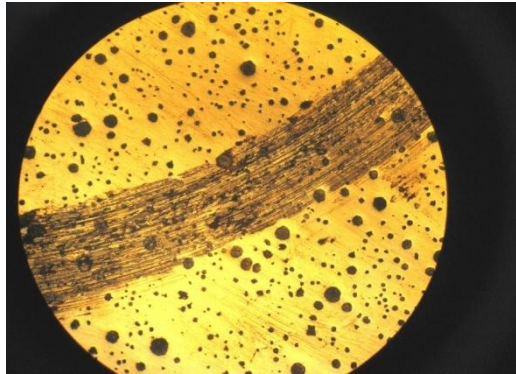


Figura 29 Huella de desgaste

Para el cálculo del volumen perdido en cada muestra se emplea la formula 2 proporcionada en la norma ASTM G 99-05.

Posteriormente se compararan los resultados obtenidos de cada muestra, para determinar que muestra presenta una mayor pérdida de volumen lo cual nos indica una mayor susceptibilidad al desgaste. En base a las comparaciones y relacionado con sus características microestructurales podremos emitir conclusiones fundamentadas.

3.5 Uso del software imágenes

Para realizar la caracterización de los nódulos de grafito de cada sección de la pieza, se emplea el programa imágenes desarrollado en la UAQ, campus San

Juan del Río, por el Dr. Luis Alberto Morales. Por medio del cual se cuantifican las características de los nódulos de cada sección de la pieza para poder compararlas entre ellas. Dentro de las características que se obtendrán se encuentran la compacidad, el porcentaje de grafito, la nodularidad, la granulometría, y se calcula la densidad nodular.

Para el huso del programa se abre una imagen de los nódulos a examinar dando clic en la barra superior de la pantalla en el comando archivo, "Open BMP image". Como se muestra en la Figura 30.

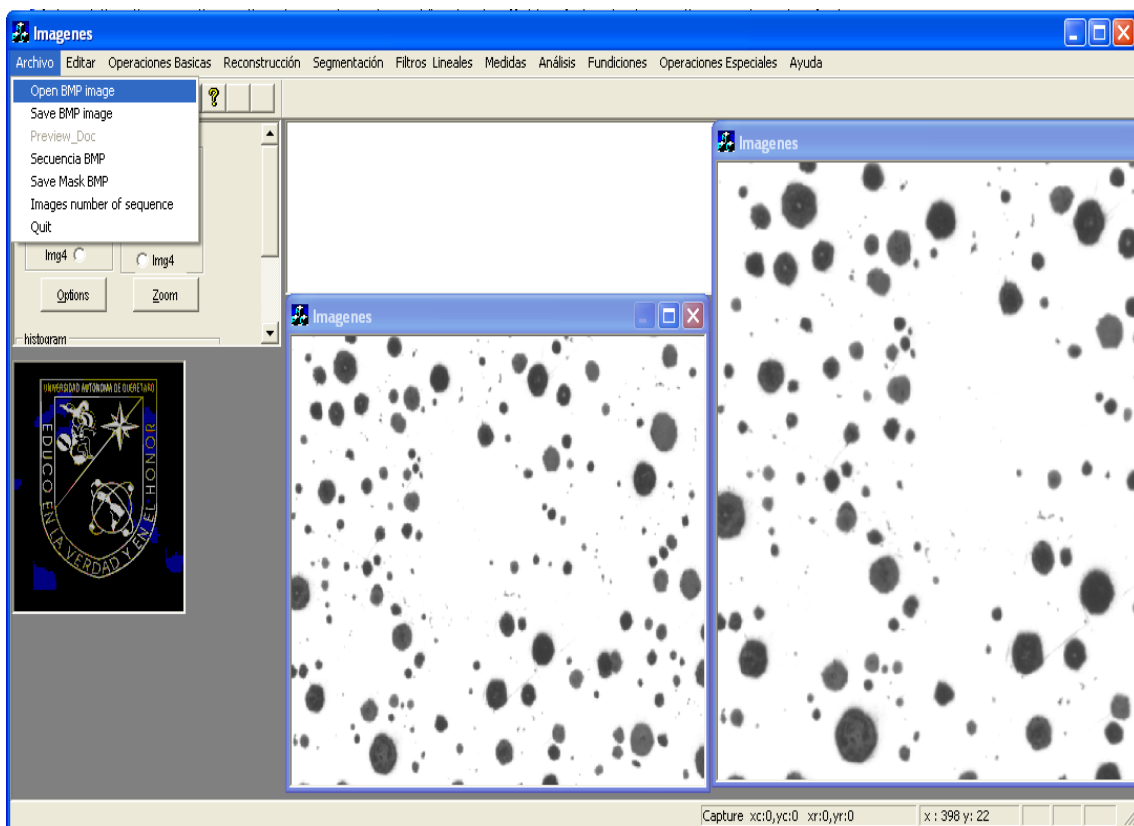


Figura 30 Pantalla principal del programa imágenes.

Posteriormente, en la misma barra dando clic en la opción análisis despliega la lista de opciones para las caracterizaciones nodulares que se pueden calcular.

Para calcular la nodularidad se utilizó el método propuesto en Morales-Hernández (2009), se da clic en la barra superior en la opción análisis, "Nodularidad", como se muestra en la Figura 31.

El valor de la nodularidad arrojado por el programa es un porcentaje referido a la circularidad de los nódulos analizados, es decir, que porcentaje de las partículas analizadas se puede considerar como nódulo, se calcula de la siguiente manera:

$N = \frac{N_i}{P_a} * 100$	(3)
-----------------------------	-----

Donde N es la nodularidad de la muestra, N_i los nódulos circulares de la muestra y P_a son las partículas totales de la muestra

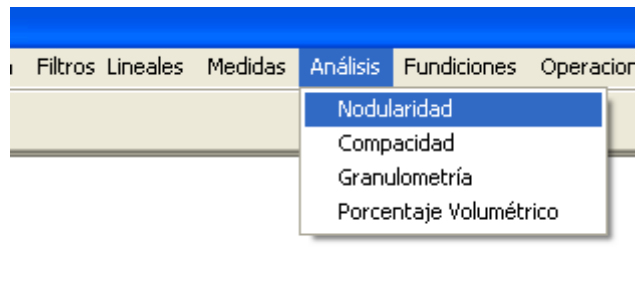


Figura 31 Comando Nodularidad.

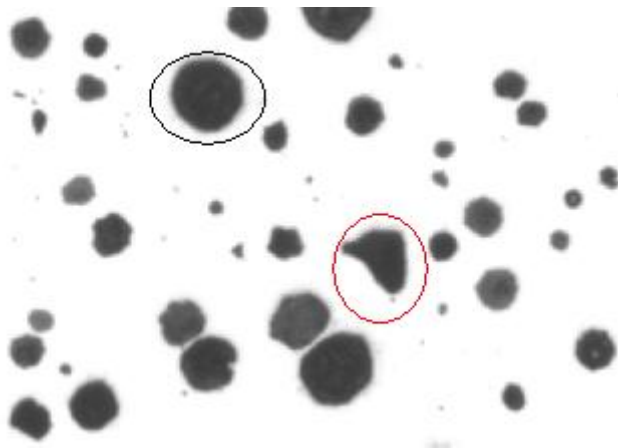


Figura 32 Partículas con diferentes nodularidades.

Para calcular la compacidad, se utilizó el método propuesto en Morales-Hernández (2009), se da clic en la barra superior en la opción análisis, "Compacidad", como se muestra en la Figura 34.

La compacidad es la distancia de separación que existe entre los nódulos de grafito analizados, el tamaño está determinado por un elemento estructural formado por una longitud en pixeles. Este tamaño estructural está determinado mediante la siguiente fórmula:

$TAMAÑO\ DEL\ ELEMENTO\ ESTRUCTURAL = (2\lambda + 1) * (2\lambda + 1)$	(4)
--	-----

Se convirtió el valor de tamaño estructural en pixeles a una medida en micro metros o micras, lo cual se realiza por medio de la rejilla graduada que tiene un valor de 0.1 mm entre líneas grandes de graduación como se observa en la Figura 33 y que para una amplificación de 100 X tiene 132 pixeles por lo que un pixel equivale a 0.00075757 mm. y que multiplicado por el tamaño de elemento estructural determina la medida en μm (micras).

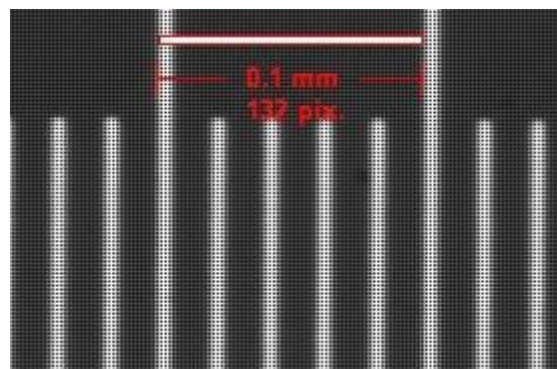


Figura 33 Medida de la rejilla graduada en mm y en pixeles.

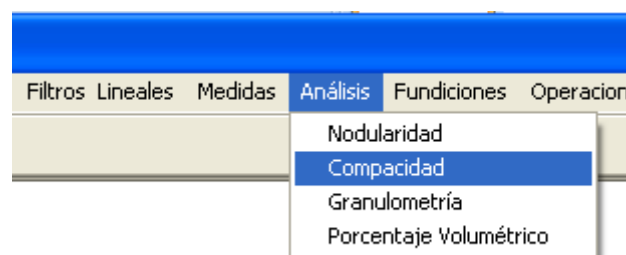


Figura 34 Comando Compacidad.

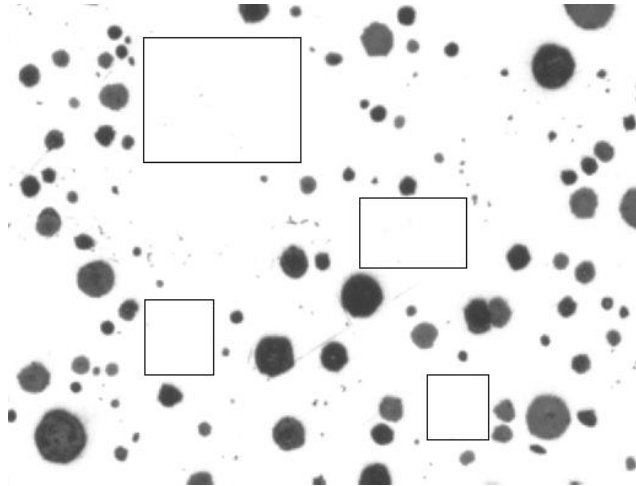


Figura 35 Diferentes niveles de compacidad.

Para calcular la granulometría, se utilizó el método propuesto en Morales-Hernández (2009), se da clic en la barra superior en la opción análisis, “Granulometría”, como se muestra en la Figura 36.

La granulometría es un valor referido al tamaño de los nódulos de grafito analizados este tamaño también está determinado por el mismo elemento estructural empleado en la “Compacidad”.

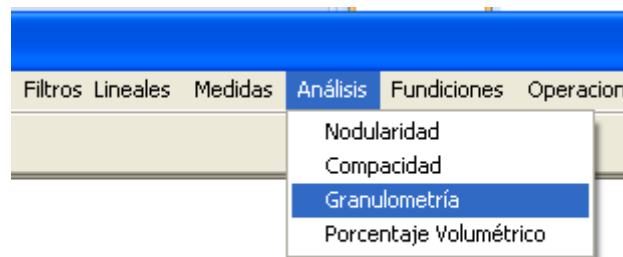


Figura 36 Comando Granulometría.

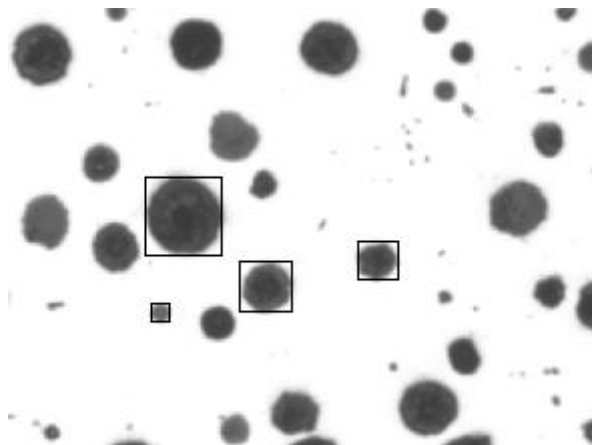


Figura 37 Diferentes tamaños de nódulos.

Para calcular el porcentaje de grafito, se da clic en la barra superior en la opción análisis, “Porcentaje Volumétrico”, como se muestra en la Figura 38.

El porcentaje de grafito, es el porcentaje de área que ocupan las partículas de grafito dentro del área total examinada de cada sección, para realizar esta medición se consideraron todas las partículas oscuras como grafito y las secciones claras como matriz, con un umbral de 0 a 206 niveles de gris, ya que con esta intensidad no aparecieron nuevas partículas de grafito ni se segmentaron las existentes, el porcentaje de grafito se calcula por medio de la siguiente fórmula:

$\% G = \frac{A_n}{A_t} * 100$	(5)
--------------------------------	-----

De donde % G. es el porcentaje de grafito, A_n es el área ocupada por los nódulos y A_t es el área total examinada.

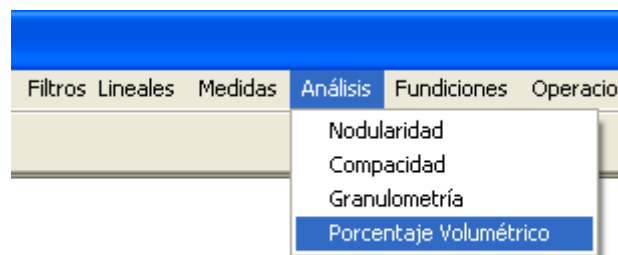


Figura 38 Comando Porcentaje Volumétrico.

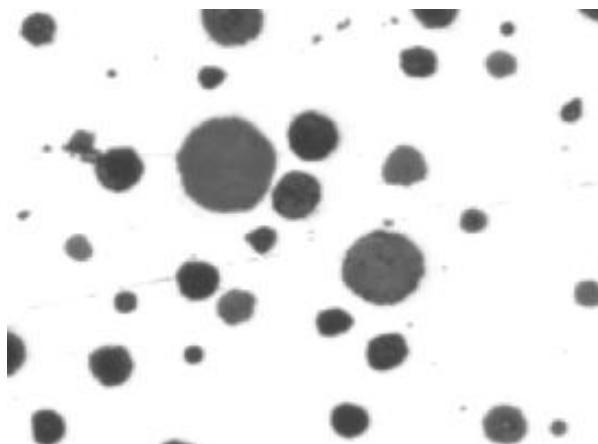


Figura 39 Partículas de grafito en negro y matriz en blanco

La densidad nodular, se calcula a partir de los resultados obtenidos mediante la fórmula:

$\delta_n = \frac{Ni}{At}$	(6)
----------------------------	-----

Donde δ_n es la densidad nodular, Ni es la cantidad de nódulos y At el área total.

Los resultados del análisis de las imágenes son graficados para su fácil comparación e interpretación.

4.1 *Análisis microestructural*

En la Figura 40 se muestran las zonas del seccionamiento de la pieza, basado en su variación de espesores.

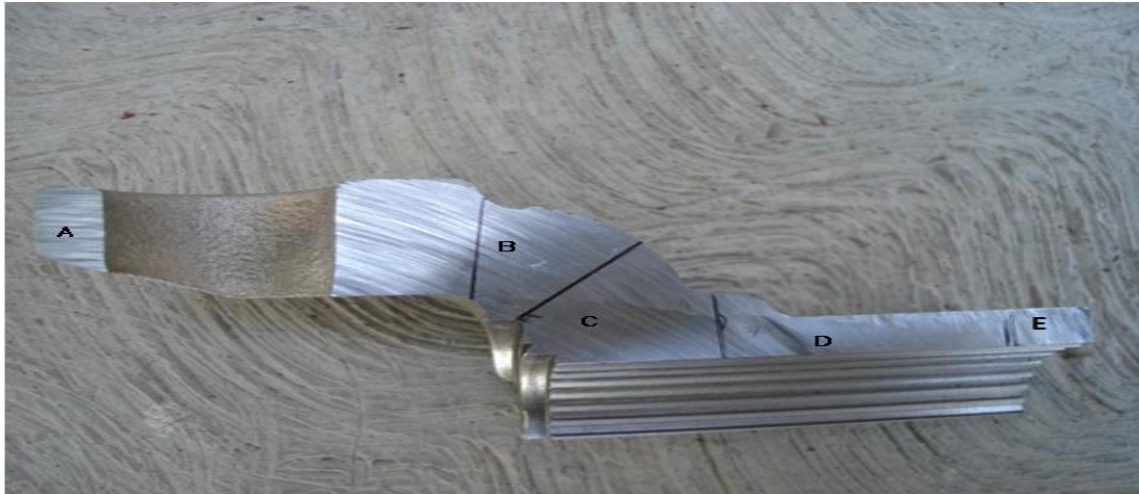


Figura 40 Seccionamiento de la pieza.

A continuación, en la Figura 41, se muestra el número de imágenes tomadas para cada sección, algunos nódulos y la conformación característica que presentan cada sección de la pieza. Debido a la variedad de tamaños de los nódulos de grafito en cada sección, se tuvo que variar la cantidad de imágenes tomadas para cada sección, para cumplir con la condición de analizar entre 2000 y 2500 nódulos por sección.

SECCIÓN A 26 imágenes	SECCIÓN B 38 imágenes	SECCIÓN C 37 imágenes	SECCIÓN D 48 imágenes	SECCIÓN E 46 imágenes

Figura 41 Imágenes características de cada muestra y numero de imágenes tomadas de cada una.

4.2 Resultados de procesamiento de imágenes

4.2.1 Características microestructurales

4.2.1.1 Nodularidad

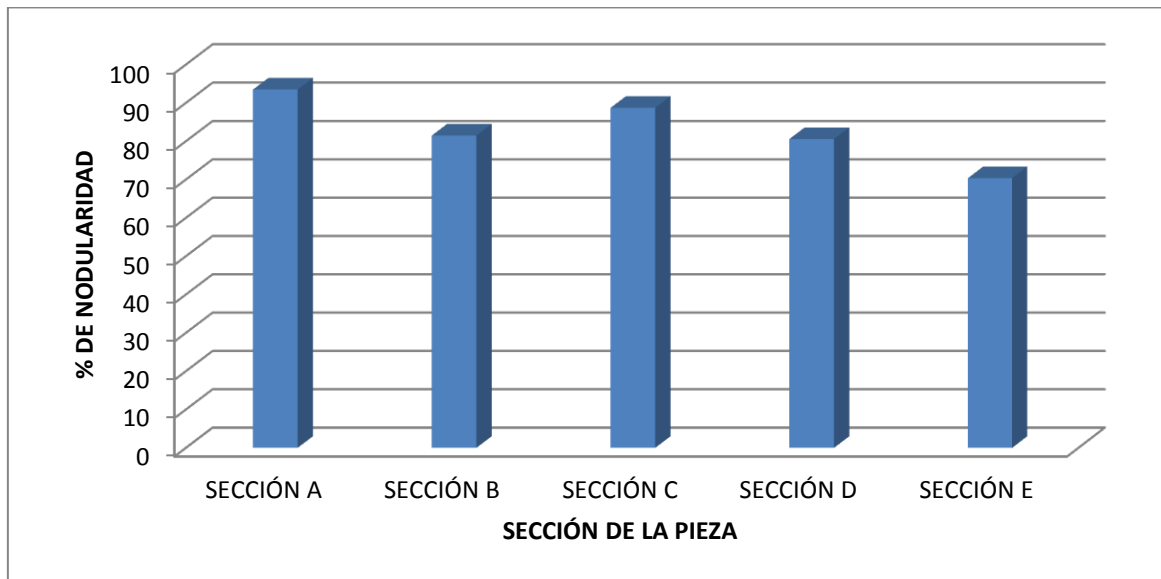


Figura 42 Grafica de nodularidad de las muestras.

Tabla 5 Tabla de valores de nodularidad de las muestras.

NODULARIDAD SECCIÓN A	NODULARIDAD SECCIÓN B	NODULARIDAD SECCIÓN C	NODULARIDAD SECCIÓN D	NODULARIDAD SECCIÓN E
93.46%	81.47%	88.70%	80.56%	70.36%

En la Tabla 5 se encuentra el valor de nodularidad para cada sección de la pieza, se puede observar que la sección A presenta el valor más alto de nodularidad mientras que el valor más bajo lo presenta la sección E.

4.2.1.2 Compacidad

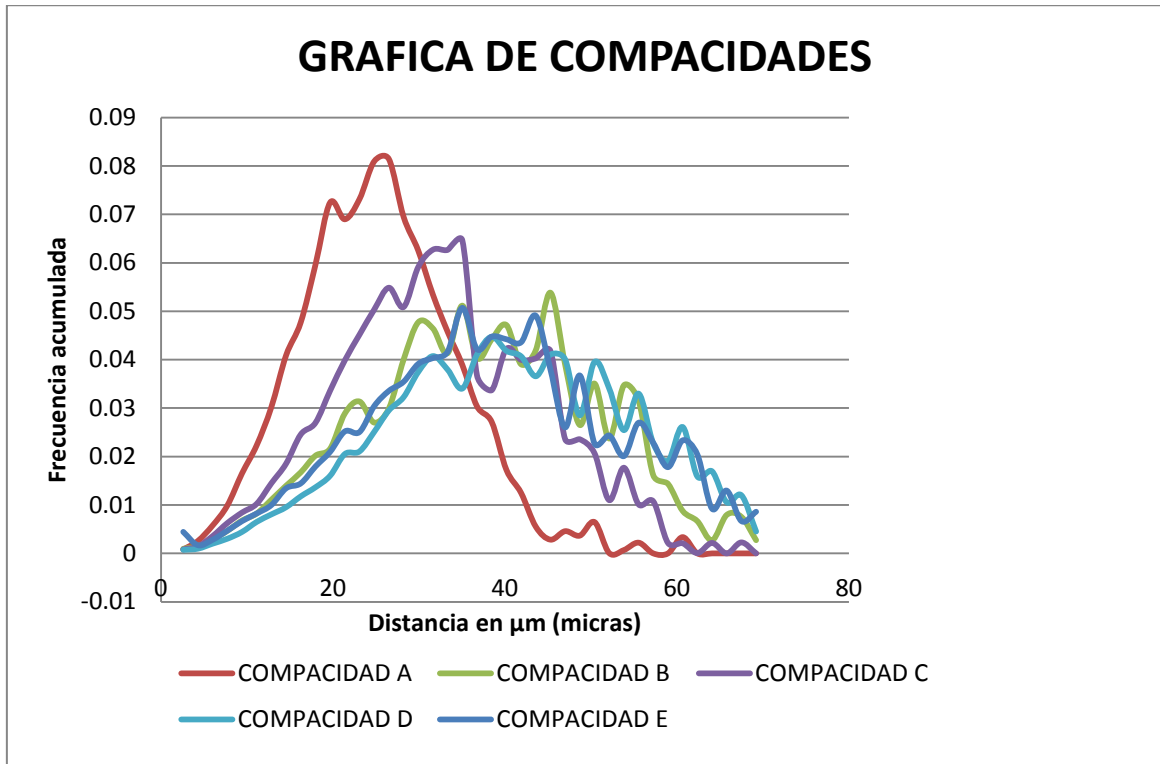


Figura 43 Grafica de compacidad de las muestras

4.2.1.3 Granulometría

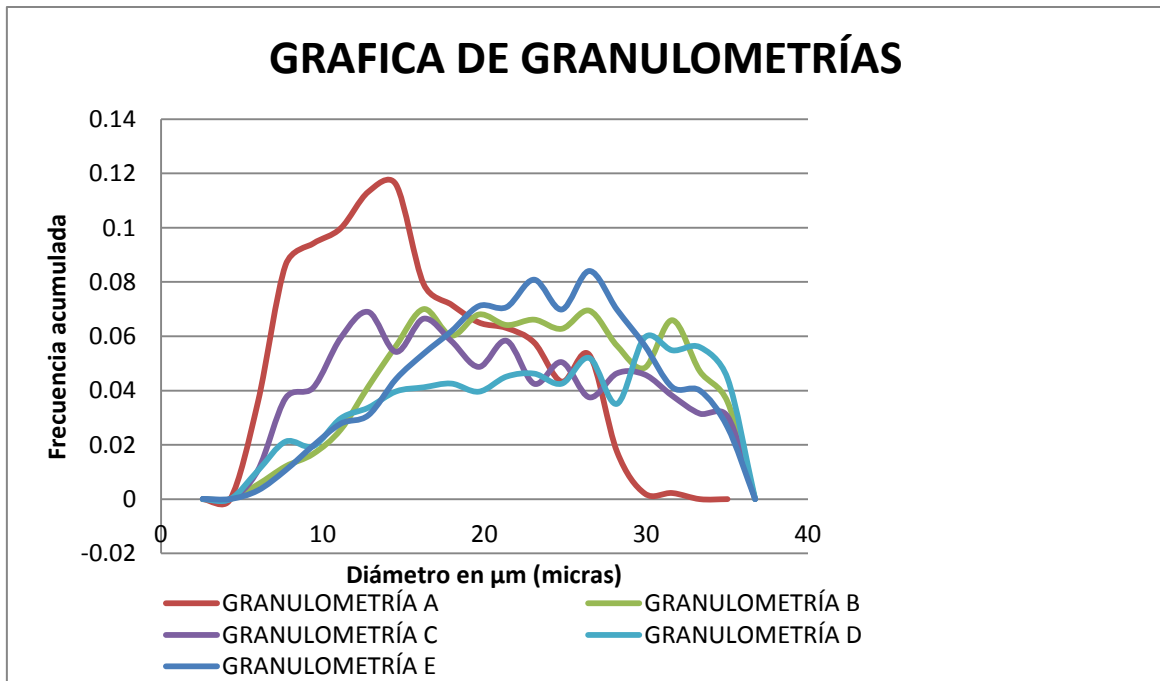


Figura 44 Grafica de granulometría de las muestras

4.2.1.4 Porcentaje de grafito

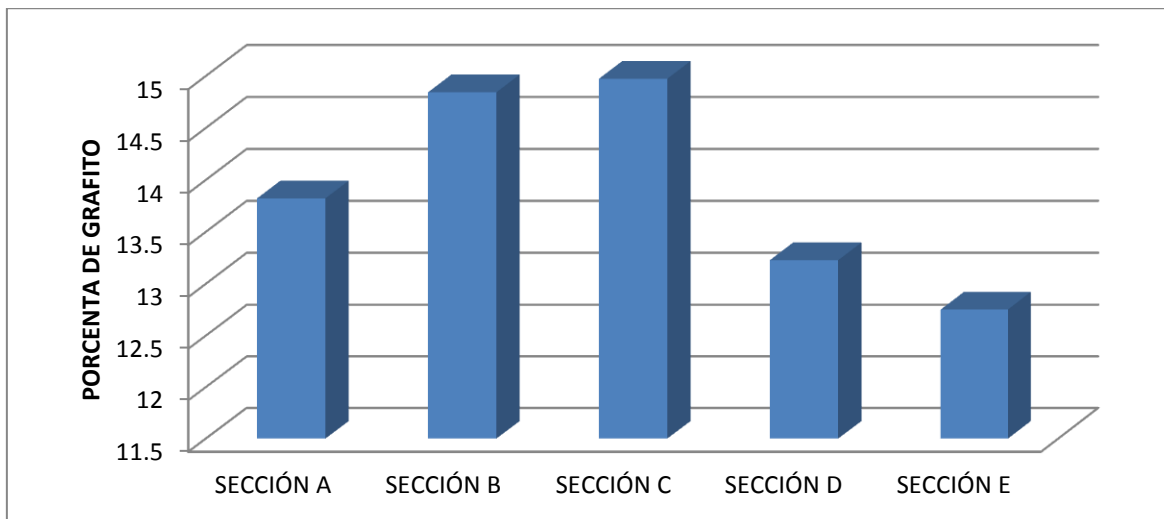


Figura 45 Grafica de porcentaje de grafito de las muestras.

Tabla 6 Tabla de valores de porcentaje de grafito de las muestras.

SECCIÓN A	SECCIÓN B	SECCIÓN C	SECCIÓN D	SECCIÓN E
13.82%	14.84%	14.97%	13.22%	12.75%

En la Tabla 6 se encuentra el valor de el porcentaje de grafito, para cada sección de la pieza, se puede observar que las secciones C y A presentan el valor más alto respectivamente de porcentaje de grafito, mientras que el valor más bajo lo presenta la sección E, cabe mencionar que estos valores son muy similares debido a que todas las secciones al ser parte de una misma pieza estas tienen la misma composición química, es decir, la misma cantidad de grafito y de matriz, la única variante es la conformación de los nódulos debido a su variación de espesor y enfriamiento.

4.2.1.5 Densidad nodular

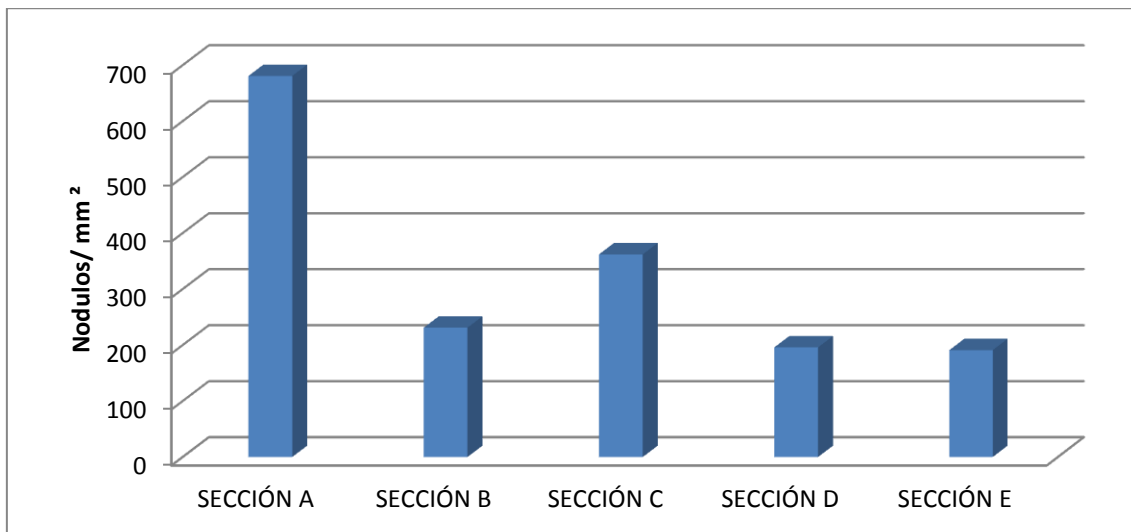


Figura 46 Grafica de la densidad nodular de las muestras.

Tabla 7 Tabla de los valores de densidad nodular de cada muestra.

SECCIÓN A	SECCIÓN B	SECCIÓN C	SECCIÓN D	SECCIÓN E
680.72 nod/mm²	231.01 nod/mm²	361.94 nod/mm²	195.78 nod/mm²	190.95 nod/mm²

En la Tabla 7 se encuentra el valor de la densidad nodular para cada sección de la pieza, se puede observar que la sección A presenta el valor más alto de densidad nodular, mientras que el valor más bajo lo presentan las secciones D y E.

4.3 Volumen perdido

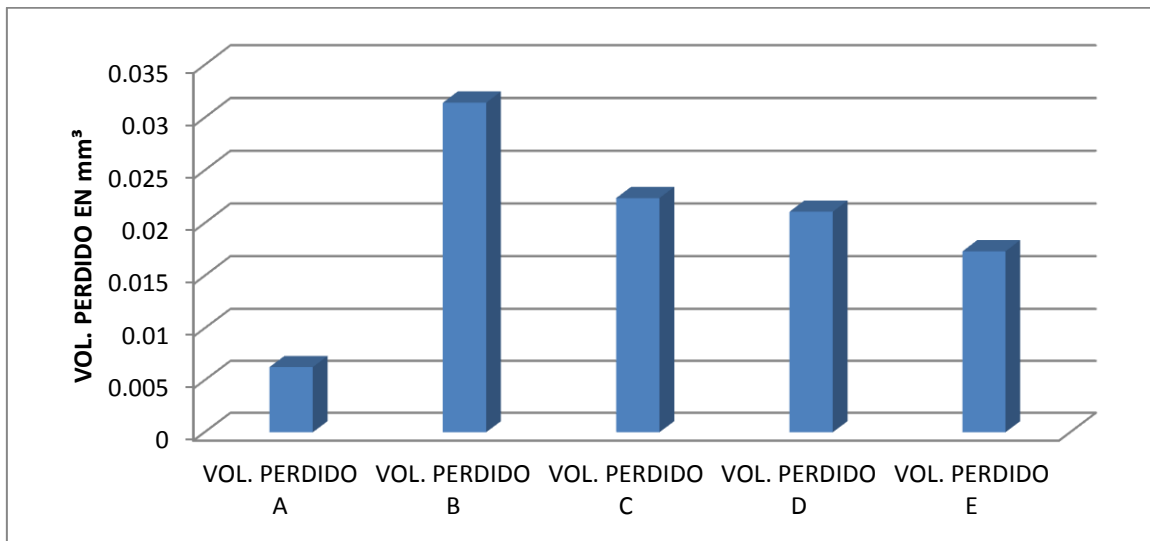


Figura 47 Grafica de volumen perdido para cada muestra.

Tabla 8 Tabla de valores de volumen perdido para cada muestra.

VOL. PERDIDO A	VOL. PERDIDO B	VOL. PERDIDO C	VOL. PERDIDO D	VOL. PERDIDO E
0.006 mm³	0.031 mm³	0.022 mm³	0.021 mm³	0.017 mm³

En la Tabla 8 se encuentra el valor el volumen perdido, para cada sección de la pieza, se puede observar que la sección A y E presentan los valores más bajos de pérdida de volumen, mientras que las secciones B, C y D presentan valores más altos de pérdida de volumen respectivamente con valores de poca variación.

4.4 Graficas de coeficiente de fricción.

A continuación se realiza la discusión de los resultados de las graficas de coeficiente de fricción.

Sección A

La Figura 48 muestra que la prueba tiene un comportamiento que refleja un constante incremento en la lubricación y que mantiene una ligera estabilidad casi al final de la prueba, para posteriormente comenzar a perder lubricación. Se puede concluir que al inicio de la prueba existe un desgaste por adherencia, provocado por la carga aplicada, al desplazamiento unidireccional y a que los picos de ambas superficies fluyen plásticamente y el esfuerzo aumenta para poder romper las uniones que rápidamente es atenuado por las propiedades lubricantes de los nódulos de grafito por lo que los residuos de material no influyen de manera significativa en el desgaste.

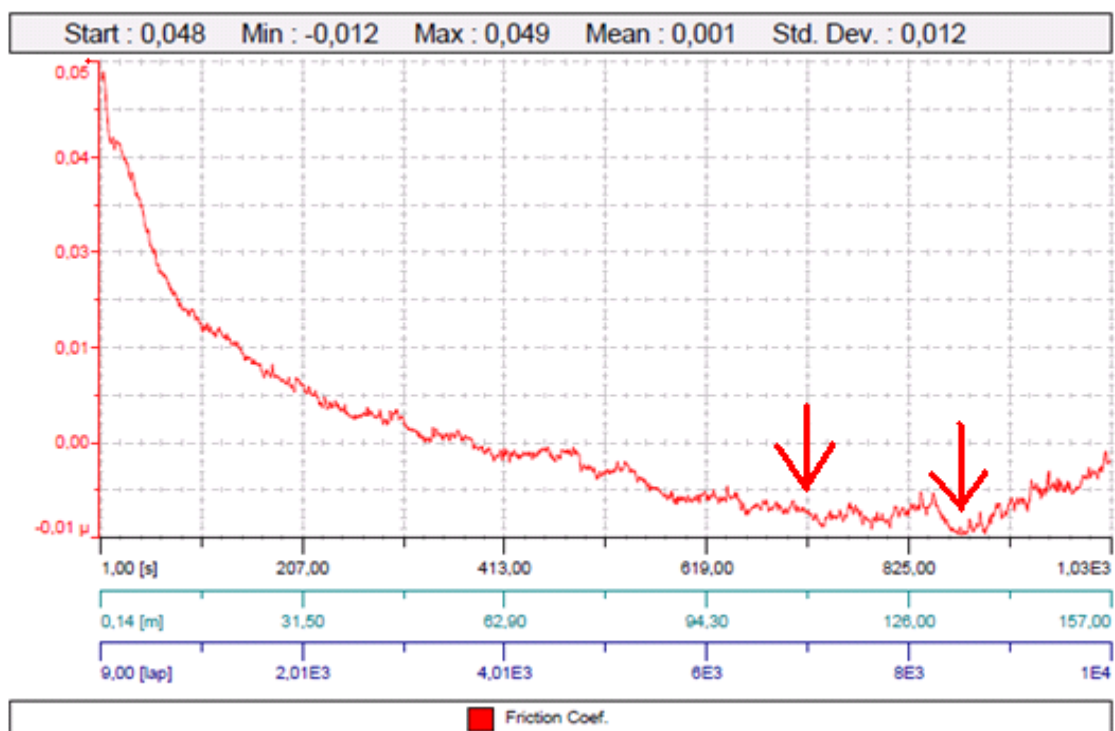


Figura 48 Grafica de coeficiente de fricción pieza A

En la Tabla 9 se muestran cambios considerables presentados en el valor del coeficiente de fricción y la distancia a la que se presentan estos cambios para cada prueba de la sección A

Tabla 9 Tabla de de pruebas tribológicas muestra A

Radio	Cambios considerables
2 mm	2000 laps (25.2 m)
2.5 mm	7000 y 8500 laps (110 y 133.75 m)

Sección B

En la Figura 49 se observa un valor del coeficiente de fricción constante y posteriormente presenta una disminución de lubricación aproximadamente a la mitad de la prueba (5000 laps), lo cual nos describe una lubricación constante al principio de la prueba y posteriormente una pérdida progresiva de lubricación. Se puede concluir que al inicio de la prueba existe un desgaste por adherencia, provocado por la carga aplicada, al desplazamiento unidireccional cambiando casi de inmediato por desgaste por abrasión debido a las partículas desprendidas por el desgaste por adherencia y que es muy ligera o nulamente inhibido por la propiedades lubricante de los nódulos de grafito, muy probablemente esta combinado con desgaste por ludimiento, provocado por vibración entre las dos partes el cual se reflejo con ruido durante las pruebas.

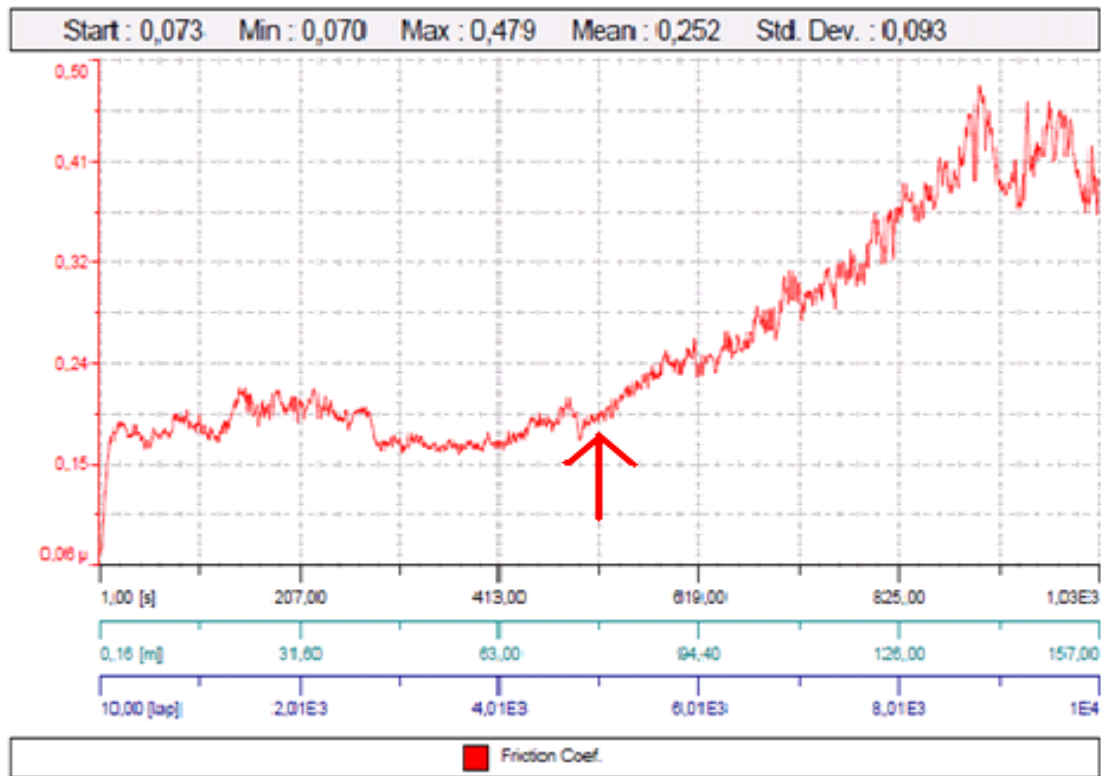


Figura 49 Grafica del coeficiente de fricción pieza B

En la Tabla 10 se muestran cambios considerables presentados en el valor del coeficiente de fricción y la distancia a la que se presentan estos cambios para cada prueba de la sección B

Tabla 10 Tabla de de pruebas tribológicas muestra B.

Radio	Cambios considerables
2.5 mm	500 laps (79 m)
3 mm	400 laps (75.5 m)

Sección C

La grafica de la Figura 50 muestra una estabilidad en los primeros 4500 laps y posteriormente una constante perdida de lubricación. De esto se puede concluir que al inicio de la prueba existe un desgaste por adherencia, provocado por la carga aplicada, el desplazamiento unidireccional, cambiando casi de inmediato por desgaste por abrasión, debido a las partículas desprendidas por el

desgaste por adherencia y que es muy ligera o nulamente inhibido por la propiedades lubricante de los nódulos de grafito, muy probablemente esta combinado con desgaste provocado por vibración entre las dos partes el cual se reflejo con ruido durante las pruebas.

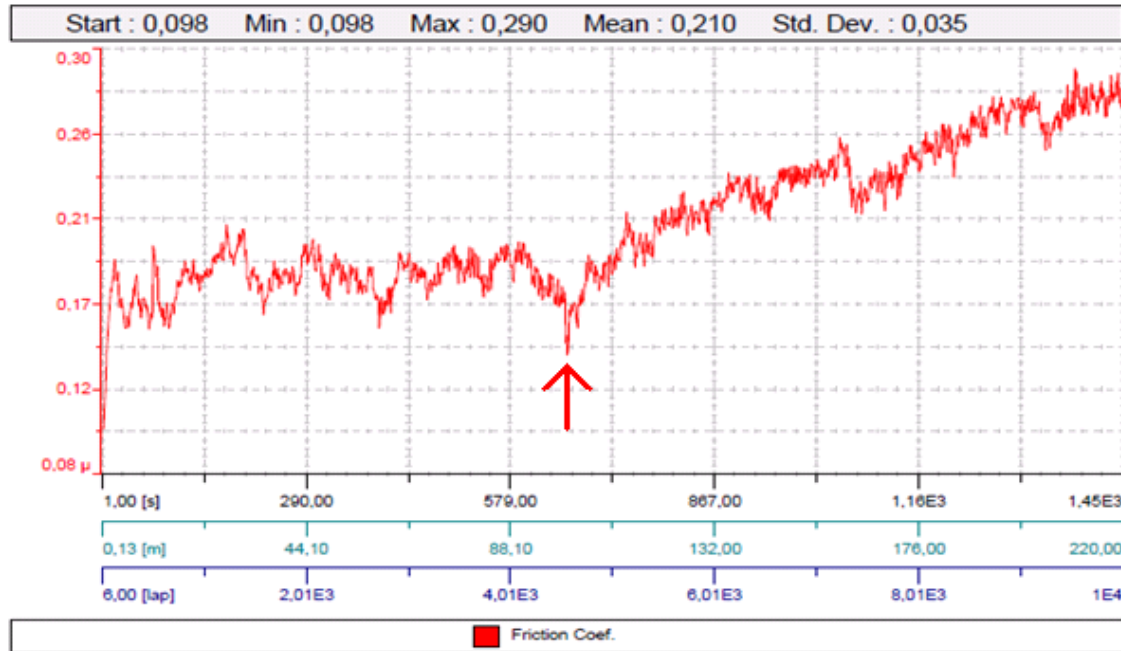


Figura 50 Grafica de coeficiente de fricción pieza C

En la Tabla 11 se muestran cambios considerables presentados en el valor del coeficiente de fricción y la distancia a la que se presentan estos cambios para cada prueba de la sección C

Tabla 11 Tabla de de pruebas tribológicas muestra C

Radio	Cambios considerables
1.5 mm	2000 laps (18.9 m)
3.5 mm	4500 laps (99 m)
4.5 mm	2000 laps (56.7 m)

Sección D

La grafica de la Figura 51 presenta un comportamiento con un incremento en el coeficiente de fricción al comenzar la prueba, que nos indica una progresiva pérdida de lubricación a partir de los 1000 laps. Se puede concluir que al inicio de la prueba existe un desgaste por adherencia, provocado por la carga aplicada y al desplazamiento unidireccional, cambiando casi de inmediato por desgaste por abrasión, debido a las partículas desprendidas por el desgaste por adherencia y que es muy ligera o nulamente inhibido por la propiedades lubricante de los nódulos de grafito, muy probablemente esta combinado con desgaste por ludimiento provocado por vibración entre las dos partes el cual se reflejo con ruido durante las pruebas.

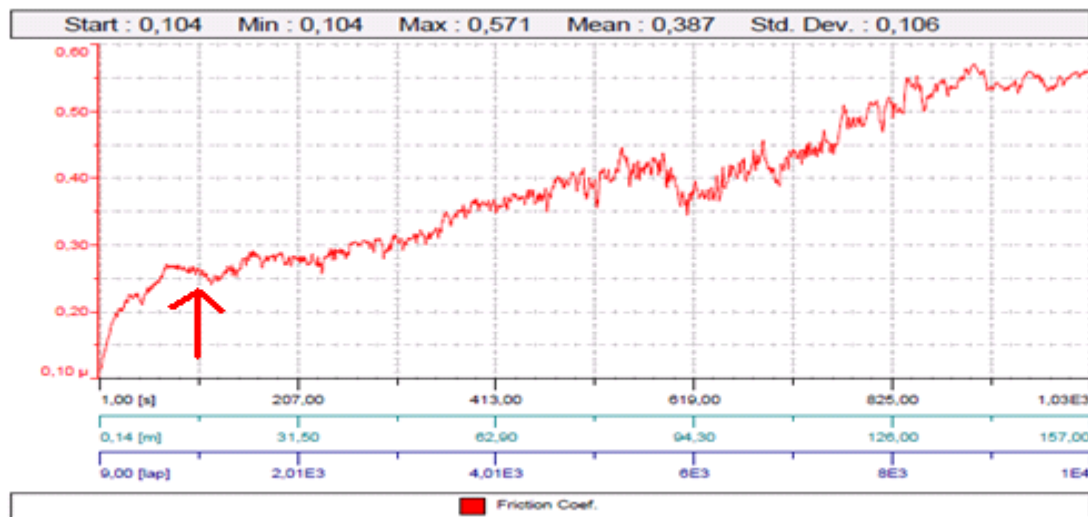


Figura 51 Grafica de coeficiente de fricción pieza D

En la Tabla 12 se muestran cambios considerables presentados en el valor del coeficiente de fricción y la distancia a la que se presentan estos cambios para cada prueba de la sección D

Tabla 12 Tabla de de pruebas tribológicas muestra D

Radio	Cambios considerables
1.5 mm	1000 laps (9.45 m)
2 mm	1000 laps (12.5 m)
2.5 mm	1000 laps (15.75 m)

Sección E

En la Figura 52 se observa un inicio muy regular y posteriormente una caída del valor del coeficiente de fricción, lo que nos indica un inicio de lubricación constante y posteriormente una estabilización en los valores de coeficiente de fricción. Se puede concluir que en la prueba existe un desgaste por adherencia, provocado por la carga aplicada y al desplazamiento unidireccional y a que los picos de ambas superficies fluyen plásticamente y el esfuerzo aumenta para poder romper las uniones que rápidamente es atenuado por las propiedades lubricantes de los nódulos de grafito.

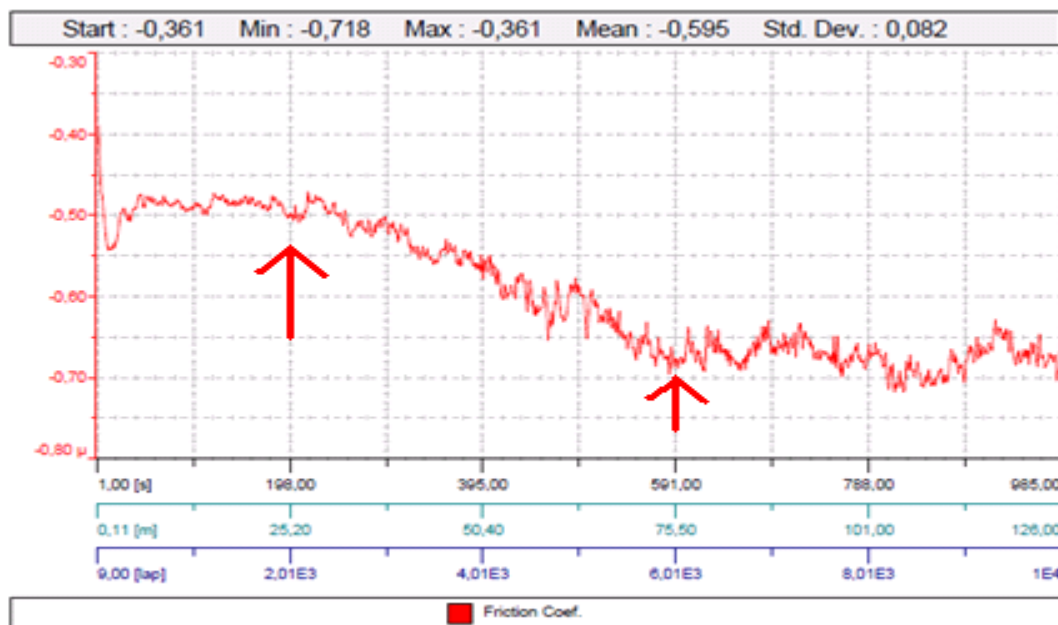


Figura 52 Grafica de coeficiente de fricción pieza E

En la Tabla 13 se muestran cambios considerables presentados en el valor del coeficiente de fricción y la distancia a la que se presentan estos cambios para cada prueba de la sección E

Tabla 13 Tabla de de pruebas tribológicas muestra E

Radio	Cambios considerables
1.3 mm	S/C

2 mm	2000 y 6000laps (12.5 y 75.5 m)
3 mm	1000 laps (15.75 m)

A continuación se presenta una comparación realizada entre las graficas del coeficiente de fricción de cada muestra.

La Figura 48 y 52 correspondientes a las graficas de las muestras A y E tienen comportamientos similares con un incremento progresivo en la lubricación y con tendencia a estabilizarse con un valor constante de coeficiente de fricción a la mitad de la prueba; cabe mencionar que de igual modo son los que menos perdida de volumen tuvieron por lo que son mejores inhibidores del desgaste.

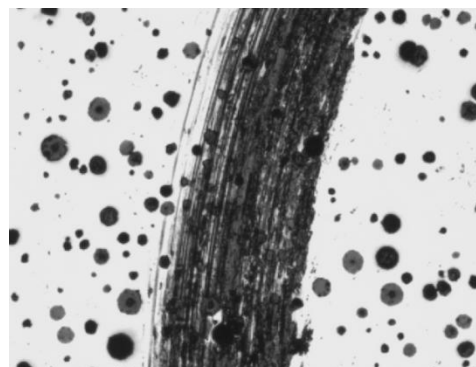
Las Figuras 49, 50 y 51 correspondientes a las graficas de las piezas restantes B, C Y D, tienen tendencias muy similares con comportamientos considerablemente estables al inicio de las pruebas y con una curva creciente del coeficiente de fricción lo que indica una progresiva pérdida de lubricación.

4.5 Análisis del volumen perdido

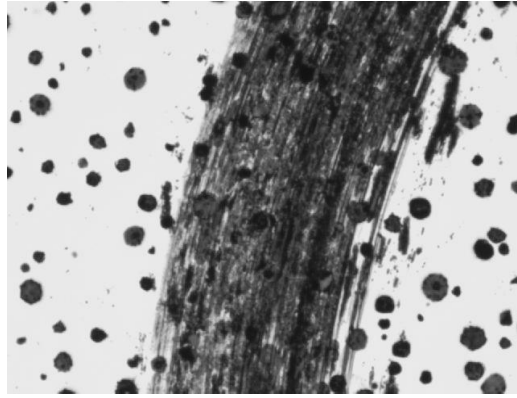
En la Figura 53 se muestran imágenes de la huella de desgaste para 3000, 6000 y 9000 laps de recorrido con un incremento de 100X.



(a)



(b)



(c)

**Figura 53 (a) Ancho de huella de desgaste a 3000 laps con incremento de 100X
(b) Ancho de huella de desgaste a 6000 laps con incremento de 100X (c) Ancho de huella de desgaste a 9000 laps con incremento de 100X**

Se realizaron pruebas de desgaste para las piezas A y E con un pin de acero 8620 de 6 mm de diámetro y un radio de desgaste de 2.5 mm de radio y sujeto a 6000 vueltas o laps, para estas pruebas se pesaron las muestras previo a la prueba de desgaste realizada en el tribómetro y posteriormente se pesan nuevamente para ver la pérdida de masa al concluir las vueltas.

Obteniendo una variación de peso de 4 y 7 miligramos de peso entre los valores tomados antes de la prueba de desgaste y los tomados posteriormente. Estos valores no son considerables para nuestro experimento, debido a que están dentro del rango límite de medición de la báscula que fue empleada. Es más adecuado para pruebas hechas con tribómetros más grandes y con mayores cargas aplicables, en los cuales las pérdidas de masa sean mucho más grandes y variadas.

Por medio de estas pruebas se pudo corroborar la ventaja de emplear la fórmula presentada por la norma ASTM G99 – 05. En la cual se calcula el volumen perdido en la prueba basado en el ancho de la huella de desgaste.

Con la finalidad de tener evidencia de el modo en el que se desarrolla el desgaste en la pieza, se realizo una prueba más en las secciones A y E, que fueron las que presentaron menor desgaste y por ende mejor lubricación, por lo cual se realizaron las pruebas de 15,000 laps de recorrido, con paros cada 3,000 laps, con un pin de 6 mm de diámetro, una carga de 2 Newtons y un radio de huella de desgaste de 1.5 mm.

A continuación se muestran los resultados de dichas pruebas para la sección A:

La Figura 54 muestra la tendencia del volumen perdido durante la prueba tribológica en cada paro para la sección A. Observándose tendencia prácticamente lineal en la perdida de volumen durante el desarrollo de la prueba.

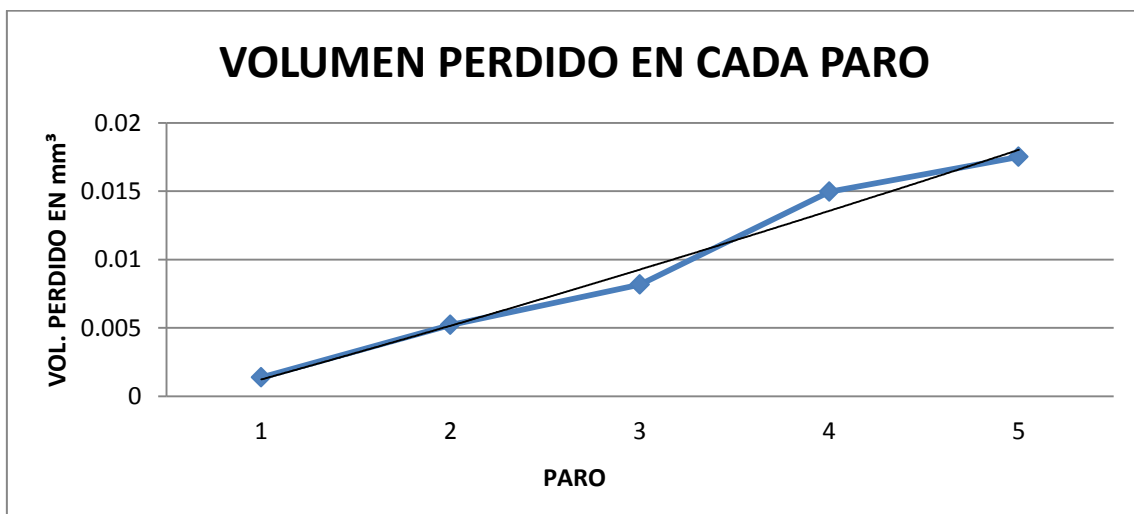


Figura 54 Grafica de volumen perdido para cada paro

En la Tabla 14 se encuentran los valores de pérdida de volumen para cada paro de la prueba tribológica.

Tabla 14 Valor del volumen perdido para cada paro

VOL. PERDIDO PARO 1	VOL. PERDIDO PARO 2	VOL. PERDIDO PARO 3	VOL. PERDIDO PARO 4	VOL. PERDIDO PARO 5
0.0013 mm³	0.0052 mm³	0.0081 mm³	0.0149 mm³	0.0175 mm³

Se calculo la tasa de desgaste para cada paro realizado durante la prueba tribológica, dividiendo el volumen perdido entre la distancia recorrida, el resultado esta dado en mm³ perdidos por metro recorrido. En la Figura 55 se observa el valor de la tasa de desgaste para cada paro.

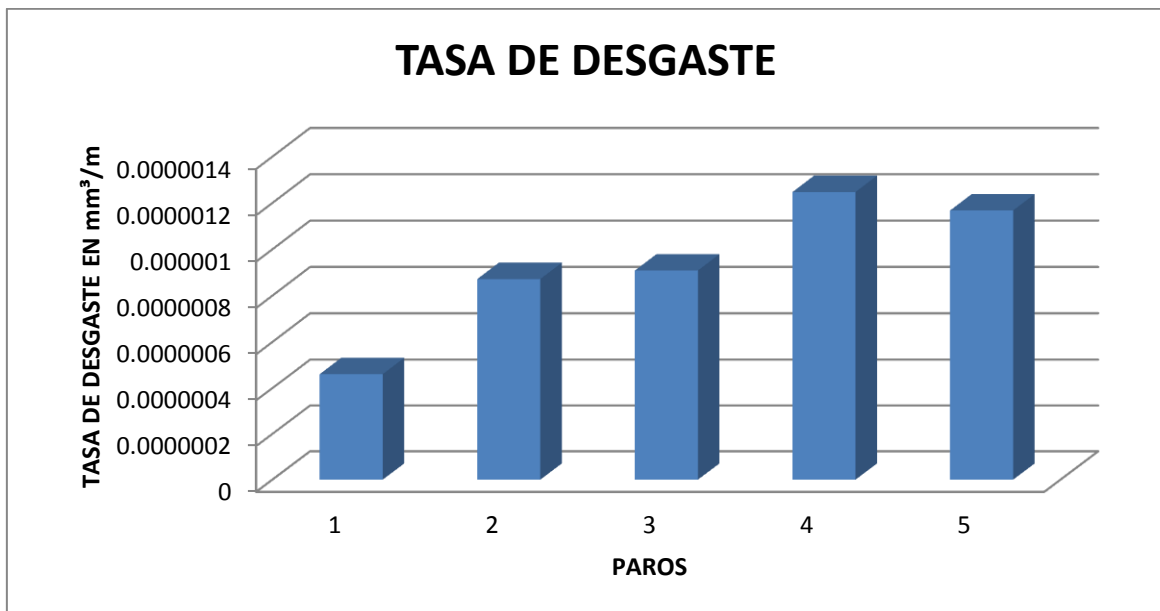


Figura 55 Grafica de la tasa de desgaste para cada paro

En la Tabla 15 se encuentran los valores de tasa de desgaste para cada paro realizado durante la prueba tribológica.

Tabla 15 Valores de tasa de desgaste para cada paro

TASA DE DESGASTE PARO 1	TASA DE DESGASTE PARO 2	TASA DE DESGASTE PARO 3	TASA DE DESGASTE PARO 4	TASA DE DESGASTE PARO 5
4.61×10^{-7} mm ³ /m	8.71×10^{-7} mm ³ /m	9.08×10^{-7} mm ³ /m	1.24×10^{-6} mm ³ /m	1.16×10^{-6} mm ³ /m

La Figura 56 muestra una grafica circular de la tasa de desgaste en un valor de porcentaje para tener una comparación más evidente de estos valores.

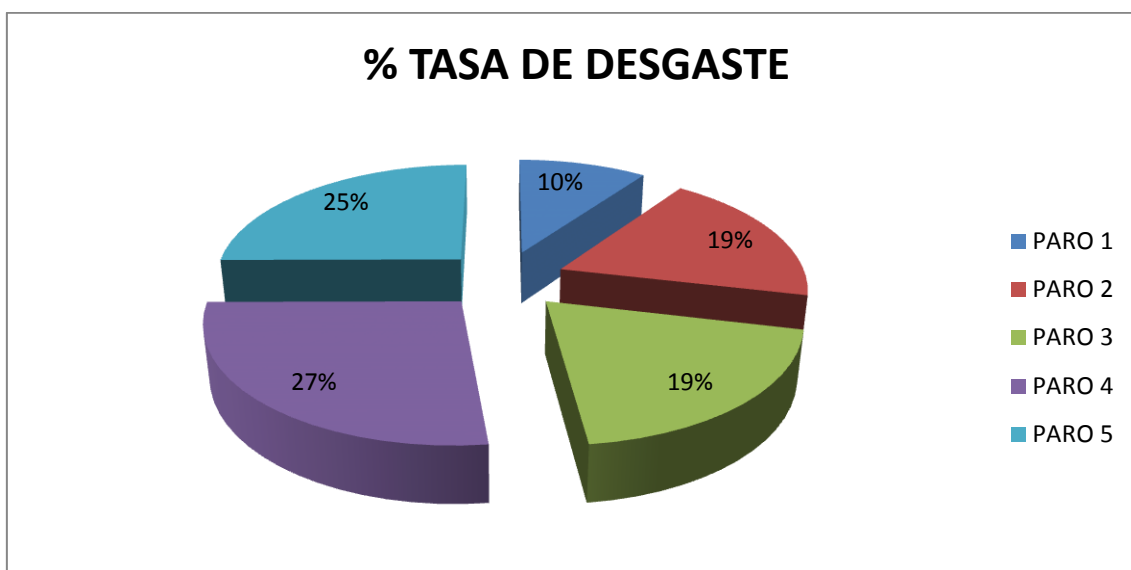


Figura 56 Grafica de porcentaje de tasa de desgaste para cada paro

En la Figura 57 se observa la grafica del coeficiente de fricción de la prueba tribológica de la sección A con paros, se puede observar la relación que tiene con la tasa de desgaste, ya que para el paro 1 que es el valor más pequeño con un 10% se observa un coeficiente de fricción muy estable, para los paros 2 y 3, que tienen valores iguales con un 19% se observan comportamientos muy similares en la grafica con un ligero incremento gradual de coeficiente de fricción, para el caso del paro 4 que es el valor más alto de tasa de desgaste con un 27%, se observa que el coeficiente de fricción aumenta rápidamente

durante el tiempo que transcurre hasta llegar al próximo paro, para el paro 5 que tiene un valor del 25% de tasa de desgaste se observa un aumento pequeño de coeficiente de fricción al principio de la prueba y que se estabiliza a la mitad de la prueba, para mantenerse estable hasta el final de esta.

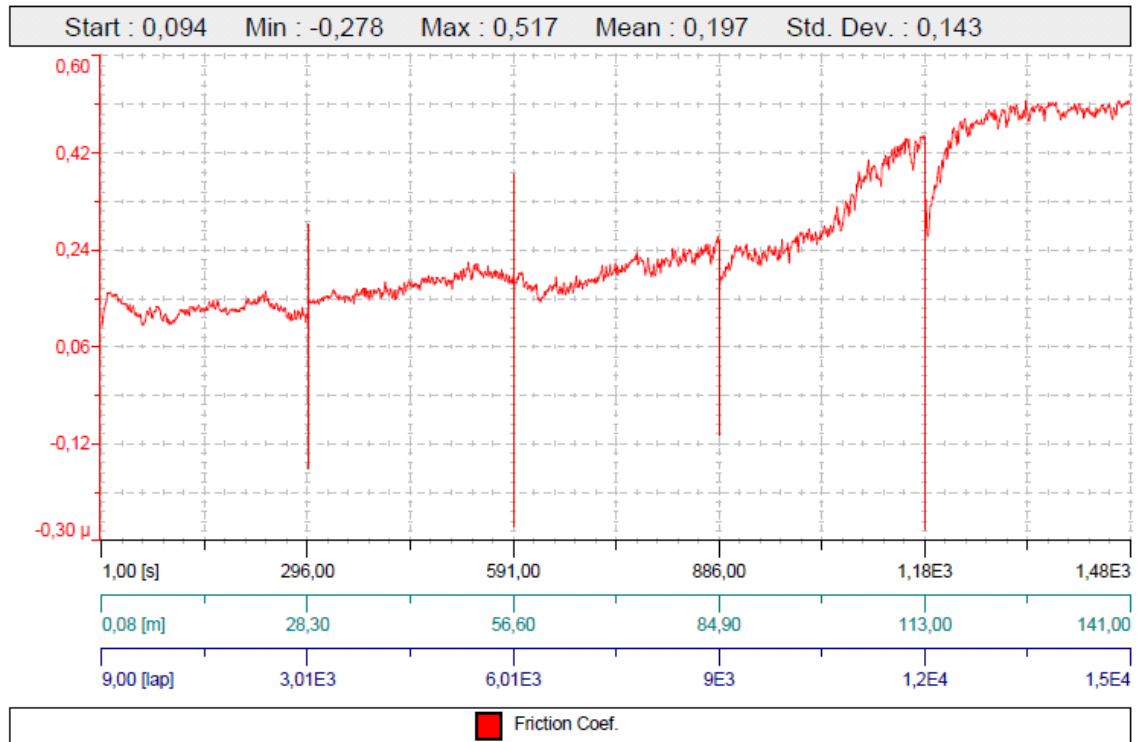


Figura 57 Grafica de coeficiente de fricción de la prueba tribológica de la sección A con paros

A continuación se muestran los resultados de dichas pruebas para la sección E:

La Figura 58 muestra la tendencia del volumen perdido durante la prueba tribológica en cada paro para la sección E. Observándose nuevamente una tendencia prácticamente lineal en la pérdida de volumen durante el desarrollo de la prueba.

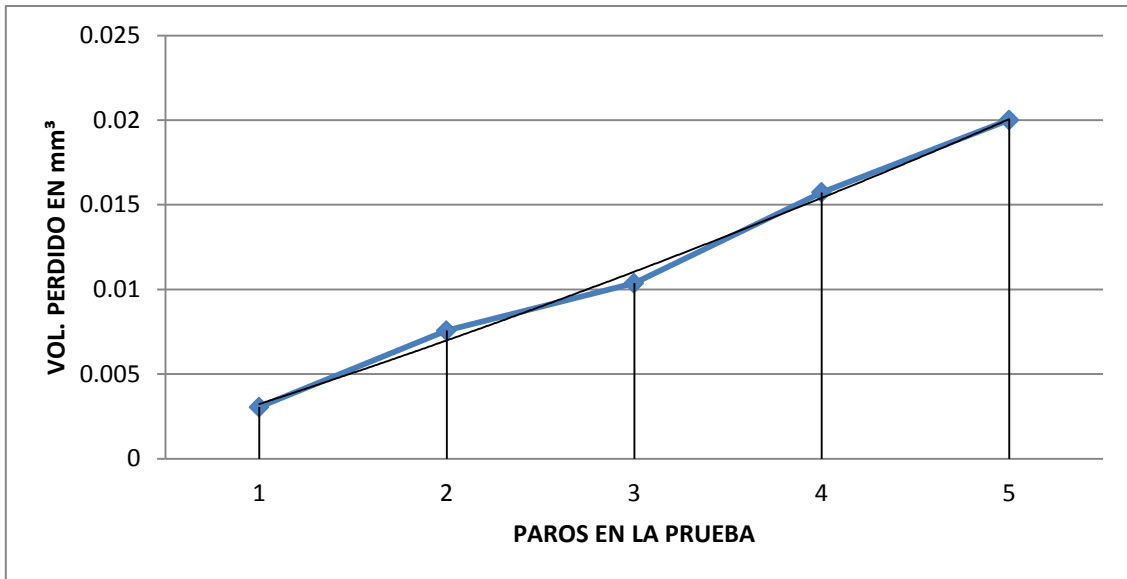


Figura 58 Grafica de volumen perdido para cada paro

En la Tabla 16 se encuentran los valores de pérdida de volumen para cada paro de la prueba tribológica.

Tabla 16 Valor del volumen perdido para cada paro

VOL. PERDIDO PARO 1	VOL. PERDIDO PARO 1	VOL. PERDIDO PARO 1	VOL. PERDIDO PARO 1	VOL. PERDIDO PARO 1
0.00305 mm³	0.007572 mm³	0.01037 mm³	0.015729 mm³	0.020011 mm³

Se calculo la tasa de desgaste para cada paro realizado durante la prueba tribológica, dividiendo el volumen perdido entre la distancia recorrida, el resultado esta dado en mm³ perdidos por metro recorrido. En la Figura 59 se observa el valor de la tasa de desgaste para cada paro.

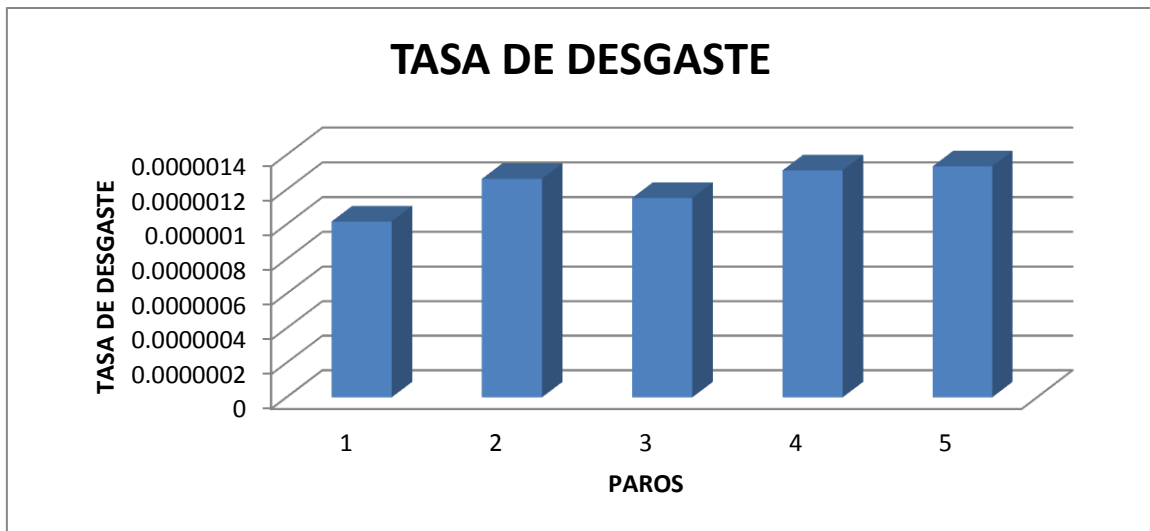


Figura 59 Grafica de la tasa de desgaste para cada paro

En la Tabla 17 se encuentran los valores de tasa de desgaste para cada paro realizado durante la prueba tribológica

Tabla 17 Valores de tasa de desgaste para cada paro

TASA DE DESGASTE PARO 1	TASA DE DESGASTE PARO 1	TASA DE DESGASTE PARO 1	TASA DE DESGASTE PARO 1	TASA DE DESGASTE PARO 1
1.01667E-06	1.262E-06	1.15222E-06	1.31075E-06	1.33407E-06
mm³/m	mm³/m	mm³/m	mm³/m	mm³/m

La Figura 60 muestra una grafica circular de la tasa de desgaste en un valor de porcentaje para tener una comparación más evidente de estos valores.

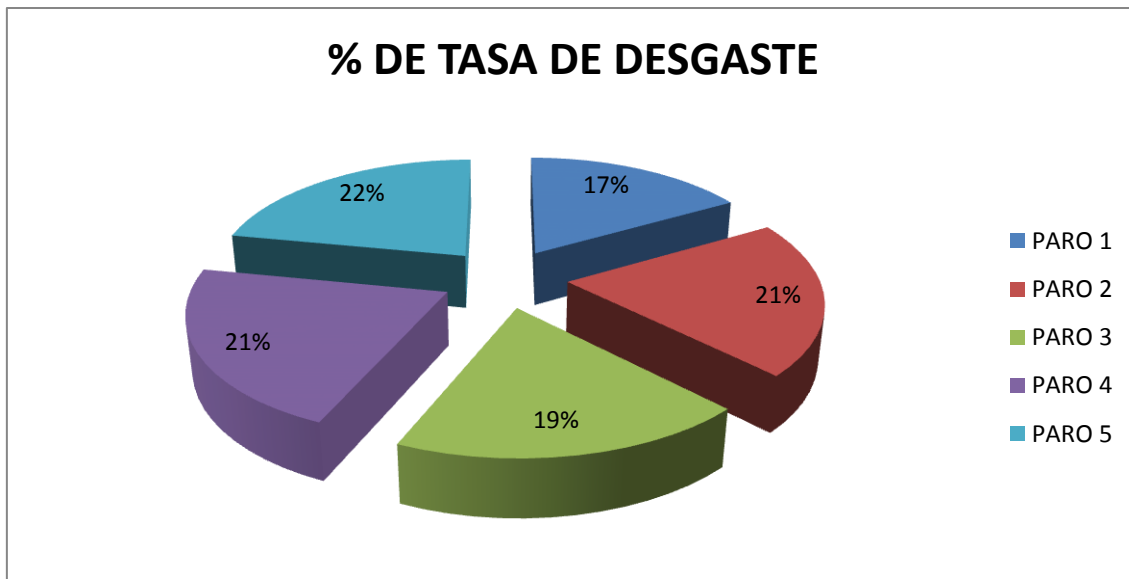


Figura 60 Grafica de porcentaje de tasa de desgaste para cada paro

En la Figura 61 se observa la grafica del coeficiente de fricción de la prueba tribológica de la sección E con paros, se puede observar nuevamente la relación que tiene con la tasa de desgaste, ya que para el paro 1 que es el valor más pequeño con un 17%, se observa un coeficiente de fricción estable con una pequeña descendencia al inicio, para el paro 2, se tiene un valor de 21% se observa en la grafica con un ligero incremento gradual de coeficiente de fricción, para el caso del paro 3 que presenta un valor de 19% se observa un comportamiento estable en el coeficiente de fricción, para el paro 4, que tiene un valor de 21% continua la estabilidad del coeficiente de fricción, de ahí la similitud del valor con el del paro 3, para el paro 5, que tiene un valor de 22% se observa una estabilidad al principio y a la mitad del recorrido un decremento de valor de coeficiente de fricción.

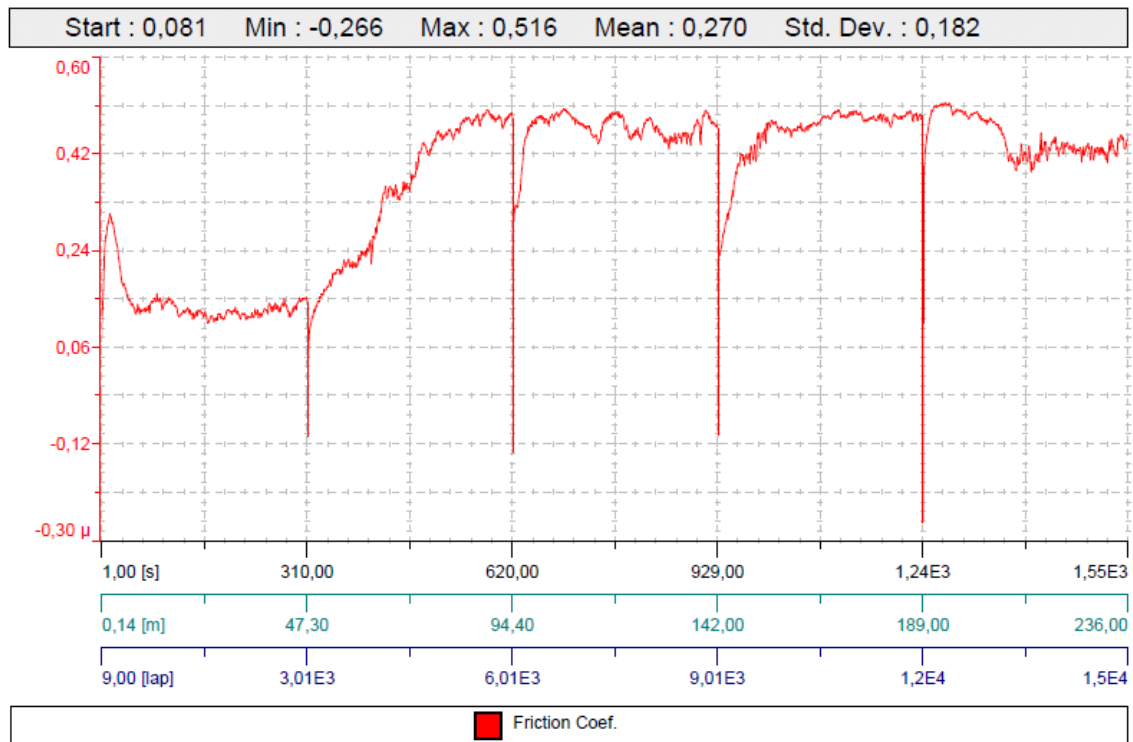


Figura 61 Grafica de coeficiente de fricción de la prueba tribológica de la sección E con paros

4.6 Resumen de resultados

Tabla 18 Tabla de resultados

PIEZA	NODULARIDAD	% DE GRAFITO	DENSIDAD NODULAR	VOL. PERDIDO
A	93.46%	13.82%	680.72 nod/mm ²	0.0062 mm ³
B	81.47 %	14.84%	231.01 nod/mm ²	0.0314 mm ³
C	88.70 %	14.97%	361.94 nod/mm ²	0.0314 mm ³
D	80.56 %	13.22%	195.78 nod/mm ²	0.0210 mm ³
E	70.36 %	12.75%	190.95 nod/mm ²	0.0173 mm ³

CONCLUSIONES

Se observa que las muestras con menor pérdida de volumen son la muestra A y E, lo cual es claramente observado en la grafica del coeficiente de fricción que es muy similar entre ellas, mostrando un buen desempeño lubricante de los nódulos de grafito inhibiendo rápidamente el desgaste por adherencia, lo cual es debido a las características microestructurales de cada muestra.

Se observa que las muestras con menor pérdida de volumen son la muestra A y E, lo cual es claramente observado en la grafica del coeficiente de fricción que es muy similar entre ellas, mostrando un buen desempeño lubricante de los nódulos de grafito inhibiendo rápidamente el desgaste por adherencia.

La menor pérdida de volumen se presento en la sección A que es la que tiene espacios más pequeños entre sus nódulos y que a su vez presenta una mejor nodularidad en comparación con las otras secciones. Posterior a estos resultados el mejor comportamiento de inhibición de desgaste es el presentado en las secciones con un valor alto de porcentaje volumétrico. Siendo la única excepción la sección A que por el contrario presenta el valor más bajo de porcentaje de grafito lo cual es compensado por una buena nodularidad y una distribución de nódulos más compacta; lo cual reafirma lo expuesto por Acosta (2000) que comprobó que el incremento de propiedades mecánicas y de resistencia al desgaste por deslizamiento es resultado de incrementar el contenido de carburo. Y lo concluido por Hatate (2001) que observo que la disminución en nódulos de grafito resulta en un aumento significativo en la pérdida de desgaste total. Debido a que la cantidad de grafito determina la variación de estas dos propiedades.

Esto también nos puede llevar a considerar una tendencia de los nódulos muy grandes a comportarse de manera similar a los nódulos pequeños y con poca separación entre ellos, siendo los nódulos pequeños los que presentan mejor inhibición del desgaste.

Comparando los resultados obtenidos podemos observar que la granulometría es proporcional a una buena nodularidad, lo que es provocado muy probablemente, a que las partículas pequeñas presentan una mejor circularidad que las grandes, que son formadas por la agrupación de muchas de ellas, tal vez provocando un agrupamiento cargado en determinadas posiciones del nódulo que se está formando.

Al aumentar el tamaño de los nódulos, estos reducen en cantidad, lo que refleja un proceso de agrupamiento o unión de los nódulos pequeños cercanos a medida que se enfría la fundición, lo cual fue expuesto por Borrajo y Martínez (2000), quienes concluyeron que reduciendo el tiempo de solidificación aumenta notablemente el conteo nodular de la fundición esferoidal.

Las fundiciones presentan una tendencia a nódulos grandes en la parte central, lo que nos refleja un retardo en el enfriamiento de esta sección de la fundición, por lo que sería recomendable desarrollar una técnica que permita un enfriamiento uniforme en la fundición y a su vez características microestructurales uniformes.

En base a que las secciones con menor pérdida de volumen son la A y E, se tiene que las demás secciones no tienen mucha diferencia en cuanto al volumen perdido entre ellas, se concluye que las características más adecuadas para una buena inhibición de desgaste son: una buena densidad nodular, un valor de granulometría pequeño, es decir, nódulos pequeños y de buena nodularidad de poca separación entre ellos (compacidad pequeña).

La caracterización de las secciones de la pieza, mediante el procesamiento de imágenes permite comparaciones más detalladas y precisas de lo que se puede hacer con los métodos convencionales, por lo que el programa imágenes fue una herramienta fundamental para este proceso y la obtención de resultados confiables.

BIBLIOGRAFÍA

Acosta Esqueda M. A., Martínez Madrid M., López J. A. “El tratamiento de los hierros nodulares en el mejoramiento de los materiales en la industria automotriz”, Publicación Técnica No. 148 Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila, Qro., México, 2000

Askeland, “Ciencia e ingeniería de los materiales”, Edit International Thomson Editores, S. A. de C. V. 2008

ASTM G99 - 05 Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus. American Society of Testing and Materials.

Borrajo J. M., Martínez R. A., Boeri R.E. y Sikora J.A. “Predicción del conteo nodular en fundiciones mediante el análisis de curvas de enfriamiento”, Jornadas SAM 2000 - IV Coloquio Latinoamericano de Fractura y Fatiga, Agosto de 2000, 131-138.

Cano M. f., Restrepo J. S., Ruden A., González J. M., Sequeda F., “Caracterización tribológica de recubrimientos de ti-al-n obtenidos a diferentes temperaturas de deposición por magnetron sputtering reactivo”, Memorias de congreso noviembre de 2010, Chile

Design Engineer’s Digest, *A Design Engineer’s Digest of Ductile Iron*, Ninth Edition, <http://www.ductile.org/dimg/digestintro.html> (consultado en junio del 2011)

González J. L., Hallen J.M. y Cisneros M. M., “Resistencia Mecánica y a la Fatiga de Hierros Nodulares al Cu-Mo y Ni-Mo Austemperizados”, II Congreso Internacional de Materiales, Instituto Tecnológico de Saltillo, Saltillo, Coahuila., México, (1995) 58-69

Hatate M., Shiota T., Takahashi N., Shimizu K. “Influences of graphite shapes on wear characteristics of austempered cast iron” *Wear* 251 (2001) 885–889

Hernández J. V., "Caracterización mecánica, microestructural y tribológica de aceros para partes automotrices procesados por metalurgia de polvos", Tesis de Maestría, México (2008) Instituto Politécnico Nacional 2008.

Hutchings, "*Tribology: Friction and wear of engineering materials*", Edit. Great Britain, 1992. p 82-87

Morales-Hernández L. A., Manríquez-Guerrero F., Terol-Villalobos I. R., Domínguez-González A., Herrera-Ruiz G., octubre 2007 IEEE 5º Congreso Internacional en Innovación y Desarrollo Tecnológico, 10 al 12 de octubre de 2007, Cuernavaca, Morelos, México

Morales-Hernández L. A., Manríquez-Guerrero F., Terol-Villalobos I. R., Domínguez-González A., Herrera-Ruiz G., 2009 "Caracterización de nódulos de grafito usando la técnica de morfología matemática", Acta Microscópica Vol. 18, No. 2, 2009, pp. 174-184

Raymond G. Bayer*, "*Mechanical wear prediction and prevention*", Edit. Marcel Dekker, 1994. USA

Stolarski T.A. "*Tribology in Machine Design*", Edit. Industrial Press Inc. USA. 1991

Apéndice

APÉNDICE A

Medidas de ancho de huella de desgaste de las probetas, previo a utilizar la formula 2 (medidas tomadas en la pantalla del microscopio).

$$VOLUMEN PERDIDO = \frac{\Pi(Rh)(Ah)^3}{6Rb}$$

Sección A

Para 2 mm de radio	Para 2.5 mm de radio	3 mm de radio
15.88	6.31	24.71
16.29	5.08	29.09
16.09	7.24	29.77
15.18	7.67	28.55
15.69	6.18	25.06
15.55	9.15	27.66
12.82	10.26	27.37
12.75	9.21	28.26
12.78	10.41	29.17
14.22	7.04	28.17
17.33	9.29	21.85
17.15	9.38	21.18
12.95	9.26	22.06
12.35	11.45	24.17
11.17	12.04	24.73
15.75	7.52	21.92
15.35	9.36	22.33
14.21	8.23	25.43
12.32	9.63	23.53
10.66	9.89	23.59
Promedio 14.3245	Promedio 8.73	Promedio 25.43

Sección B

Para 2 mm de radio	Para 2.5 mm de radio	Para 3 mm de radio
34.99	35.59	37.14
35.42	36.76	42.67
35.43	39.07	44.11
34.69	46.94	44.56
35.8	46.83	45.72
38.12	40.64	43.81
39.79	40.26	43.74
40.03	41.05	45.16
40.72	46.68	44.4
41.23	46.66	42.55
39.96	40.09	44.46
41.35	33.38	44.44
37.55	37.48	45.57
39	34.21	45.57
38.95	34.67	48.54
36.52	34.2	47.82
44.06	47.97	40.13
40.84	46.48	39.75
39.93	40.65	38.4
40.42	41.53	41.52
Promedio 38.74	Promedio 40.557	Promedio 43.503

Sección C

Para 1.5 mm de radio	Para 3.5 mm de radio	Para 4.5 mm de radio
32.67	36.58	41.27
32.21	37.66	45.3
36.11	38.27	44.27
33.91	36.91	46.15
33.91	36.86	48.93
36.91	31.64	30.91
38.3	31.38	30.92
33.35	31.34	31.48
37.02	33.46	28.9
41.27	34.91	29.41
40.5	33.83	35.62
40.34	35.7	38.05
36.13	40.04	40.57
37.54	37.78	39.6
39.31	35.88	39.93
41.13	37.4	38.85
41.01	43.85	37.03
40	44.79	38.85
39.85	38.43	41
36.59	41.46	39.92
Promedio 37.403	Promedio 36.9085	Promedio 38.348

Sección D

Para 1.5 mm de radio	Para 2 mm de radio	Para 2.5 mm de radio
36.5	38.33	45.35
36.75	38.35	46.65
32.777	33.83	44.08
42.62	36.08	46.14
40.93	35.33	46.45
39.76	32.07	33.47
40.2	32.23	32.83
38.65	34.96	39.67
38.38	31.31	40.94
37.62	34.16	42.71
37	34.53	35.46
36.54	36.43	37.16
36.33	36.95	39.93
42.41	36.55	41.44
34.61	36.98	40.65
35.89	37.22	37.67
35.7	38.32	40.37
34.99	38.01	38.3
38.58	39.86	38.97
42.4	36.8	41.21
Promedio 37.93185	Promedio 35.915	Promedio 40.4725

Sección E

Para 2 mm de radio	Para 2.5 mm de radio	Para 3 mm de radio
33.71	29.94	28.33
33.36	32.51	26.43
36.46	32.16	28.84
33.23	30.02	26.86
32.43	31.94	36.87
36.89	33.45	42.6
34.43	33.98	42.62
30.97	36.35	38.84
29.17	33.13	41.52
29.39	36.28	38.2
27.87	37.02	44.74
31.84	33.32	37.71
37.45	38.89	40.18
30.66	40.49	39.17
31.59	36.87	35.22
30.37	37.37	31.16
31.24	35.23	32.06
34.9	32.56	32.76
36.52	36.54	36.72
35.62	36.78	32.83
Promedio 32.905	Promedio 34.7415	Promedio 35.683

APÉNDICE B

Medidas de ancho de huella de desgaste de la probeta A, de la prueba con paros cada 3000 laps, previo a utilizar la formula 2 (medidas tomadas en la pantalla del microscopio).

PARO 1	PARO 2	PARO 3	PARO 4	PARO 5
15.27	32.87	25.12	40.08	44.17
16.82	36.74	27.96	42.18	44.09
14.63	32.69	22.89	50.18	44.1
15.3	32.38	30.25	52.81	47.56
18.98	33.32	22.41	49.42	35.87
21.46	20.87	29.98	43.24	33.9
19.29	19.83	32.65	41.13	39.32
19.65	21.8	38.01	42.6	42
20.8	29.18	38.3	41.8	44.42
19.39	29.92	39.92	39.42	46.18
20.53	31.12	42.13	44.31	50.73
22.91	32.69	48.4	48.97	53.68
19.48	29.25	33.18	35.22	48.11
23	28.75	37.44	35.3	43.8
19.39	37.85	41.62	34.19	45.63
19.69	28.35	44.02	37.24	50.98
Promedio 19.16	Promedio 29.85	Promedio 34.64	Promedio 42.38	Promedio 44.65

Medidas de ancho de huella de desgaste de la probeta E, de la prueba con paros cada 3000 laps, previo a utilizar la formula 2 (medidas tomadas en la pantalla del microscopio).

PARO 1	PARO 2	PARO 3	PARO 4	PARO 5
22.18	32.32	30	33.18	33.15
17.38	20.87	29.65	33.56	34.87
21.43	25.9	24.06	28.72	33.02
25.22	20.46	23.23	31.66	44
20.23	29.18	31.29	38.77	41.12
19.25	30.18	30.83	40.9	40.03
22.69	29.83	33.83	37.27	42.45
21.15	31.48	33.8	37.43	42.38
19.84	30.46	37.41	41.36	42.22

21.41	31.76	35.21	42.39	40.46
23.5	32.02	39.06	38.67	39.51
21.9	27.57	39.25	40.49	41.09
19.97	25.34	28.59	34.25	34.75
18.8	26.31	29.76	33.69	33.47
20.2	29.52	30.46	34	44.05
21.42	32.51	29.64	35.12	43.5
Promedio 21.03	Promedio 28.48	Promedio 31.62	Promedio 36.34	Promedio 39.37