



UNIVERSIDAD MICHOCANA DE SAN NICOLAS DE HIDALGO

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES METALURGICAS

TESIS

"DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN EQUIPO EXPERIMENTAL DE DESGASTE
Y SU PRUEBA CON UN ACERO EXPERIMENTAL TWIP"

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS EN METALURGIA Y CIENCIAS
DE LOS MATERIALES

PRESENTA:

ING. RAÚL GURRERO MORENO

ASESOR DE TESIS:

DR. CUAUHEMOC MALDONADO ZEPEDA

CO-ASESOR:

DR. IGNACIO MEJIA GRANADOS

Morelia, Michoacán, Diciembre de 2010.



ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	iv
ÍNDICE DE TABLAS	viii
RESUMEN	1
CAPITULO I. INTRODUCCIÓN.....	2
1.1. INTRODUCCIÓN	2
1.2 PROPUESTA	4
1.3 OBJETIVOS	4
CAPITULO II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 ACEROS DE ALTA RESISTENCIA.....	5
2.1.1 Aceros Hadfield.....	5
2.1.2 Aceros ligeros Fe-Al(Mn,Si).....	7
2.1.3 Aceros con contenido mayor al 20% de manganeso.....	8
2.1.3.1 Beneficios para los usuarios.	8
2.1.3.2 Aplicaciones.	8
2.1.4 Aceros Avanzados de Alta Resistencia.....	9
2.1.5 Aceros de plasticidad inducida por maclaje (Twining Induced Plasticity-TWIP) de alto contenido de manganeso	10
2.1.5.1 Generalidades.....	10
2.1.5.2 Metalurgia de los aceros TWIP.....	11
2.1.5.3 Efecto de los elementos de aleación en los aceros TWIP.....	12
2.1.6. Aceros aleados.....	14
2.1.7 Nomenclatura de los aceros sistema SAE - AISI	15
2.2 TRIBOLOGÍA.....	16
2.2.1 Definiciones.	16
2.2.2 Parámetros tribológicos básicos.	17
2.2.2.1 Parámetros Estructurales.	17
2.2.2.2 Parámetros Operacionales.....	19
2.2.3 Fundamentos de fricción	21
2.2.3.1 Área de contacto.	21

2.2.3.2	Leyes cuantitativas de la fricción	22
2.2.4	Distribución de esfuerzos.	24
2.2.4.1	Carga lineal en un espacio semi-infinito.....	24
2.3	DESGASTE	27
2.3.1	Introducción.	27
2.3.2	El fenómeno del desgaste.....	28
2.3.3	Mecanismos físicos de desgaste.....	28
2.3.3.1	Desgaste adhesivo.....	29
2.3.3.2	Desgaste abrasivo.....	30
2.3.3.3	Desgaste por delaminación.....	31
2.3.3.4	Desgaste por oxidación.....	32
2.3.3.5	Otras formas de desgaste.....	33
2.4	EXPERIMENTOS DE FRICCIÓN Y DESGASTE.....	34
2.4.1	Ensayo de desgaste.....	39
2.4.1.1	Configuración "Espiga sobre disco".....	39
2.4.2	Medición del desgaste.....	40
2.4.2.1	Pérdida de masa.....	40
2.4.2.2	Pérdida de volumen.....	40
CAPITULO III. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL		41
3.1	EL EQUIPO DE DESGASTE	41
3.1.1	Configuración del ensayo.....	41
3.1.1.1	Porta muestras y brazo de elevación.....	44
3.1.1.2	Disco de desgaste.....	48
3.1.2	Instrumentación.....	49
3.1.2.1	Control de velocidad del motor	49
3.1.2.2	Contador de revoluciones (tacómetro)	51
3.1.2.3	Sensor de velocidad.....	53
3.1.2.4	Motor eléctrico	54
3.2	ENSAYO DE DESGASTE DEL ACERO EXPERIMENTAL.....	55
3.2.1	Desarrollo experimental.....	55

3.2.2 Materiales utilizados.....	56
3.2.2.1 Características del material sometido a desgaste	56
3.2.2.2 Preparación de las muestras	57
3.2.2.2.1 Densidad	57
3.2.2.3 Disco de desgaste.....	59
3.2.3.1 Distancia de deslizamiento	61
3.2.3.2 Velocidades de deslizamiento.....	61
3.2.3.3 Cargas.	62
3.2.3.4 Tiempos de deslizamiento y duración de cada prueba.....	62
3.2.3.5 Pérdida de masa	63
CAPITULO 4. ANALISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	64
4.1 Desempeño del equipo de desgaste.....	64
4.1.1 Barras de deslizamiento horizontal.....	64
4.1.2 Base articulada y contrapeso	65
4.1.3 Varilla porta probetas	65
4.1.4 Control de velocidad y tacómetro	67
4.2 Desgaste	67
4.2.1 Velocidad de desgaste.....	67
4.2.2 Efecto de la carga sobre la velocidad de desgaste.....	78
4.3 Análisis de las superficies desgastadas.....	79
4.3.1 Disco de desgaste.....	79
4.3.2 Probetas desgastadas.....	84
4.3.3 Partículas de desgaste.....	88
 CONCLUSIONES.....	 94
BIBLIOGRAFÍA.....	96
ANEXOS.....	99

ÍNDICE DE FIGURAS

Pág.

Figura 2.1 Diagrama de resistencia a la tracción y deformación total promedio de aceros TWIP.....	12
Figura 2.2 Representación esquemática de la influencia de la energía de falla de apilamiento (SFE) sobre las características de deformación de la austenita (γ -FCC) ..	14
Figura 2.3 Ejemplos de tribosistemas de ingeniería, sus configuraciones de ensayo y su estructura elemental.....	19
Figura 2.4 Tipos de movimiento de tribosistemas.....	20
Figura 2.5 La superficie 1 descansa sobre la superficie 2 bajo una carga normal. El contacto sólo se produce en unas cuantas asperezas a_1 , a_2 y a_3	22
Figura 2.6 Diagrama de equilibrio para un objeto en un plano inclinado.....	23
Figura 2.7 Carga lineal en un espacio semi-infinito.....	24
Figura 2.8 Distribución del esfuerzo normal (σ_x) producido por la combinación de cargas lineales normales y tangenciales a lo largo de la superficie de contacto.....	26
Figura 2.9 Distribución de esfuerzos normales (σ_x) producidos por la combinación de cargas lineales normales y tangenciales a lo largo de una línea.....	26
Figura 2.10 Descripción esquemática del desgaste adhesivo.....	29
Figura 2.11 Esquema del desgaste abrasivo.....	31
Figura 2.12 Mecanismo de desgaste por delaminación.....	32
Figura 2.13 Esquema de un aparato para medir la fricción con cargas ligeras.....	35
Figura 2.14 Máquina de espiga y buje.....	35
Figura 2.15 Cilindro cruzado (1) montado sobre un resorte (2). El movimiento debido al arrastre friccional se mide por medio de un transductor (3).....	36
Figura 2.16 Barra de carga 1) con calibradores de deformación montados sobre la sección reducida 2). La flexión de la barra debida a la fricción desequilibra un circuito puente.....	37
Figura 2.17 Máquina de espiga y disco.	37
Figura 2.18 Barra de carga con bisagra.....	38
Figura 2.19 Esquema de un sistema de ensayo de desgaste "espiga sobre disco"	39
Figura 3.1 Esquema de un sistema de ensayo de desgaste "Pin on Disk".....	41
Figura 3.2 Imagen del prototipo en fabricación.....	41
Figura 3.3 Sistema de brazo elevador, porta muestras y disco de desgaste.....	42
Figura 3.4 Base con sistema de sujeción deslizante y contrapeso.....	43

Figura 3.5	Dibujo de detalle para el sistema deslizante y el contrapeso.....	44
Figura 3.6	Elementos de posicionamiento de la muestra sobre el disco de desgaste.	45
Figura 3.7	Sistema espiga sobre disco (Pin on Disk).....	46
Figura 3.8	Dimensiones del brazo pivote.....	47
Figura 3.9	Dimensiones de la varilla porta muestra.....	47
Figura 3.10	Dimensiones del disco de desgaste.....	48
Figura 3.11	Pista de desgaste y canal de recolección de partículas.....	49
Figura 3.12	Aspecto del control de velocidad para motor de CD.....	50
Figura 3.13	Tacómetro digital BALDOR.....	51
Figura 3.14	Instrumentación de control.....	52
Figura 3.15	Sensor de velocidad.....	53
Figura 3.16	Montaje del sensor de velocidad en la flecha del motor eléctrico.....	53
Figura 3.17	Motor eléctrico (A) acoplado al reductor de velocidad (B) y al sensor de velocidad (C).....	54
Figura 3.18	Esquema de la secuencia experimental.....	55
Figura 3.19	Dimensiones de la sección longitudinal.....	56
Figura 3.20	Dimensiones de la placa cortada en barras.....	57
Figura 3.21	Forma y dimensiones en mm de la probeta a desgastar.....	57
Figura 3.22	Picnómetro de helio.....	58
Figura 3.23	Balanza analítica OHAUS.....	59
Figura 4.1	Disposición de los elementos para determinar la posición de la probeta sobre el disco de desgaste.....	64
Figura 4.2	Huellas de contacto por fricción en toda la superficie de contacto del disco de desgaste.....	65
Figura 4.3	Separación entre la probeta y el disco de desgaste, que permite la colocación de la probeta en la base de la varilla porta probetas.....	66
Figura 4.4	Gráfica de velocidad de desgaste a 24.5 N y velocidad lineal de 0.75 m/s.....	68
Figura 4.5	Gráfica de velocidad de desgaste a 24.5 N y velocidad lineal de 1.19 m/s.....	68
Figura 4.6	Gráfica de velocidad de desgaste a 24.5 N y velocidad lineal de 2.05 m/s.....	69
Figura 4.7	Gráfica de velocidad de desgaste a 44.1 N y velocidad lineal de 0.75 m/s.....	

m/s.....	69
Figura 4.8 Gráfica de velocidad de desgaste a 44.1 N y velocidad lineal de 1.19 m/s.....	70
Figura 4.9 Gráfica de velocidad de desgaste a 44.1 N y velocidad lineal de 2.05 m/s.....	70
Figura 4.10 Gráfica de velocidad de desgaste a 68.6 N y velocidad lineal de 0.75 m/s...	71
Figura 4.11 Gráfica de velocidad de desgaste a 68.6 N y velocidad lineal de 1.19 m/s...	72
Figura 4.12 Gráfica de velocidad de desgaste a 68.6 N y velocidad lineal de 2.05 m/s....	72
Figura 4.13 Gráfica que resume la pérdida de volumen para carga aplicada de 24.5 N en los tres rangos de velocidad de deslizamiento.....	73
Figura 4.14 Gráfica que resume la pérdida de volumen para carga aplicada de 44.1 N en los tres rangos de velocidad de deslizamiento.....	74
Figura 4.15 Gráfica que resume la pérdida de volumen para carga aplicada de 68.6 N en los tres rangos de velocidad de deslizamiento.....	75
Figura 4.16 Gráfica que resume la pérdida de volumen para una velocidad de deslizamiento de 0.75 m/s en los tres rangos de carga aplicada.....	76
Figura 4.17 Gráfica que resume la pérdida de volumen para una velocidad de deslizamiento de 1.19 m/s en los tres rangos de carga aplicada.....	76
Figura 4.18 Gráfica que resume la pérdida de volumen para una velocidad de deslizamiento de 2.05 m/s en los tres rangos de carga aplicada.....	77
Figura 4.19 Gráfica que muestra la transición del desgaste en función de la carga aplicada.....	78
Figura 4.20 Gráfica que muestra la transición del desgaste en función de la velocidad de deslizamiento.....	79
Figura 4.21 Marcas en la superficie del disco de desgaste.....	80
Figura 4.22 Imagen que muestra los residuos carbonizados presentes durante el ensayo de fricción para una carga de 44.1 N.....	80
Figura 4.23 Imagen que muestra la adherencia de partículas de desgaste en la superficie del disco.....	81
Figura 4.24 Microfotografía a 200x donde se observan los residuos de óxido durante el ensayo de desgaste a una carga de 44.1 N.....	82
Figura 4.25 Microfotografía que muestra las partículas de carbón sobre la superficie del disco de desgaste, bajo un aumento de 500x.....	82
Figura 4.26 Microfotografía en donde se observan las partículas de la probeta, adheridas a la superficie del disco de desgaste durante la aplicación de una carga de 68.6 N, 100x.....	83

Figura 4.27 Microfotografía a que muestra la frontera entre dos zonas, una desgastada y otra sin desgaste, 50x.....	83
Figura 4.28 Microfotografía de superficie de probeta sujeta a carga de 24.5 N.....	84
Figura 4.29 Microfotografía a 100x de la superficie de la probeta bajo una carga de 24.5 N	85
Figura 4.30 Microfotografía a 500x de la superficie de la probeta bajo una carga de 24.5 N	85
Figura 4.31 Microanálisis que muestra la elevada presencia de oxígeno en una probeta desgastada bajo condiciones de 24.5 N de carga y 1.19 m/s.....	86
Figura 4.32 Superficie de una probeta sometida a desgaste bajo carga de 41.1 n y velocidad de deslizamiento de 0.75 m/s vista a 100x.....	87
Figura 4.33 Superficie de una probeta sometida a desgaste en condiciones de carga de 68.6 N y velocidad de deslizamiento de 1.19 m/s vista a 2000x, distinguiéndose hojuelas o escamas como parte de un proceso de delaminación.....	87
Figura 4.34 Partículas desgastadas en condición de carga de 24.5 N después de un recorrido de 3000 m, a una velocidad de deslizamiento de 2.05 m/s.....	88
Figura 4.35 Partículas desgastadas en condición de carga media (44.1 N) después de un recorrido de 3000 m, a una velocidad de deslizamiento de 2.05 m/s.....	89
Figura 4.36 Partículas desgastadas en condición de carga media (44.1 N) después de un recorrido de 6000 m, a una velocidad de deslizamiento de 0.75 m/s que presenta residuos visibles de óxido.....	89
Figura 4.37 Forma y tamaño de partículas desgastadas bajo condiciones de carga de 24.5 N.....	90
Figura 4.38 Forma y tamaño de partículas desgastadas bajo condiciones de carga de 44.1 N durante los primeros 3000 m de recorrido.....	91
Figura 4.39 Espesor en partículas desgastadas para condiciones de carga de 44.1 N, de los 3000 a 6500 m de recorrido.....	91
Figura 4.40 Forma y tamaño de partículas desgastadas para condiciones de carga de 44.1 N de los 3000 a 6500 m de recorrido.....	92
Figura 4.41 Partículas desgastadas bajo condición de carga de 68.6 N, libre de óxido, con grietas visibles que originan la fragmentación de estas partículas.....	93
Figura 4.42 Forma y tamaño de partículas de desgaste en condiciones de 68.6 N de carga, durante los primeros 3000 metros.....	93

ÍNDICE DE TABLAS	Pág.
Tabla 1.1 Rangos de composición estándar para aceros austeníticos al manganeso.....	6
Tabla 3.1 Valores de la densidad del materia.....	58
Tabla 3.2 Análisis químico del acero AISI 4340.....	60
Tabla 3.3 Velocidades utilizadas en el ensayo de desgaste.....	61
Tabla 3.4 Cargas utilizadas durante el ensayo de desgaste.....	62
Tabla 3.5 Tiempos de deslizamiento por cada 500 m.....	62
Tabla 3.6 Condiciones generales durante el ensayo.....	63
Tabla 4.1 Velocidades de desgaste.....	77

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo fundamental la implementación de un equipo para realizar ensayos de desgaste bajo el procedimiento “espiga sobre disco” (Pin on Disk). Para lo cual se incluyeron los elementos necesarios de control de parámetros como velocidad de giro del disco, carga aplicada sobre la probeta, posición de la probeta sobre el disco de desgaste y tiempo del ensayo.

El equipo diseñado y fabricado se uso para medir la resistencia al desgaste de un acero TWIP Mn-20%, Al-2%, Si-2%, C-0.4%, Fe-Balance.

Se aplicaron tres diferentes cargas sobre las probetas, estas fueron de 24.5, 44.1 y 68.6 N. Para cada una de estas cargas se consideraron tres velocidades de deslizamiento: 0.75, 1.19 y 2.05 m/seg, respectivamente.

Los ensayos de desgaste Pin on Disk se llevaron a cabo según la norma ASTM G99-95[1], la cual describe un procedimiento de laboratorio para determinar el desgaste de los materiales durante un deslizamiento usando un aparato de espiga sobre disco. Los materiales fueron evaluados en pares bajo condiciones sin lubricación. A través de este equipo es posible realizar ensayos de desgaste de materiales donde se incluye a los polímeros, metales, cerámicos y materiales compuestos.

Como resultado de la aplicación de este ensayo, se obtuvo un régimen de desgaste moderado bajo la aplicación de cargas de 24.525 y 41.145 N respectivamente, con residuos de óxido en todos los rangos de velocidad de deslizamiento. Para la carga aplicada de 68.67 N se presentó un régimen de desgaste severo en sus tres rangos de velocidad de deslizamiento, generando partículas libres de material de oxidación.

Los mecanismos de desgaste predominantes fueron por delaminación superficial, combinado con un mecanismo de desgaste por oxidación y desgaste adhesivo.

CAPITULO I. INTRODUCCIÓN

1.1. INTRODUCCIÓN

Si bien uno de los requisitos para definir el progreso, lo es el uso que el *homo sapiens* ha hecho de la tecnología, no hay que olvidar que fueron los grupos bárbaros del período neolítico los que tendieron los cimientos de la sociedad moderna en un lapso no mayor de 2,000 a 3,000 años (alrededor del 3,500 a 1,500 a. de C). Para que exista un avance tecnológico es necesario que el hombre dé forma a materiales metálicos o no metálicos siguiendo el diseño preconcebido de algún componente, ya sea una lanza para caza o un vehículo de transporte con ruedas. Entre los utensilios tribológicos, los más comunes fueron los taladros hechos de concha, hueso y piedra. Todo indica que todavía en la Edad Media (400 a 1, 400 d. de C.) la piedra era uno de los materiales preferidos en Europa cuando se requería resistencia al desgaste y que se le usaba en la fabricación de arados y aros para ruedas. [2]

Alrededor del año 5,000 a.de C., el hombre aprendió a utilizar el cobre y luego, resultado de la aleación con estaño, descubrió el bronce. Posteriormente, aprendió a trabajar el hierro, material mucho más duro y resistente. Así, el período comprendido entre el año 800 a. de c., aproximadamente, y el siglo I d. de c. se conoció como la Edad del Hierro.

Durante el siglo XIX hubo un gran desarrollo en cuanto a la optimización de los procesos de fabricación de acero, el que se consolidó gracias al británico Henry Bessemer, quien en 1856 inventó el horno o convertidor que lleva su nombre, y que refina el arrabio mediante chorros de aire. Este desarrollo permitió aumentar la producción y crear nuevos aceros. [3]

En la actualidad, la fabricación de piezas, equipos y estructuras se hace con herramientas. Se necesitan guillotinas para cizallar; dados para forjar; brocas para perforar; moldes para conformar; martillos y cinceles para golpear. Hay un acero para cada uso.

A Robert Mushet, hoy en día se conoce como un diseñador de aleaciones, se le suele atribuir la paternidad de los aceros especiales para fabricar herramientas. Se basaba en el sistema hierro-carbono y experimentaba con adiciones de aleantes. Su primer gran éxito fue

la sugerencia de adicionar manganeso durante la aceración en los convertidores de arrabio del acero Bessemer. En el plano comercial, esto representó uno de los mayores impulsos al desarrollo tecnológico de Bessemer. El manganeso ayuda en el proceso de fabricación de acero y repercute positivamente en sus propiedades finales. Cuando el acero está procesándose en el estado líquido, el manganeso ayuda a desoxidarlo y captura al azufre, formando partículas alargadas que hacen al acero más maquinable. Además, incrementa su resistencia. Hoy en día casi todos los aceros comerciales, incluyendo los aceros simples al carbono, se fabrican con adiciones de manganeso. [4]

Recientemente, los aceros austeníticos de bajo carbono y alto manganeso han suscitado interés debido a sus extraordinarias propiedades mecánicas. Estos aceros de alta resistencia se denominan Aceros TRIP (transformation induced plasticity) y TWIP (twinning induced plasticity) y en su mayoría son desarrollados para ser utilizados en los cuerpos de automoviles. Trabajos de investigación han sido realizados en el desarrollo de aleación, análisis microestructural y propiedades mecánicas para estos aceros [5,6]. Empresas siderúrgicas también están intentando hacer algún trabajo pionero en aplicaciones en auto-industrias.

Grassel O. ha hecho un trabajo sistemático en aceros de alto manganeso TRIP/TWIP [5]. Investigó los efectos de elementos de aleación sobre las propiedades mecánicas de aceros austeníticos Fe- (15 % - 30 %wt)Mn (por ciento en peso) con adiciones de aluminio y silicio, también hizo algunas comparaciones entre los aceros TRIP y TWIP, encontrando que la aleación principalmente revelaría el efecto TRIP cuando el contenido de manganeso es inferior al 20 %; mientras que el efecto TWIP sería dominante cuando el contenido de manganeso está arriba del 25% [6,7]

1.2 PROPUESTA

El presente trabajo tiene como finalidad diseñar e implementar un equipo electromecánico para desarrollar ensayos de desgaste espiga sobre disco, basados en la Norma ASTM G99-95[1], para estudiar la resistencia al desgaste de un material Mn-20%, Al-2%, Si-2%, C-0.4%, Fe-Balance. Este material luego de haber sido laminado en caliente y solubilizado, presentó una resistencia a la cedencia de 346 MPa, una resistencia máxima de 758 MPa y elongación de 79.2%. Se realizó un tratamiento térmico de normalizado durante 2 horas a una temperatura de 900° C con enfriamiento en el horno para eliminar la alta segregación que presentaba y homogenizar su microestructura. El valor de dureza alcanzado por el material fué de 93 HRB.

1.3 OBJETIVOS

- 1.- Diseñar y construir un prototipo electromecánico que permita realizar las pruebas de desgaste bajo la configuración espiga sobre disco , basados en la Norma ASTM G99-95.
- 2.- Estudiar el desgaste por deslizamiento unidireccional sin lubricación del material de composición Mn-20%, Al-2%, Si-2%, C-0.4%, Fe-balance, mediante la implementación del ensayo “espiga sobre disco” (Pin on Disk) bajo diferentes condiciones de carga, velocidad y tiempo.
- 3.- Estimar las condiciones operativas a las cuales pudiera presentarse una transición de desgaste moderado a desgaste severo y establecer el mecanismo de desgaste predominante.

CAPITULO II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 ACEROS DE ALTA RESISTENCIA

2.1.1 Aceros Hadfield

El acero de manganeso austenítico original que contiene alrededor de 1.2% C y 12% Mn fue inventado por Robert Hadfield en 1882. El acero Hadfield fue único ya que combinaba una alta dureza y ductilidad con alta capacidad para el trabajo rudo y usualmente con una excelente resistencia al desgaste.

El acero Hadfield sigue siendo usado extensivamente con algunas modificaciones menores en su composición y en su tratamiento térmico, principalmente en la minería, en la excavación, en la tala de árboles, en la fabricación de trenes, y en equipo para la industria del cemento y productos de arcillas. El acero Hadfield es usado en trituradoras, excavadoras, y bombas para el manejo de lodos.

Los aceros Hadfield están caracterizados por sus propiedades mecánicas como: alta resistencia a la tracción y a la compresión, alta ductilidad y excelente resistencia al desgaste. El acero Hadfield es el único que combina alta resistencia y ductilidad con gran capacidad de endurecimiento por deformación y, usualmente, buena resistencia al desgaste. [8,9]

Los aceros austeníticos al manganeso presentan ciertas propiedades que tienden a restringir su uso, por ejemplo, son difíciles de maquinarse y usualmente tienen resistencia a la cedencia de 345 a 415 MPa. Consecuentemente, no son aptos para partes que requieren alta precisión durante el maquinado o que deben resistir deformación plástica cuando son sometidos a altos esfuerzos durante el servicio.[10]

El acero Hadfield ha sufrido varias modificaciones, pero solamente unas pocas han sido mejoras significativas, estas incluyen variaciones de carbono y manganeso, con o sin aleaciones adicionales como el cromo, níquel, molibdeno, vanadio, bismuto y titanio [11]. Las composiciones más comunes establecidas por la norma ASTM A128 son resumidas en la tabla 2.1.

ASTM A128 GRADO	COMPOSICIÓN, %						
	C	Mn	Cr	Mo	Ni	Si (max)	P (max)
A	1.05-1.35	11 min	----	----	---	1	0.07
B1	0.9-1.05	11.5-14	----	----	---	1	0.07
B2	1.05-1.2	11.5-14	----	----	---	1	0.07
B3	1.12-1.28	11.5-14	----	----	---	1	0.07
B4	1.2-1.35	11.5-14	----	----	---	1	0.07
C	1.05-1.35	11.5-14	1.5- 2.5	----	---	1	0.07
D	0.7-1.3	11.5-14	----	----	3-4	1	0.07
E1	0.7-1.3	11.5-14	----	0.9- 1.2	---	1	0.07
E2	1.05-1.45	11.5-14	----	1.8- 2.1	---	1	0.07
F	1.05-1.35	6-8	----	0.9- 1.2	---	1	0.07

Tabla 2.1 Rangos de composición estándar para aceros austeníticos al manganeso.
[12]

Otra clase de aceros austeníticos con altas adiciones de manganeso se han desarrollado para usos criogénicos y para aplicaciones marinas que requieren resistencia a la corrosión. Estas aleaciones se han visto como substitutos económicos para los aceros inoxidables austeníticos convencionales porque contienen aluminio y manganeso en vez del cromo y del níquel. Por lo tanto, estas aleaciones tienen una resistencia al esfuerzo más alta pero una ductilidad más baja que los aceros inoxidables convencionales como el AISI 304. La microestructura de estas aleaciones es una mezcla de austenita y martensita., y en algunos casos de ferrita (especialmente cuando el contenido de aluminio excede el 5%).[11]

El acero Mn-austenítico (a partir del 12–14% wt Mn y 1–1.4% wt C) sigue siendo resistente a las temperaturas bajo cero, encima de la temperatura Ms. El acero Mn-austenítico es aparentemente inmune a la fragilización producida por el hidrógeno. Hay disminución gradual de la resistencia al impacto con la disminución de temperatura. Se ha

observado que la temperatura de transición no está bien definida, por qué no hay ninguna inflexión aguda en la curva del diagrama energía absorbida-temperatura del ensayo de impacto a temperaturas tan bajas, hasta de -85°C . Para un valor dado de temperatura y de sección, las adiciones de níquel y manganeso son generalmente beneficiosas para realzar la energía absorbida, mientras que las adiciones de carbón y de cromo no lo son. Por otra parte, la resistencia a la propagación de grieta es alta y se asocia a la nucleación lenta de microfisuras. [11]

2.1.2 Aceros ligeros Fe-Al(Mn,Si)

Los nuevos conceptos de diseño para la construcción en sistemas de transporte, como automóviles, camiones, trenes eléctricos y buques de carga están basados sobre requisitos económicos y ecológicos. Se busca una reducción considerable en peso, consumo de combustible y en emisión de gases de escape. Otro aspecto importante es el aumento de la eficiencia-potencia por unidad de masa del vehículo. Los aceros ligeros recién desarrollados están basados en aleaciones Fe-Al ferríticas o aleaciones de Fe-Mn-Al(Si) austeníticas, muestran propiedades físicas, mecánicas y tecnológicas prometedoras, modelo elástico específico, excelente ductilidad y formabilidad, reducido peso específico y una gran resistencia a la corrosión, que son adecuadas para el desarrollo y diseño de nuevos tipos de aceros ligeros de alta resistencia.[13]

Las propiedades físicas, mecánicas y microestructurales de los aceros ligeros con contenidos de aluminio, que van desde 5 a 8,5 % wt y los aceros con alto manganeso TRIP y TWIP entre 17.9-26.5 % wt, concentraciones medias de aluminio y silicio de 3 % wt cada uno, han sido investigados. Se obtuvo una reducción de peso de los aceros de Fe-Al del orden del 10% y más, debido al contenido medio y alto de aluminio.

Los aceros al alto manganeso TRIP y TWIP exhiben una combinación óptima de endurecimiento, resistencia y ductilidad, esta última es elevada al obtenerse una deformación total $> 50\%$. [13]

2.1.3 Aceros con contenido mayor al 20% de manganeso

El alto contenido de elementos de aleación da como resultado una mayor vida útil y una mayor resistencia a la abrasión. El acero premium Xtralloy®, al manganeso se convirtió en una aleación para producción en 1988 y ha sido ampliamente aceptado por los clientes en la producción de aglomerados y el procesamiento de minerales como manera de reducir el costo del desgaste abrasivo.

El acero con 24% de manganeso es significativamente más alto en contenido de carbón y manganeso que el acero convencional al manganeso Hadfield (14%Mn, 1.2%C), lo que deriva en una excelente resistencia al desgaste y mayor confianza en los consumidores.

2.1.3.1 Beneficios para los usuarios. Los aceros con un contenido mayor al 20% wt de Mn, ofrecen las siguientes ventajas en numerosas aplicaciones de trituración:

- Mayor vida útil ante el desgaste.
- Ahorros en mano de obra, en material de respaldo para revestimiento y períodos de inactividad debido a cambios menos frecuentes.
- Producción de la trituradora mantenida durante toda la vida útil del revestimiento.
- Menor costo por tonelada de material triturado.

2.1.3.2 Aplicaciones. Muestra sus mejores características de desempeño cuando se trituran materiales difíciles y abrasivos. Como ninguna otra aleación, este acero es excepcional en su capacidad de producción de piezas de gran espesor con altos niveles de manganeso y carbón. Satisface específicamente la necesidad de piezas de desgaste más grandes de acero al manganeso para servicio intensivo. [14]

La empresa Luxemburguesa Arcelor -la segunda mayor a escala mundial- y el fabricante Alemán de aceros planos ThyssenKrupp firmaron un acuerdo de investigación y desarrollo para producir aceros con alto contenido de manganeso que se utilizan en la fabricación de estructuras y chasis para automóviles. Las compañías pretenden reducir un 20% el peso de

automóviles y camiones, lo que permitiría a los fabricantes de autos aumentar la eficiencia del combustible sin comprometer la seguridad. [15]

2.1.4 Aceros Avanzados de Alta Resistencia.

Los aceros avanzados de alta resistencia ofrecen oportunidades técnicas ilimitadas en la fabricación de productos más resistentes y livianos. Pero su verdadera fortaleza radica en las ventajas económicas que ofrecen.[16]

Las compañías acereras están introduciendo con rapidez los nuevos aceros avanzados de alta resistencia AHSS, (*Advanced High Strength Steels*). La razón principal para cambiar a los aceros de alta resistencia es conseguir ahorro de peso. Las aleaciones de los AHSS incluyen altas resistencias a la tensión (de 500 MPa o mayores), una buena formabilidad, e incluyen también aceros con grado de doble fase (DP, *Dual Phase*), de fase compleja (CP, *Complex Phase*), de plasticidad inducida por transformación (TRIP, *Transformation Induced Plasticity*) así como algunos aceros martensíticos. Las altas resistencias de estos materiales permiten la realización de diseños eficientes en términos de masa, que economizan el consumo de combustibles, mientras que de manera simultánea, generan un incremento en la resistencia a los impactos por colisiones. A diferencia de muchos otros materiales, los AHSS pueden cumplir con estos objetivos sin causar un aumento en el costo total para el fabricante. Diversos diseños conceptuales de vehículos completos y de los subsistemas han presentado un ahorro del 25 % en términos de masa, sobre aquellos diseños convencionales actuales que usan aceros de alta resistencia, en tanto que a la vez logran una mejoría en la resistencia al impacto por colisiones, sin causar un aumento en los costos [17].

Se pueden obtener ahorros en peso de hasta el 50 %, cambiando el acero al carbón por aceros de mayor resistencia en componentes de seguridad. Los aceros avanzados de alta resistencia son mucho más económicos que el aluminio. Así, puede obtenerse, prácticamente con el mismo peso, un rendimiento equiparable al del aluminio en cuanto a seguridad, pero a un costo considerablemente más bajo.

En la mayor parte de los casos, el cambiar a aceros de alta resistencia representa ajustes de poca importancia en los métodos de producción, y en todo caso sin altas inversiones. Los aceros de alta resistencia pueden ser cizallados, cortados, taladrados, doblados y soldados del mismo modo que los aceros al carbón. En un proceso de perfilado por rodillos se pueden conseguir radios de plegado más pequeños y el retorno elástico se puede manejar mejor que por estampación.

El acero por ser magnético, es fácilmente separable. El acero de nueva producción siempre contiene una fracción reciclada. Además, es totalmente reciclable y puede llegar a recuperar las propiedades exactas del producto original sin pérdida de calidad.

Los aceros de alta resistencia mejoran los productos existentes, haciéndolos más ligeros y resistentes [18,19].

2.1.5 Aceros de plasticidad inducida por maclaje (Twining Induced Plasticity-TWIP) de alto contenido de manganeso

2.1.5.1 Generalidades

Los aceros de plasticidad inducida por maclaje (Twining Induced Plasticity, TWIP), son aceros con alto contenido de manganeso (17-30%) y pequeñas cantidades de aluminio, silicio y carbono. Una de las características más importantes de los aceros TWIP radica en el alto porcentaje de alargamiento a fractura, ya que pueden alcanzar hasta un 90%. Este tipo de acero fue desarrollado hace más de una década en el Departamento de Ingeniería en Materiales del MPIR (Max Planck Institute Research), en Dusseldorf, Alemania, bajo el liderazgo del profesor George Frommeyer [20]. Este tipo de acero fue formulado originalmente para mejorar la seguridad en los automóviles; es decir, aumentar la ductilidad del material y absorber la energía producida durante una colisión, mientras se conserva estabilidad y resistencia para proteger a los pasajeros en el interior de la cabina. El “MPIR” considera que los aceros convencionales comúnmente usados en la industria automotriz, son resistentes para el marco del auto, pero no lo suficientemente dúctiles, lo que hace que se fracturen ante la presencia de sobrecargas. Los aceros TWIP son similares a los aceros

de transformación inducida por plasticidad (TRIP), los cuales cuentan ya con casi trece años en el mercado, con la diferencia que los aceros TWIP tienen mayor ductilidad de reserva. Es importante señalar que la relación de endurecimiento y el aumento de fuerza requerida para continuar la deformación en los aceros TRIP, son mayores, y por lo tanto, la capacidad de formabilidad se agota rápidamente. En general, para aplicaciones en la industria automotriz, los aceros TWIP de alto contenido de manganeso resultan muy atractivos debido a su alta absorción de energía, la cual es más del doble que la de los aceros de alta resistencia convencionales [21], así como su alta estabilidad lo que mejora la seguridad durante los impactos [5].

2.1.5.2 Metalurgia de los aceros TWIP

El alto contenido de manganeso (hasta 30%) hace que los aceros TWIP sean completamente austeníticos a temperatura ambiente y en un rango de temperatura amplio. La ductilidad de los aceros TWIP se deriva de las fallas de apilamiento en su estructura cristalina (FCC). Si se introducen dos planos extras a la estructura atómica superior, esta perturba la secuencia regular de los átomos, formando una falla de apilamiento en un plano espejo y crea reflejos regulares en las secciones del cristal. Este efecto es conocido como maclaje (twining). Este mecanismo produce un alto endurecimiento local, por tal motivo, una vez que un volumen de control particular del material ha comenzado su deformación, su esfuerzo de fluencia comienza a crecer, haciendo que la deformación se extienda hacia volúmenes de control vecinos del material. El maclaje produce un valor muy alto de la velocidad de endurecimiento instantánea (coeficiente de endurecimiento “n”), a la vez que se genera una microestructura muy fina. En este caso, los límites de maclas resultantes actúan como límites de grano y refuerzan el acero. En general los aceros TWIP austeníticos poseen energía de falla de apilamiento (SFE) baja-intermedia, por lo que pueden experimentar extensivo maclaje mecánico durante la deformación plástica, lo cual a su vez genera una buena combinación de resistencia y ductilidad. Los aceros TWIP combinan una resistencia y formabilidad extremadamente altas. El coeficiente de endurecimiento “n” aumenta a un valor de 0.4 con una deformación ingenieril de aproximadamente 30% y se

mantiene constante hasta una elongación total de alrededor del 50%. La resistencia a la tracción puede ser superior a 900 MPa, tal como se muestra en la Figura 2.1 [22].

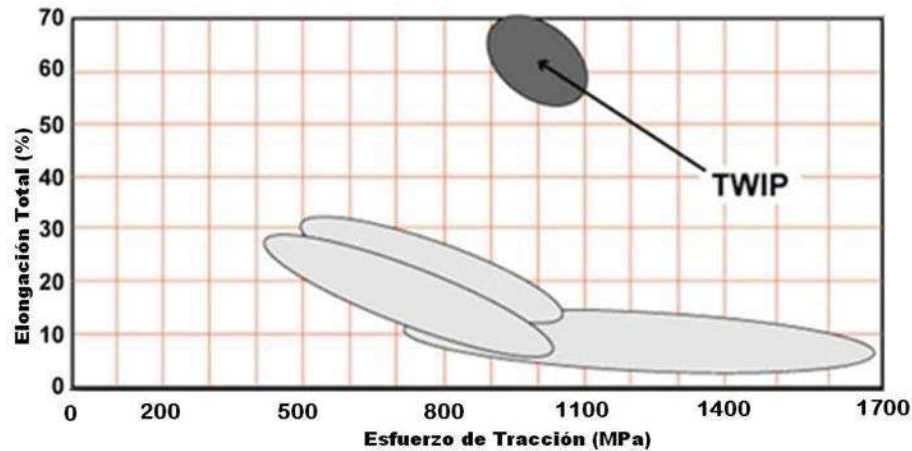


Figura 2.1 Diagrama de resistencia a la tracción y deformación total promedio de aceros TWIP.

Estudios realizados por Bouaziz y Guelton [23] han determinado que la gran cantidad de endurecimiento por deformación se debe a la interacción entre el deslizamiento de dislocaciones y maclas, donde las maclas actúan como grandes obstáculos para el movimiento de las dislocaciones. La idea principal es que las maclas actúan como obstáculos de gran resistencia en la movilidad de las dislocaciones, creando un efecto parecido al que se genera cuando una dislocación en movimiento se encuentra con un límite de grano, lo cual ocasiona un endurecimiento instantáneo ante la presencia de un obstáculo.

2.1.5.3 Efecto de los elementos de aleación en los aceros TWIP

Manganeso.- El manganeso está considerado como el principal elemento de aleación de los aceros TWIP, el cual es crucial para mantener la estructura austenítica derivada del diagrama ternario Fe-Mn-Al [24]. La influencia más importante del manganeso en los aceros TWIP es el control de la energía de falla de apilamiento (SFE). Estudios realizados demuestran que con un aumento del contenido de manganeso, la SFE inicialmente disminuye hasta alcanzar un valor mínimo, y luego vuelve a aumentar [25,26].

Aluminio.- La adición de aluminio en aceros TWIP de alto contenido de manganeso tiene varias funciones. El aluminio incrementa significativamente la energía de falla de apilamiento, y por lo tanto estabiliza la austenita durante la deformación plástica. De manera adicional, el aluminio endurece la austenita por solución sólida [27]. Finalmente, debido a su alta pasividad, el aluminio mejora la resistencia a la corrosión del acero.

Silicio.- En contraste con el aluminio, el silicio disminuye la cantidad de fase austenítica (FCC) y mantiene la transformación de la austenita a martensita ϵ (HCP) durante el enfriamiento y la deformación. Estudios realizados por Takaki y colaboradores [28] indican que la adición de 2% de Si a un acero con 27% de Mn disminuye la energía de falla de apilamiento, resultando en un aumento de las fallas de apilamiento, las cuales actúan como sitios de nucleación para la transformación martensítica. Adicionalmente, el silicio endurece la austenita por solución sólida.

Carbono.- En los aceros TWIP, el carbono actúa como un excelente estabilizador de la austenita, y es adicionado en aceros TWIP modificados hasta en un 0.6%. Es bien conocida la alta solubilidad del carbono en la austenita, por lo que las adiciones de carbono pueden ser utilizadas para estabilizarla, a la vez que se endurece la matriz por solución sólida.

Mediante variaciones de la composición y temperatura de deformación, la energía de falla de apilamiento (SFE) puede ajustarse en el rango donde el maclaje mecánico se ve favorecido (Figura 2.2). Esta energía para los aceros TWIP de alto contenido de manganeso se encuentra generalmente por debajo de $25 \text{ mJ}\cdot\text{m}^{-2}$, y por arriba de $16 \text{ mJ}\cdot\text{m}^{-2}$. Valores inferiores favorecen la formación de martensita ϵ (HCP), e inhiben el maclaje mecánico.

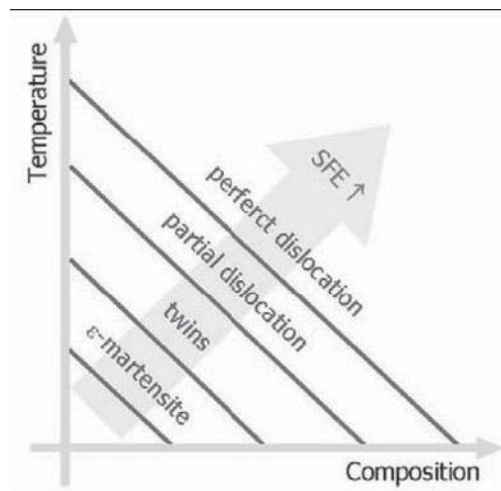


Figura 2.2. Representación esquemática de la influencia de la energía de falla de apilamiento (SFE) sobre las características de deformación de la austenita (γ -FCC)

2.1.6. Aceros aleados

Se da el nombre de aceros aleados a los aceros que además de los cinco elementos: carbono, silicio, manganeso, fósforo y azufre, contienen también cantidades relativamente importantes de otros elementos como el cromo, níquel, molibdeno, etc., que sirven para mejorar alguna de sus características fundamentales. También puede considerarse aceros aleados los que contienen alguno de los cuatro elementos diferentes del carbono que antes hemos citado, en mayor cantidad que los porcentajes que normalmente suelen contener los aceros al carbono, y cuyos límites superiores suelen ser generalmente los siguientes: Si=0.50%; Mn=0.90%; P=0.100% y S=0.100%.

Los elementos de aleación que más frecuentemente suelen utilizarse para la fabricación de aceros aleados son: níquel, manganeso, cromo, vanadio, wolframio, molibdeno, cobalto, silicio, cobre, titanio, circonio, plomo, selenio, aluminio, boro y niobio.

La influencia que ejercen esos elementos es muy variada, y, empleados en proporciones convenientes, se obtienen aceros con ciertas características que, en cambio, no se pueden alcanzar con los aceros ordinarios al carbono.

2.1.7 Nomenclatura de los aceros sistema SAE - AISI

Como la microestructura del acero determina la mayoría de sus propiedades y aquella está determinada por el tratamiento y la composición química; uno de los sistemas más generalizados en la nomenclatura de los aceros es el que está basado en su composición química.

En el sistema SAE-AISI, los aceros se clasifican con cuatro dígitos XXXX. Los primeros dos números se refieren a los dos elementos de aleación más importantes y los dos o tres últimos dígitos dan la cantidad de carbono presente en la aleación. Un acero 1040 AISI es un acero con 0.4% wt de Carbono; un acero AISI 4340, es un acero aleado que contiene 0.4% wt de Carbono, los dos primeros dígitos indican la presencia de otros elementos aleantes.

Las convenciones para el primer dígito son:

- 1 - Manganeso
- 2 - Níquel
- 3 - Níquel-Cromo, principal aleante el cromo
- 4 - Molibdeno
- 5 - Cromo
- 6 - Cromo-Vanadio, principal aleante el cromo
- 8 - Níquel-Cromo-Molibdeno, principal aleante el molibdeno
- 9 - Níquel-Cromo-Molibdeno, principal aleante el níquel.

No hay aceros numerados 7xxx porque estos aceros resistentes al calor prácticamente no se fabrican.

Se observa entonces que si el primer dígito es 1 se sabe que es un acero al carbono; si el dígito siguiente es el 0, o sea que la designación es 10xx, se trata de un acero ordinario al carbono.

2.2 TRIBOLOGÍA

2.2.1 Definiciones.

Tribología es una palabra que se deriva del griego **tribos** que quiere decir frotar, y estudia la relación entre la fricción, lubricación y desgaste. Una definición acertada es: "la ciencia y tecnología de la interacción de superficies en movimiento relativo". Los parámetros tribológicos son característicos de los sistemas mecánicos en los cuales hay una interacción entre superficies en movimiento relativo, incluyendo el inicio del movimiento. Los procesos tribológicos de interacción entre superficies tienen carácter dual. Por un lado son necesarios para la funcionalidad de los tribosistemas o tribocomponentes, y por otro lado están inevitablemente relacionados con la fricción y el desgaste en aplicaciones de ingeniería. El propósito de los tribosistemas puede clasificarse bajo las siguientes categorías:

- ✚ El guiaje, transmisión, acoplamiento, control, detención y aniquilación del movimiento, la fuerza, la energía mecánica y la potencia.
- ✚ El transporte y control del flujo de materiales.
- ✚ El formado, maquinado y desbaste de materiales.
- ✚ La generación y transmisión de información.

El diagnóstico de los resultados de fricción y desgaste de los tribosistemas y las correspondientes configuraciones de ensayo de laboratorio, así como los especímenes de ensayo, requieren de una atención especial debido a las numerosas características, parámetros y factores que se deben tomar en consideración. Esto es debido al hecho de que la fricción y el desgaste no son propiedades intrínsecas de los materiales, sino que están relacionadas con el sistema entero en el cual los componentes interactúan unos con otros.

[29]

2.2.2 Parámetros tribológicos básicos.

En un ensayo de fricción o de desgaste, la resistencia contra el movimiento (fricción) o la resistencia contra el daño superficial (resistencia al desgaste) de un par de materiales (sistema en seco) o una combinación material-lubricante-material (sistema lubricado), en un medio ambiente dado, es determinada bajo la acción de cierto tipo de movimiento, como puede ser deslizamiento o rodamiento. Las características tribométricas resultantes (en particular los datos de fricción y desgaste) deben ser entendidas como características tribológicas del sistema asociadas con el siguiente grupo de parámetros:

Parámetros estructurales: los cuales caracterizan los componentes (materiales de ensayo, lubricantes, y medio ambiente) involucrados en los procesos de fricción y desgaste y sus propiedades físicas, químicas y tecnológicas.

Parámetros operacionales: La carga, la cinemática, y las condiciones de temperatura y la duración de su funcionamiento.

Parámetros de interacción: los cuales caracterizan, en particular, la acción de los parámetros de operación sobre los componentes estructurales del sistema tribológico y define su modo de contacto y lubricación [30].

2.2.2.1 Parámetros Estructurales.

El análisis de los parámetros estructurales debe identificar primero los componentes involucrados en un problema dado de fricción y desgaste. La Figura 2.3 muestra los ejemplos típicos de tribosistemas sujetos a fricción y desgaste con su correspondiente configuración de ensayo y su estructura elemental. También ilustra que en cualquier situación de fricción y desgaste, cuatro tribocomponentes están involucrados:

- ✚ Triboelemento (1).
- ✚ Triboelemento (2).
- ✚ Elemento interfacial (3), por ejemplo, lubricante o partículas de polvo.
- ✚ Medio ambiente (4), por ejemplo una atmósfera corrosiva.

Los parámetros estructurales de los tribosistemas pueden clasificarse dentro de dos grupos:

Grupo A: que consiste de los triboelementos (1) y (2) e involucra:

Parámetros Físicos, como la conductividad térmica.

Parámetros Químicos, como composición en volumen o composición superficial.

Parámetros Mecánicos, como módulo de elasticidad, dureza y resistencia a la fractura.

Parámetros Geométricos, como geometría, dimensiones y topografía superficial.

Parámetros Microestructurales, como tamaño de grano, densidad de dislocaciones, y energía de empaquetamiento.

Grupo B: consiste de un elemento interfacial (fluido) y medio ambiente (gases) e involucra:

Parámetros Químicos, como composición, contenido de aditivo, acidez y humedad.

Parámetros Físicos, como densidad, conductividad térmica y puntos de incineración.

Parámetros Mecánicos, como viscosidad, viscosidad-temperatura, viscosidad-presión.

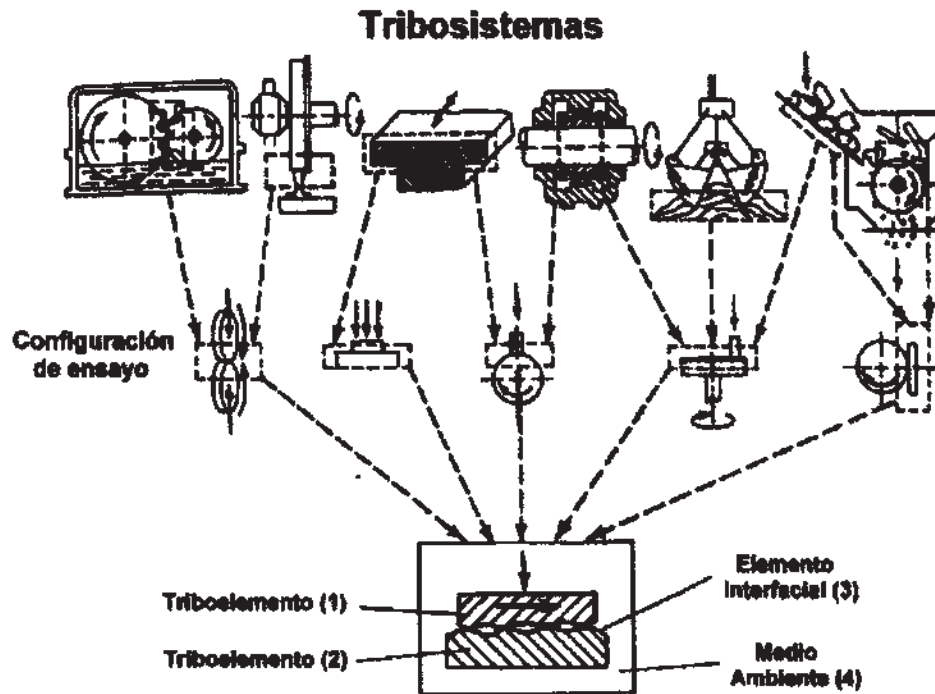


Figura 2.3 Ejemplos de tribosistemas de ingeniería, sus configuraciones de ensayo y su estructura elemental [31]

2.2.2.2 Parámetros Operacionales.

Los parámetros operacionales caracterizan las condiciones de funcionamiento de un tribosistema. Estos pueden ser considerados como variables independientes que pueden cambiar durante el ensayo tribológico para obtener datos experimentales de fricción y desgaste. Los parámetros tribológicos operacionales básicos son:

Tipo de movimiento. Esto es, la cinemática de los triboelementos (1) y (2), y puede ser clasificada en términos de: deslizamiento, rodamiento, giro e impacto y sus posibles superposiciones (Figura 2.4). La cinemática puede ser continua, intermitente, reversible u oscilatoria.

Carga (F_N). Definida como la fuerza total (incluyendo el peso) que actúa perpendicular al área de contacto entre los triboelementos (1) y (2).

Velocidad (v). Puede ser especificada en relación a los vectores y los valores absolutos de los movimientos individuales de los triboelementos (1) y (2).

Temperatura (T). Es la temperatura de los componentes estructurales a tiempos y lugares establecidos, esto es, la temperatura inicial (estado estable) y el incremento de la temperatura inducida por fricción (incremento de la temperatura promedio y temperatura espontánea) a ser estimada en base a los cálculos de calentamiento por fricción.

Tiempo. Dependencia de éste del conjunto de parámetros operacionales (F_N , v , T) por ejemplo: ciclos de carga, intervalos de calentamiento y enfriamiento.

Duración (t). Tiempo de la operación, funcionamiento, o del ensayo [29].

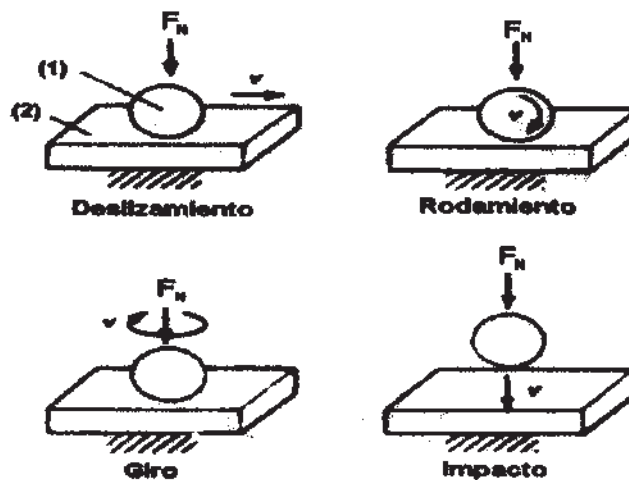


Figura 2.4 Tipos de movimiento de tribosistemas [25]

2.2.2.3 Parámetros de Interacción.

Los parámetros de interacción caracterizan la acción de las condiciones operacionales sobre los componentes estructurales de los tribosistemas. Estos parámetros definen en particular el modo de contacto y el modo de lubricación de un tribosistema con una estructura material-material o material-lubricante-material. El modo tribológico entre dos cuerpos sólidos que están en contacto es caracterizado microscópicamente por las interacciones de

los materiales, las cuales, son descritas por esfuerzos de contacto y distribución de esfuerzos. Las interacciones provocan una resistencia contra el movimiento (fricción) y pueden llevar a un daño o deterioro en el material (desgaste). Por lo tanto, las interacciones de los materiales en los tribosistemas son denominados mecanismos de fricción y desgaste.

2.2.3 Fundamentos de fricción

Cuando una superficie se coloca sobre otra es necesario aplicar una fuerza horizontal finita para iniciar el deslizamiento. Esta fuerza horizontal es la fricción estática entre las dos superficies, cuya magnitud depende, entre otras cosas de la limpieza de la interfase, de modo que la fricción entre dos cuerpos es alta en el vacío. La fuerza necesaria para mantener el deslizamiento debe ser mayor que la fricción cinética entre las dos superficies. La teoría actual de la fricción parte de la premisa básica de que el contacto ocurre en unos cuantos puntos aislados debido a la naturaleza ondulatoria de las superficies. Las áreas de contacto forman uniones metálicas debido a la deformación plástica o elástica, de manera que la resistencia friccional es la fuerza necesaria para destruir esas uniones [32].

2.2.3.1 Área de contacto.

Considerando una superficie que descansa sobre otra (Figura 2.5), ambas con protuberancias como es el caso de las superficies ingenieriles. No puede existir un contacto en toda el área aparente de la interfase y los dos sólidos sólo se tocan en aquellas asperezas que se aproximan en posición favorable. En esta forma, las áreas de contacto a_1 , a_2 , etc. serán las que formen el área real de contacto de manera que:

$$A_t = a_1 + a_2 + a_3 \dots a_n \quad (2.1)$$

Un área de contacto pequeña significa que la carga es soportada en unos cuantos puntos aislados. Esto produce un esfuerzo normal intensificado en la interface y está bien establecido que el material en $a_1, a_2, a_3 \dots a_n$ fluye plásticamente y forma fuertes uniones entre las superficies 1 y 2 (Figura 2.5). Obviamente, la suma de las áreas interfaciales de todas las uniones es el área real de contacto y éstas deben romperse para que una superficie pueda deslizarse en relación con la otra [32].

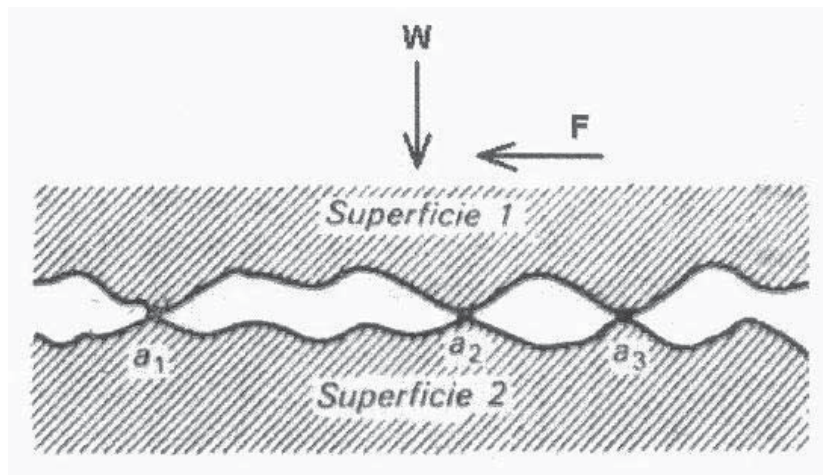


Figura 2.5 La superficie 1 descansa sobre la superficie 2 bajo una carga normal W . El contacto sólo se produce en unas cuantas asperezas a_1, a_2 y a_3 . [31]

2.2.3.2 Leyes cuantitativas de la fricción

La fricción es expresada en términos cuantitativos como una fuerza, siendo la fuerza ejercida por dos cuerpos en contacto tendiendo a oponerse a un desplazamiento relativo tangencial a ellos. Es necesario distinguir lo anterior, considerando que ocurren dos situaciones, la primera es aquella en que la fuerza aplicada es tan grande que no permite iniciar el movimiento y la otra en la cual el movimiento ocurre.

Tres relaciones cuantitativas son requeridas para expresar la magnitud de la fuerza de fricción como función de las variables principales observables macroscópicamente: la carga aplicada, el tamaño de la región de contacto, y la velocidad de deslizamiento. Las tres relaciones cuantitativas son:

1. La fuerza de fricción F es proporcional a la fuerza normal L :

$$F = \mu L \quad (2.2)$$

La relación anterior permite definir el coeficiente de fricción μ .

Alternativamente es conveniente expresar esta ley en términos de un ángulo constante de reposo, o ángulo de fricción definido por:

$$\tan \theta = \mu \quad (2.3)$$

Se puede mostrar que θ es el ángulo de un plano inclinado en el cual cualquier objeto independientemente de su peso, colocado en el plano se mantendrá estacionario, pero si el ángulo es incrementado, el objeto tenderá a deslizarse (ver Figura 2.6).

2. La fuerza de fricción F es independiente del área aparente de contacto A_a . Así, objetos grandes y pequeños tienen los mismos coeficientes de fricción.

3. La fuerza de fricción F es independiente de la velocidad de deslizamiento v . Esto implica que la fuerza necesaria para iniciar el deslizamiento será la misma que la fuerza para mantenerlo a cualquier velocidad específica.

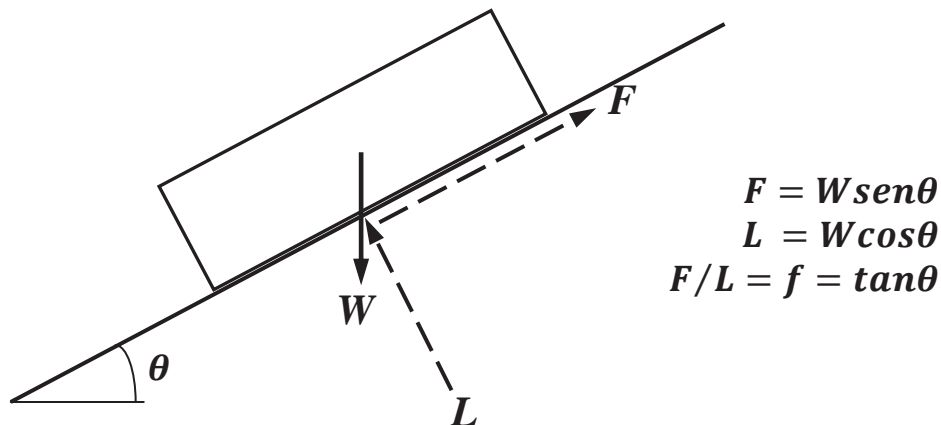


Figura 2.6 Diagrama de equilibrio para un objeto en un plano inclinado.

2.2.4 Distribución de esfuerzos.

El proceso de desgaste involucra la aplicación de fuerzas tangenciales y normales cuando los substratos entran en contacto. El problema de cargas deslizantes en un espacio semi-infinito ya ha sido examinado en mecánica del contacto. Aunque hay algunas diferencias con el proceso de desgaste es conveniente examinar el efecto de este tipo de carga sobre la naturaleza y distribución de esfuerzos y deformación en la superficie de contacto y en la región cercana a ella.

2.2.4.1 Carga lineal en un espacio semi-infinito.

Durante el deslizamiento, las cargas son transferidas de un cuerpo a otro mediante asperezas. Una imagen cualitativa de la distribución de esfuerzos en la región de contacto en un espacio semi-infinito puede obtenerse asumiendo una carga lineal de contacto y condiciones de deformación plana. Las condiciones de deformación plana pueden justificarse debido a las dimensiones de la aspereza comparadas con el área de contacto aparente. El espacio semi-infinito se encuentra sometido a una carga tangencial y a una carga normal (ver Figura 2.7) con una relación entre la carga normal (W) y la tangencial (F) dada por la ecuación (2.4), donde μ es el coeficiente de fricción. Los esfuerzos normales y cortantes pueden ser calculados usando las Ecuaciones 2.5 y 2.6 [33].

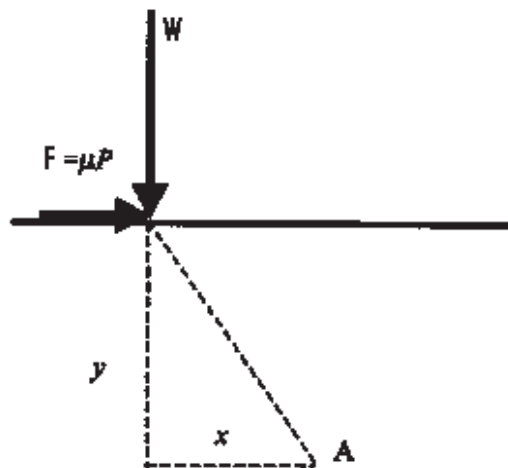


Figura 2.7 Carga lineal en un espacio semi-infinito.

$$Q = \mu P \tag{2.4}$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= -\frac{2Q}{\pi} \frac{x^3}{(x^2 + y^2)^2} \\ \sigma_y &= -\frac{2Q}{\pi} \frac{xy^2}{(x^2 + y^2)^2} \\ \tau_{yx} &= -\frac{2Q}{\pi} \frac{x^2 y}{(x^2 + y^2)^2} \end{aligned} \right\} \tag{2.5}$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= -\frac{2P}{\pi} \frac{x^2 y}{(x^2 + y^2)^2} \\ \sigma_y &= -\frac{2P}{\pi} \frac{y^3}{(x^2 + y^2)^2} \\ \tau_{yx} &= -\frac{2P}{\pi} \frac{xy^2}{(x^2 + y^2)^2} \end{aligned} \right\} \tag{2.6}$$

Considerando que una superficie se encuentra sometida a cargas lineales con dos coeficientes de fricción ($\mu = 0.35$ y 0.50) que son valores normales durante el ensayo de desgaste, la Figura 2.8 muestra la distribución de esfuerzos (σ_x) producida a lo largo de la superficie de contacto ($y = 0$) cuando un substrato semi-infinito es cargado, se puede observar que se generan esfuerzos de tensión y de compresión en la superficie de contacto ($a y = 0$) y en la región cercana al punto de carga. Con un coeficiente de fricción de 0.35 , en la superficie de contacto y distancias de $x = \pm 0.15$ desde el punto de carga los esfuerzos pueden alcanzar valores tan altos como $1.49x$ (en tensión) y $-1.49x$ (en compresión) la magnitud de la presión normal aplicada (P). en la misma localidad pero con un coeficiente de fricción de 0.5 , el valor de los esfuerzos son $\pm 2.12x$ la magnitud de la presión aplicada [34].

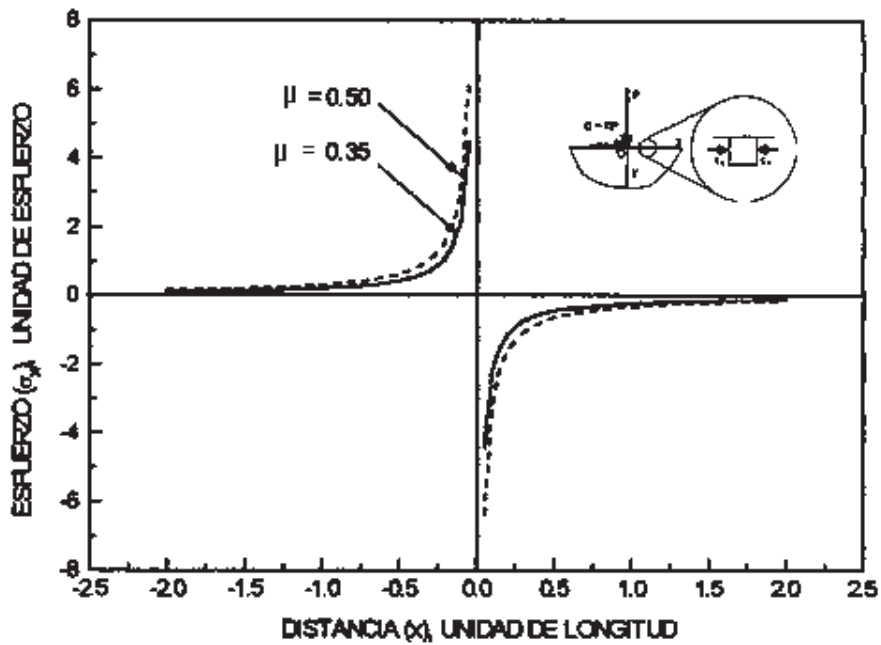


Figura 2.8 Distribución del esfuerzo normal (σ_x) producido por la combinación de cargas lineales normales y tangenciales a lo largo de la superficie de contacto ($y = 0$ unidad de longitud). $P = 1$ unidad de fuerza por unidad de longitud.

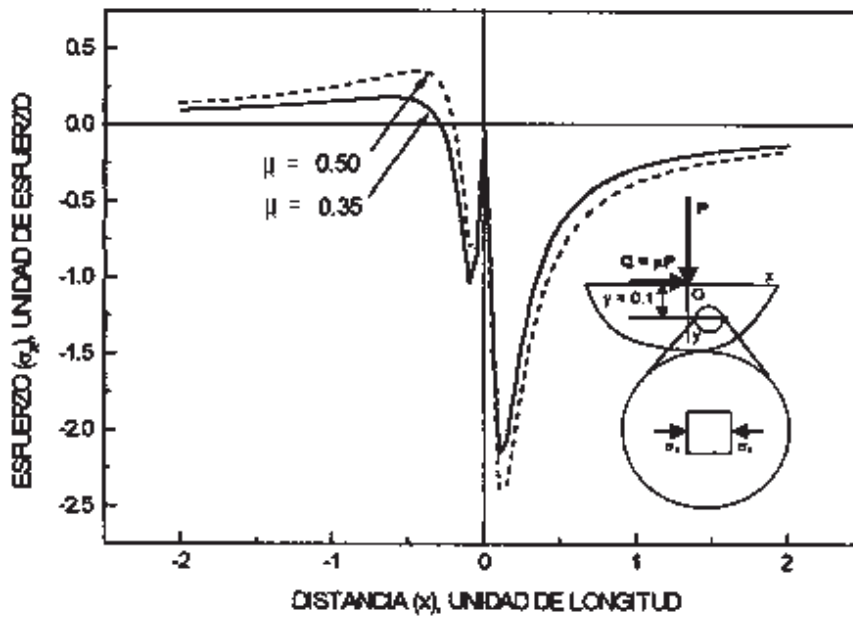


Figura 2.9 Distribución de esfuerzos normales (σ_x) producidos por la combinación de cargas lineales normales y tangenciales a lo largo de una línea a $y = 0.1$ unidad de longitud. $P = 1$ unidad de fuerza por unidad de longitud.

Para $y = 0.10$, el esfuerzo calculado va de $0.18x$ a $0.35x$ para coeficientes de fricción de 0.35 a 0.5 , respectivamente (ver Figura 2.9). Estos valores calculados muestran que un coeficiente de fricción más bajo ($\mu = 0.35$) disminuye el valor de los esfuerzos desarrollados en la superficie de contacto y zonas cercanas.

Finalmente, basados en los resultados anteriores, la superficie de contacto estará sujeta a una combinación de esfuerzos de tensión y compresión durante el proceso de desgaste cuya magnitud disminuye con la profundidad. La naturaleza cíclica (tensión y compresión) de los esfuerzos predominantes afectará el mecanismo de daño a la superficie.

2.3 DESGASTE

2.3.1 Introducción.

El desgaste, generalmente definido como una pérdida o desplazamiento progresivo de material de una superficie como resultado de un movimiento relativo entre una superficie y otra, ha sido por mucho tiempo un tema de gran interés. [31]

La creencia de que es más fácil reemplazar una pieza en lugar de diseñar una pieza con un periodo de vida adecuada pudo haber sido verdad en algún tiempo, hoy en día sin embargo, esta práctica puede resultar muy costosa.

Los ensayos de desgaste tradicionalmente han sido usados por ingenieros y científicos en materiales, para evaluar la resistencia al desgaste de los materiales con el propósito de optimizar la selección del material o el desarrollo de una aplicación determinada. Estandarización, repetibilidad, conveniencia, tiempos cortos de ensayo, así como técnicas de evaluación y medición sencillas son deseables en este tipo de ensayos.

Un ensayo de desgaste que establezca un parámetro único o la evaluación de un material no existe. Consecuentemente, se debe presentar una discusión general con relación al ensayo de desgaste con ayuda de alguna metodología.

El desgaste es uno de los tres problemas comúnmente más encontrados en la industria que llevan al reemplazo de componentes y partes industriales, los otros dos problemas son la

fatiga y la corrosión. El desgaste rara vez es catastrófico, pero reduce la eficiencia de operación con un incremento en la pérdida de potencia, consumo de aceite, y la frecuencia del reemplazo de componentes.

La fricción y el desgaste no son propiedades intrínsecas del material sino más bien son características de un sistema de ingeniería. Cualquier cambio en la carga, en la velocidad o condiciones ambientales, puede causar cambios catastróficos en la velocidad de desgaste de una o de ambas superficies en contacto, es por esto, que se debe tener gran cuidado en el ejercicio de aplicar soluciones generales a problemas particulares [29,30].

2.3.2 El fenómeno del desgaste.

Se ha encontrado que existe una confusión en la variedad de fenómenos de desgaste y de los mecanismos de desgaste. Parte del problema es por supuesto, el amplio número de variables que pueden influir en el comportamiento al desgaste, incluyendo la geometría de ensayo, la carga, las interacciones velocidad y tiempo, las propiedades del material, y factores ambientales incluyendo la temperatura. Uno de los aspectos más importantes de los ensayos al desgaste es la simulación de las condiciones reales de desgaste, esto requiere no sólo de entender la aplicación en específico, sino también los diferentes mecanismos que resultan del fenómeno de desgaste, por lo tanto se han desarrollado algunas clasificaciones del desgaste. Las más comunes son basadas en (1) los mecanismos físicos de la remoción o desplazamiento del material y (2) los mecanismos operacionales de carácter mecánico (desgaste por rodamiento, desgaste por deslizamiento, etc.) y de la interacción de los materiales (metal-metal, metal-polímero, etc.).

2.3.3 Mecanismos físicos de desgaste.

Existen muchos mecanismos físicos de desgaste, pero aquí analizaremos cuatro mecanismos principales que son: desgaste adhesivo, abrasivo, por delaminación y desgaste por oxidación. Estos mecanismos representativos sirven para ilustrar dos puntos (1) que hay más de un mecanismo distinto en un proceso de desgaste y, (2) que la sensibilidad de los

materiales a los parámetros operacionales como carga, velocidad, etc. pueden cambiar para las diferentes situaciones de desgaste.

2.3.3.1 Desgaste adhesivo.

El desgaste adhesivo ocurre cuando dos superficies se deslizan entre sí, y la presión entre las asperezas de contacto es lo suficientemente alta para causar una deformación plástica localizada y la adhesión de las asperezas. La adhesión es favorecida cuando las superficies se encuentran limpias, bajo condiciones sin oxidación y que presentan similitudes estructurales y químicas entre el par de deslizamiento o de fricción.

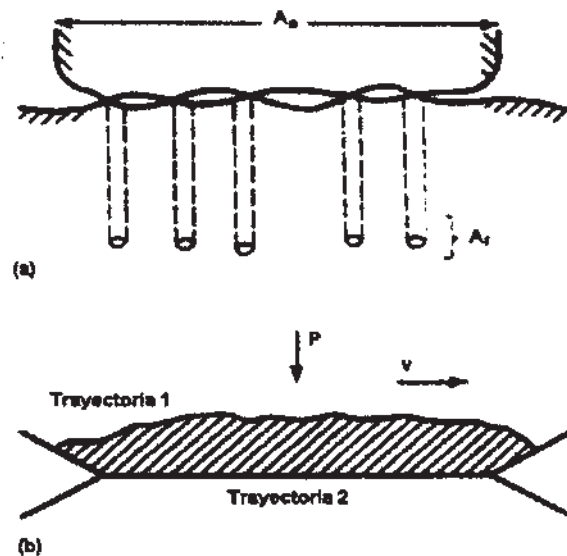


Figura 2.10 Descripción esquemática del desgaste adhesivo. a) el contacto entre dos superficies es caracterizado por A_a (área aparente de contacto) y por A_r (área real de contacto que es la suma de todas las áreas de unión), y b) el desgaste adhesivo en las uniones ocurre si el movimiento provoca la falla a lo largo de la trayectoria 1, no habrá desgaste si la falla ocurre a lo largo de la trayectoria 2.[31]

La adhesión ocurre en unas cuantas asperezas que se incrementan en tamaño conforme el movimiento continúa. Eventualmente, la ruptura en las uniones en su punto más débil, provoca una transferencia de metal de una superficie a otra (Figura 2.10). Archard ha producido una fórmula que muestra la dependencia de la velocidad de desgaste con relación a un número de factores importantes.

$$V = \frac{KSP}{H} \quad (2.7)$$

Donde: V es el volumen de desgaste en m^3 o en plg^3 producido en una distancia de deslizamiento S (en m o en plg), bajo la aplicación de una carga P (en N o en lb); H es la dureza Knoop del material suave, y K , el coeficiente de desgaste, que es la probabilidad de que la ruptura de una unión (sitio de contacto localizado entre las dos superficies) resulte en la formación de una partícula.

El coeficiente de desgaste K puede variar su magnitud, dependiendo de factores como la similitud de los materiales, la rugosidad de las superficies, la carga normal, y la limpieza o lubricación de las superficies. En general, cuanto más limpias estén las superficies y más afines sean los materiales, más altos son los valores de K . Con una superficie demasiado rugosa o demasiado lisa resultan valores de K más altos que los óptimos. Al mismo tiempo cargas elevadas pueden provocar ruptura de capas de óxidos y la penetración de lubricantes, el coeficiente de desgaste K generalmente se incrementa con la carga. La lubricación decrece los valores de K , la extensión del decremento depende de la habilidad del lubricante para separar las superficies. Una lubricación deficiente da como resultado una gran cantidad de contacto entre las superficies, mientras que una excelente lubricación permite el proceso opuesto. [31]

2.3.3.2 Desgaste abrasivo.

El desgaste abrasivo ocurre cuando una partícula dura penetra en una superficie blanda y desplaza material como resultado de un movimiento relativo entre dos superficies, la superficie que era lisa se convierte en una superficie con acanaladuras o surcos de forma regular. Este proceso básico se muestra en la Figura 2.11. Este tipo de desgaste está dado por una ecuación similar a la Ecuación 2.7, en la cual el coeficiente de desgaste K relaciona la geometría y el filo de la aspereza o partícula que causa el desgaste.

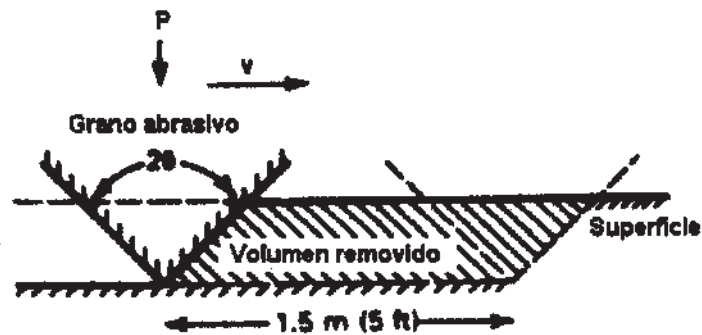


Figura 2.11 Esquema del desgaste abrasivo. [25]

Al igual que en el desgaste adhesivo, el coeficiente de desgaste K para el desgaste abrasivo, puede variar en algunos órdenes de magnitud. Un factor que puede influir bastante en la magnitud de K , es el grado de libertad de la partícula abrasiva, por ejemplo, una partícula puede producir un desgaste significativamente mayor cuando ésta se encuentra sujeta de una superficie (como es el caso del papel abrasivo) que cuando se encuentra libre de movimiento, puesto que en la primera forma, la partícula es arrastrada mientras que en la segunda la partícula puede rodar [31].

2.3.3.3 Desgaste por delaminación.

A diferencia del desgaste por abrasión y adhesión, los cuales explican la pérdida o desplazamiento de material como resultado de una simple interacción, el desgaste por delaminación requiere de múltiples interacciones. En el desgaste por delaminación una superficie experimenta una serie de esfuerzos cíclicos que conducen a un agrietamiento, seguido por una coalescencia de las grietas para finalmente dar como resultado un desgaste o pérdida de material, este proceso lo muestra la Figura 2.12.

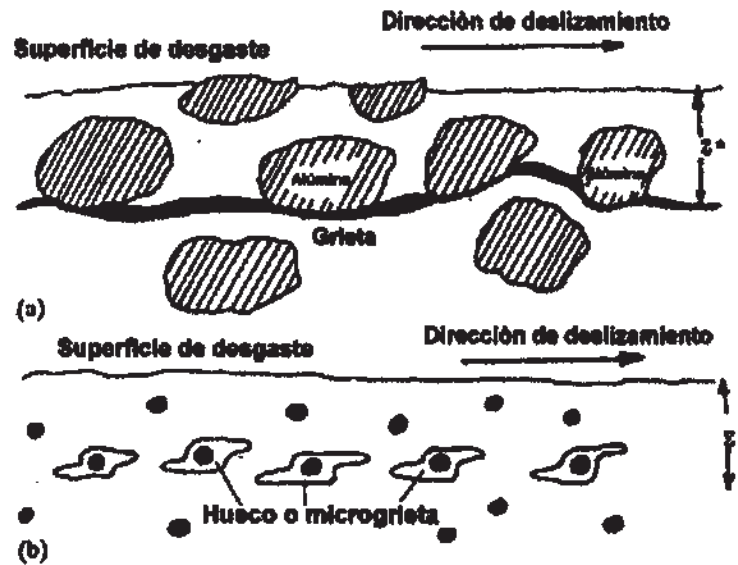


Figura 2.12 Mecanismo de desgaste por delaminación. [31]

La fatiga depende en gran medida del estado de esfuerzos, muchos estudios indican que la velocidad de desgaste es proporcional a: $\sigma_{\text{máx}}^n$ donde n es del orden de 8 a 9. Generalmente el desgaste por delaminación tiene como resultado velocidades de desgaste menores que la abrasión o la adhesión. [31]

2.3.3.4 Desgaste por oxidación.

En el desgaste por oxidación, la superficie del material es cambiada químicamente por factores ambientales, esto tiene como resultado la formación de una capa superficial con propiedades que difieren de aquellas del resto del material, consecuentemente, esta capa de material tendrá un comportamiento al desgaste diferente. Esto de alguna manera induce a la fractura en la interfase entre la capa superficial y el resto del material, produciendo la remoción de toda la capa superficial. En tal caso el comportamiento al desgaste efectivo del sistema está en función del tiempo que tarda la capa superficial en crecer y el contacto al desgaste. Una descripción matemática del desgaste por oxidación es:

$$V = K_F T \left[\frac{AP}{H_m} \right]^{1/2} \quad (2.8)$$

Donde: V es la velocidad de desgaste en volumen (m^3/s o plg^3/s), K_F es la probabilidad de falla, T es la velocidad de crecimiento de la capa de óxido (m/s o plg/s), A es el área aparente de contacto (m^2 o plg^2), P es la carga (N o lb) y H_m es la dureza Knoop. Se asume que alguna capa de óxido se forma entre los contactos y que ésta se fractura entre la interfase y el substrato con una probabilidad K_F .

Haciendo una comparación entre las Ecuaciones 2.7 y 2.8, se puede observar que en el desgaste por oxidación los parámetros químicos son más significativos que los mecánicos. El comportamiento al desgaste de un material cuando se presenta el mecanismo de desgaste por oxidación, depende de las transiciones de resistencia al corte, y se esperan que se encuentren en función de parámetros como velocidad y temperatura, por un lado, el material puede no presentar capas o puede presentar la formación de capas delgadas, mientras que por otro lado la formación de una capa puede ser evidente. A velocidades altas de deslizamiento, la superficie no tendrá el tiempo suficiente para oxidarse, pero a velocidades bajas si se tendrá la formación de una capa. La formación de una capa no necesariamente significa un incremento en el desgaste, de hecho, ciertas capas reducen el desgaste. Por ejemplo, algunos óxidos de cobre y el acero tienen excelente resistencia al desgaste. [31]

2.3.3.5 Otras formas de desgaste

El desgaste por ludimiento aparece como resultado del movimiento oscilatorio de dos superficies en contacto, como sucede en máquinas donde existe vibración entre las partes. El desgaste por fatiga surge como resultado de las cargas cíclicas; por ejemplo, en los baleros con rodillos que produce pérdida de material al desbastarse las capas superficiales. Cuando las partículas duras inciden sobre los sólidos, se produce desgaste por erosión, y cuando un componente rota en un medio fluido, habrá erosión por cavitación.

2.4 EXPERIMENTOS DE FRICCIÓN Y DESGASTE

Aunque se cuenta con datos sobre el desgaste obtenidos en pruebas llevadas a cabo en máquinas reales, los estudios de laboratorio se realizan en condiciones controladas que simulan los movimientos observados en las situaciones reales. Con frecuencia, en la misma máquina, se obtienen resultados sobre fricción y desgaste.

Existen varias máquinas para evaluar la fricción y el desgaste y aquí se presentan los principios de operación de algunas de ellas. El primer requisito es diseñar un par metálico que proporcione una interfase de rozamiento. Esto puede hacerse fijando una espiga sobre una barra de carga, teniendo aquella la forma de una varilla o un hemisferio. La barra de carga se diseña para soportar la carga normal, pero se mide la deflexión debida al arrastre friccional entre la espiga y la superficie opuesta; una calibración adecuada proporciona el valor de la fricción.

En Figura 2.13 puede observarse como la espiga corre sobre una mesa oscilante, la superficie plana (1) es capaz de moverse en las direcciones de las flechas; la espiga (2) está fija a un anillo (5); la carga normal se aplica a través del anillo por medio de un tornillo (3) y la carga se evalúa por la deflexión del anillo. Un brazo horizontal (4), fijo a una suspensión bifilar está también fijo al anillo (5) y el arrastre friccional provoca una deflexión que se puede medir.

En la Figura 2.14 se observa la espiga (2), fija a una barra horizontal de carga (3) pasa por un buje rotatorio (1). La barra de carga está fija a un resorte (4) cuyo extremo está fijo a un soporte rígido (5). El arrastre friccional hace que el resorte se estire. La aguja (6) fija al resorte, se puede unir a un trozo de hierro suave suspendido en un campo magnético. La deflexión de la aguja debido a la fricción hará que el núcleo de hierro se mueva provocando un cambio en la fuerza del campo inducido. La señal resultante se puede amplificar y registrarse.

La Figura 2.15 muestra la espiga en forma de un cilindro colocado a través de otro cilindro mayor. En la Figura 2.16 aparece una espiga cilíndrica o hemisférica que rota sobre un buje

o un cilindro. La deflexión de la barra de carga se mide por medio de transductores o calibradores de deformación

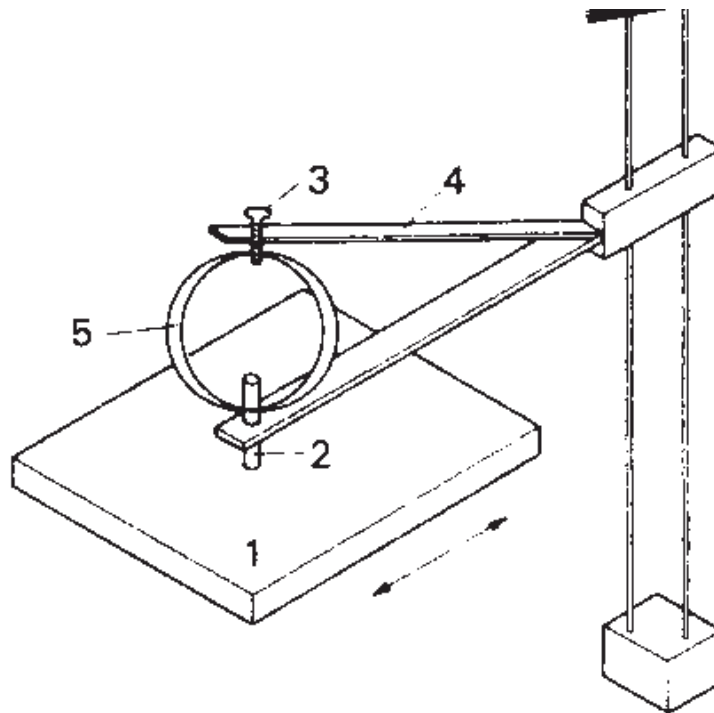


Figura 2.13 Esquema de un aparato para medir la fricción con cargas ligeras. [2]

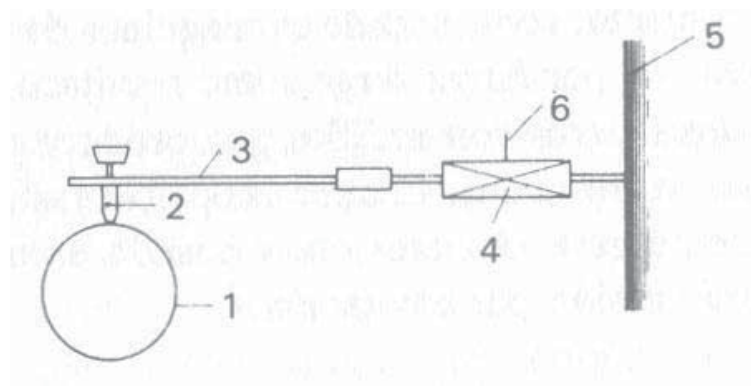


Figura 2.14 Máquina de espiga y buje. [2]

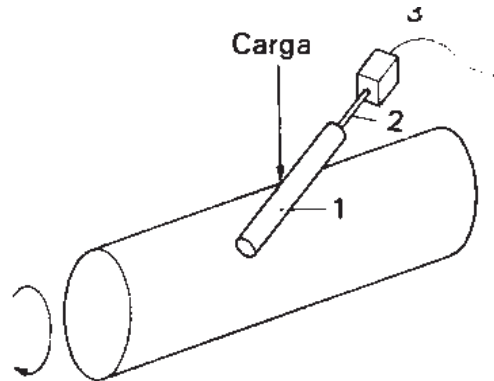


Figura 2.15 Cilindro cruzado (1) montado sobre un resorte (2). El movimiento debido al arrastre friccional se mide por medio de un transductor (3). [2]

La fricción y el desgaste también pueden ser medidos en una máquina de cuatro bolas o por medio de pruebas con discos. El propósito principal de la primera es evaluar las propiedades antiadherentes de los aceites, pero también puede utilizarse como probador de desgaste. En un anillo se colocan tres bolas de acero de 12.5 mm de diámetro que estén en contacto entre sí y una cuarta bola se fija al extremo de una flecha vertical poniéndola en contacto con las otras tres bolas inferiores. Una palanca que soporta un peso ajustable comprime a las tres bolas estacionarias sobre la cuarta y el momento de torsión que se transmite se mide durante la rotación de la flecha vertical. El coeficiente de fricción se registra durante la prueba y se miden las huellas causadas por el desgaste sobre las tres bolas. En la máquina de discos, se hace rotar un disco bajo carga contra otro, como normalmente se hace para simular estudios de diseño de engranes. Un disco se encuentra sobre un balero rígido, mientras que el otro se sujeta en un dispositivo oscilante.

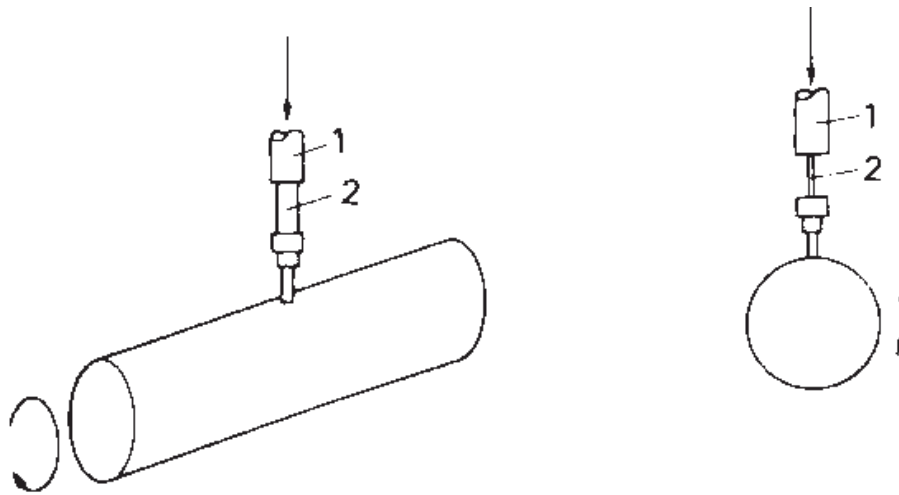


Figura 2.16 Barra de carga (1) con calibradores de deformación montados sobre la sección reducida (2). La flexión de la barra debido a la fricción desequilibra un circuito puente. [2]

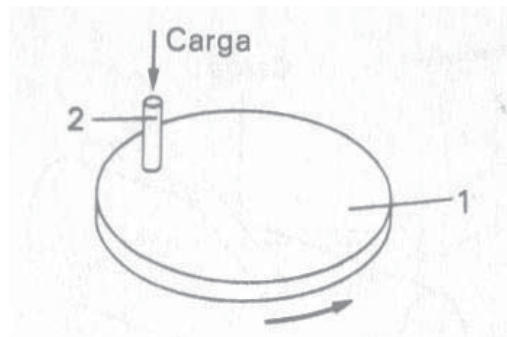


Figura 2.17 Máquina de espiga y disco. (1) Disco; (2) Espiga.

La máquina de espiga-disco es un aparato muy usado para pruebas de desgaste (Figura 2.17) en el que la espiga se monta en forma normal. Las variables son: la carga normal, la velocidad de deslizamiento, la atmósfera y la temperatura ambiente. La cantidad de desgaste puede establecerse pesando la espiga en una microbalanza. Una prueba de desgaste completa requiere el registro de la pérdida de peso en relación con los intervalos de deslizamiento para obtener el desgaste inicial durante el arranque y en el estado estacionario. Es importante trabajar en condiciones de estricta limpieza química y el método requiere extremo cuidado. Un método alternativo es utilizar una espiga cónica y montarla sobre una barra de carga con bisagras. Se hace correr la espiga y, después de

detener la máquina, la barra de carga se corre haciéndola oscilar 180° (Figura 2.18) y se mide el diámetro de la huella de desgaste de manera que, sabiendo el ángulo del cono, se puede calcular la pérdida en volumen.

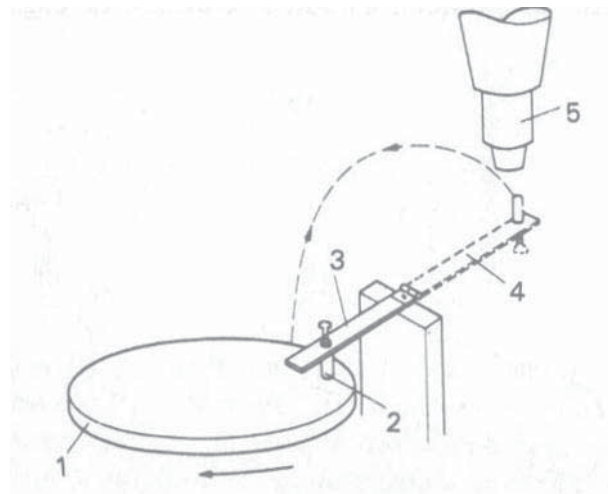


Figura 2.18 Barra de carga con bisagra. (1) Disco; (2) Espiga; (3) Barra de carga; (4) Barra de carga desplazada 180° para medir la huella del desgaste por medio de un microscopio (5). [2]

La configuración de cilindro cruzado que se muestra en la Figura 2.15 también se usa para experimentos de desgaste. La huella de desgaste sobre la espiga cilíndrica es elíptica y los ejes mayor y menor se miden con un microscopio. Halling demostró que si la profundidad de esta huella de desgaste es pequeña y si $2r$ es el diámetro menor de la elipse obtenida, el volumen V del metal perdido está dado por [2]:

$$V = \frac{\pi}{4} \left(\frac{r_s}{r_b} \right)^{\frac{1}{2}} r \quad (2.9)$$

Donde: r_s y r_b son los radios de los cilindros rotatorio y estacionario, respectivamente.

Las máquinas para determinar el desgaste se pueden instalar en una cámara para experimentación dentro de una atmósfera controlada, pero si los elementos deben estar completamente libres de contaminantes, es necesario emplear un vacío del orden de 10^{-12} torr. Este procedimiento es costoso, pero la idea de Halling de usar un torno es una forma

ingeniosa y barata de generar superficies limpias al maquinar el cilindro rotatorio con una herramienta de corte.

2.4.1 Ensayo de desgaste.

2.4.1.1 Configuración "Espiga sobre disco".

Este método de ensayo de desgaste describe un procedimiento de laboratorio para determinar el desgaste de los materiales durante un deslizamiento usando un aparato de espiga sobre disco. Los materiales son evaluados en pares bajo condiciones no abrasivas. También el coeficiente de fricción puede ser determinado mediante esta configuración.

Para el ensayo de desgaste "Espiga sobre disco", se requieren dos especímenes, el primero es una espiga (E) que es colocada perpendicularmente a la otra superficie, la cual es usualmente un disco (D) cuya superficie es lisa, el plano del disco puede ir orientado de manera horizontal o perpendicular, como lo muestra a Figura 2.19. La espiga es presionada contra el disco bajo una carga específica usualmente por medio de un brazo o un nivel, sobre el brazo se coloca el peso determinado.

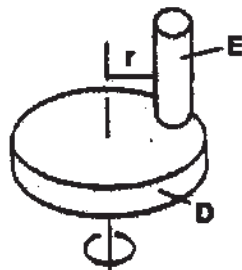


Figura 2.19 Esquema de un sistema de ensayo de desgaste "espiga sobre disco". [31]

Un tipo de sistema típico consiste en conectar el disco a un motor por medio de algún mecanismo adecuado para hacerlo girar a un número determinado de revoluciones, además la espiga puede sujetarse a un portamuestras que a su vez puede estar conectado a un brazo, este brazo debe tener la posibilidad de elevarse para colocar y quitar la espiga a desgastar, la espiga debe estar sometida a una carga determinada y colocarse sobre el disco para

forzarla a deslizarse contra el disco en movimiento. La máquina debe estar equipada con un odómetro para medir las revoluciones [29].

2.4.2 Medición del desgaste.

2.4.2.1 Pérdida de masa.

Muchos métodos, tanto cualitativos como cuantitativos, han sido utilizados para determinar las cantidades de desgaste en los materiales, y existe un número de razonamientos por los cuales esta situación existe, la primera es que el tipo de daño ocasionado por el desgaste puede tomar diferentes formas, si el material se pierde durante el desgaste, entonces un método comúnmente utilizado es determinar la cantidad de material removido (por pérdida en peso). Alternativamente, si el proceso de desgaste lleva a alguna tensión superficial en algún componente, entonces la rugosidad o el agrietamiento puede ser medido. Aunque es posible encontrar otras formas de desgaste superficial o subsuperficial, éste también puede ser medido, ya sea por métodos directos o indirectos. El desgaste puede ser determinado ya sea midiendo el cambio en masa o el cambio en dimensiones del material a desgastar. Para las mediciones del cambio en masa es necesario que la parte original o el espécimen sea pesado y que el peso del objeto después de ser expuesto al desgaste sea determinado y sustraído del original para determinar la diferencia en peso (esto es el cambio en masa). Puesto que las partes involucradas se vuelven más pequeñas y más ligeras, o la pérdida en masa se vuelve más pequeña, es necesario utilizar un equipo para la medición del peso con una alta sensibilidad [29].

2.4.2.2 Pérdida de volumen.

En una extensa proporción de reportes que contienen mediciones de desgaste, se puede encontrar que las cantidades de desgaste se encuentran reportadas en unidades de volumen, por ejemplo mm^3 . Esto permite una mejor comparación de las cantidades de desgaste que tienen los materiales de diferentes densidades, y permite también un cálculo fácil de las cantidades de desgaste lineal. Muchos de los estándares para los ensayos de desgaste requieren el reporte del desgaste en unidades de volumen [29].

CAPITULO III. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

3.1 EL EQUIPO DE DESGASTE

3.1.1 Configuración del ensayo

Para el ensayo de desgaste “espiga sobre disco”, se requieren dos especímenes, el primero es una espiga (E) que es colocada perpendicularmente a la otra superficie, la cual es usualmente un disco (D) cuya superficie es lisa, el plano del disco puede ir orientado de manera horizontal o perpendicular, como lo muestra la Figura 3.1. La espiga es presionada contra el disco bajo una carga específica usualmente por medio de un brazo o un nivel, sobre el brazo se coloca el peso determinado. La Figura 3.2 muestra la implementación de las principales partes del dispositivo.

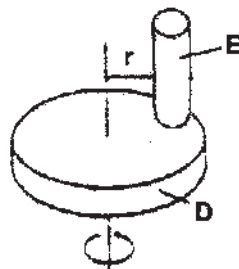


Figura 3.1 Esquema de un sistema de ensayo de desgaste “pin on disk”.



Figura 3.2 Imagen del prototipo en fabricación.

La base del sistema debe ser de construcción rígida, de tal manera que disminuya al máximo las vibraciones. Debe contener también un sistema que permita ajustar la posición de la probeta en diferentes puntos sobre el disco de desgaste, como se muestra en las Figuras 3.4 y 3.5.

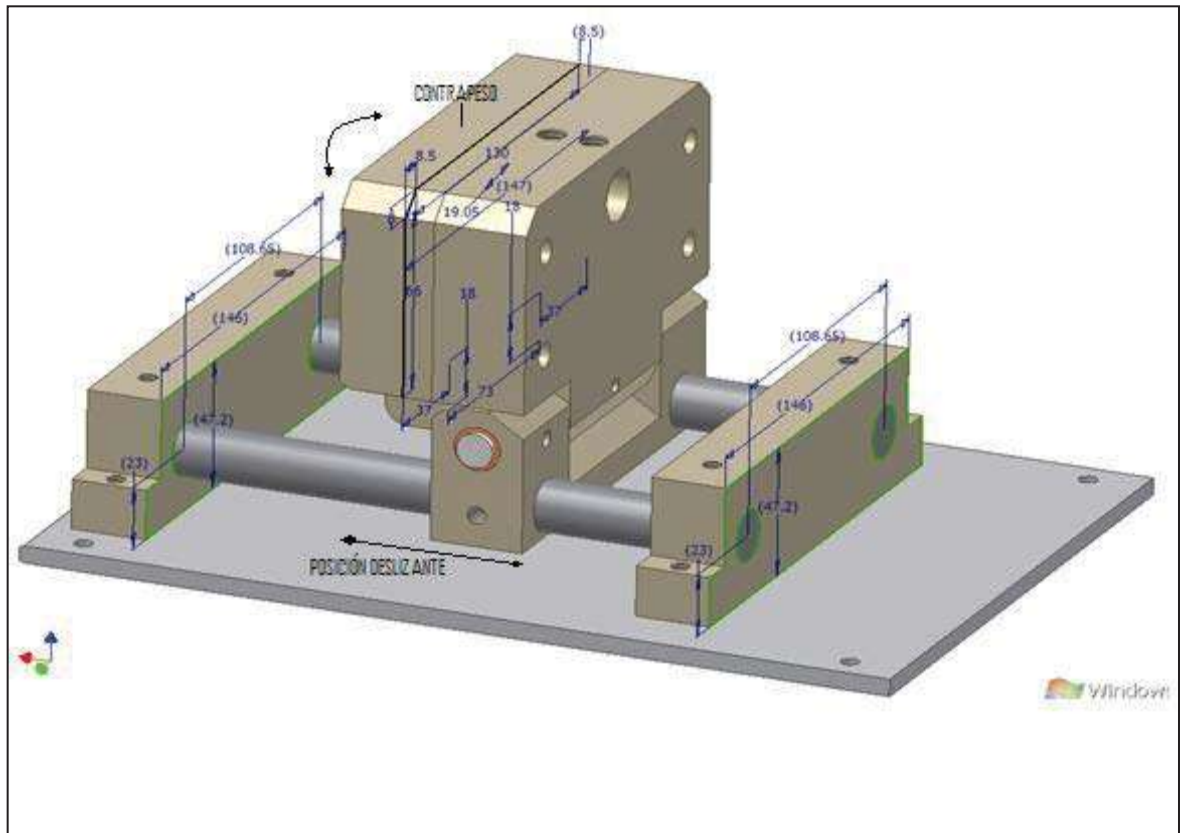


Figura 3.4 Base con sistema de sujeción deslizante y contrapeso.

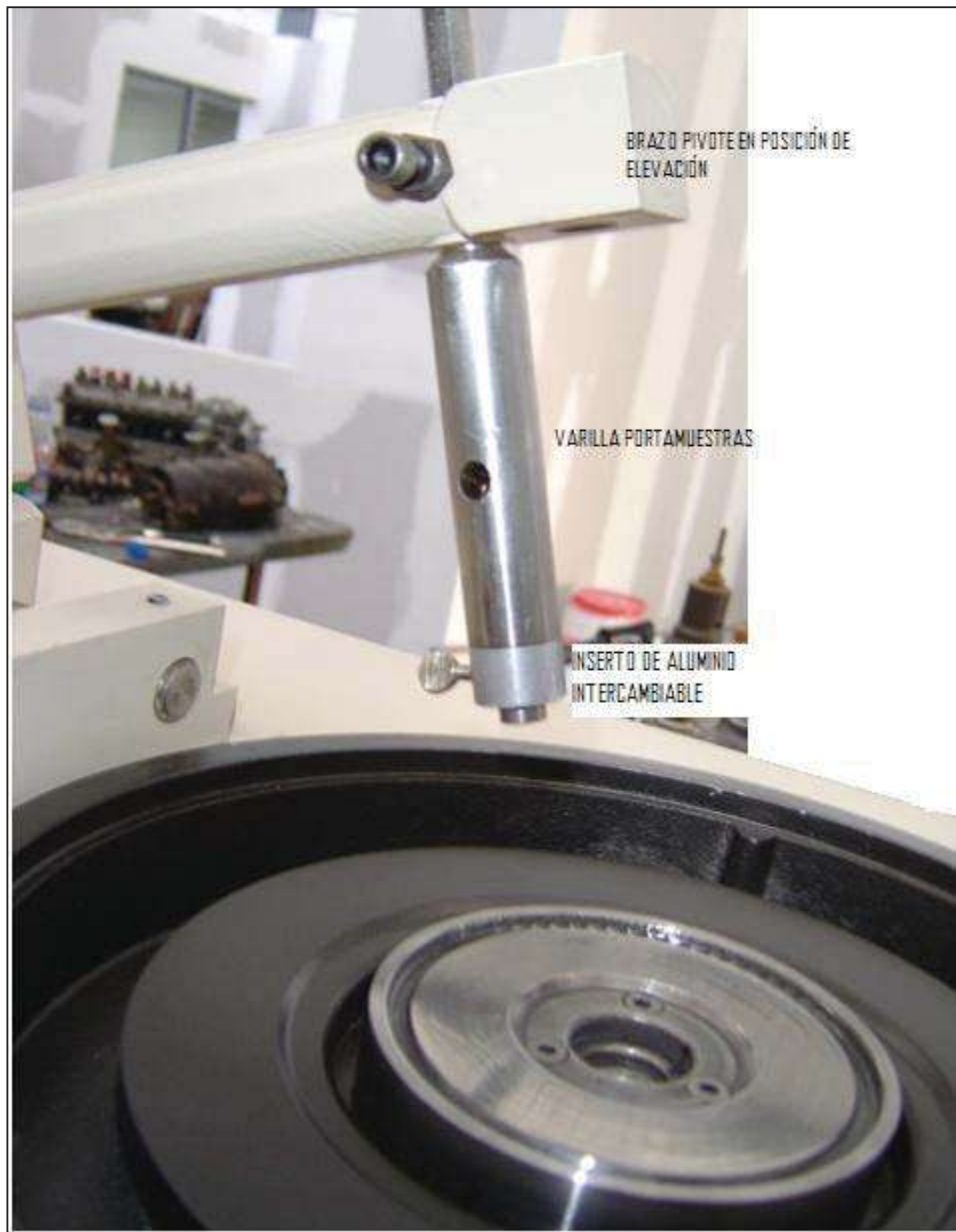


Figura 3.6 Elementos de posicionamiento de la muestra sobre el disco de desgaste.

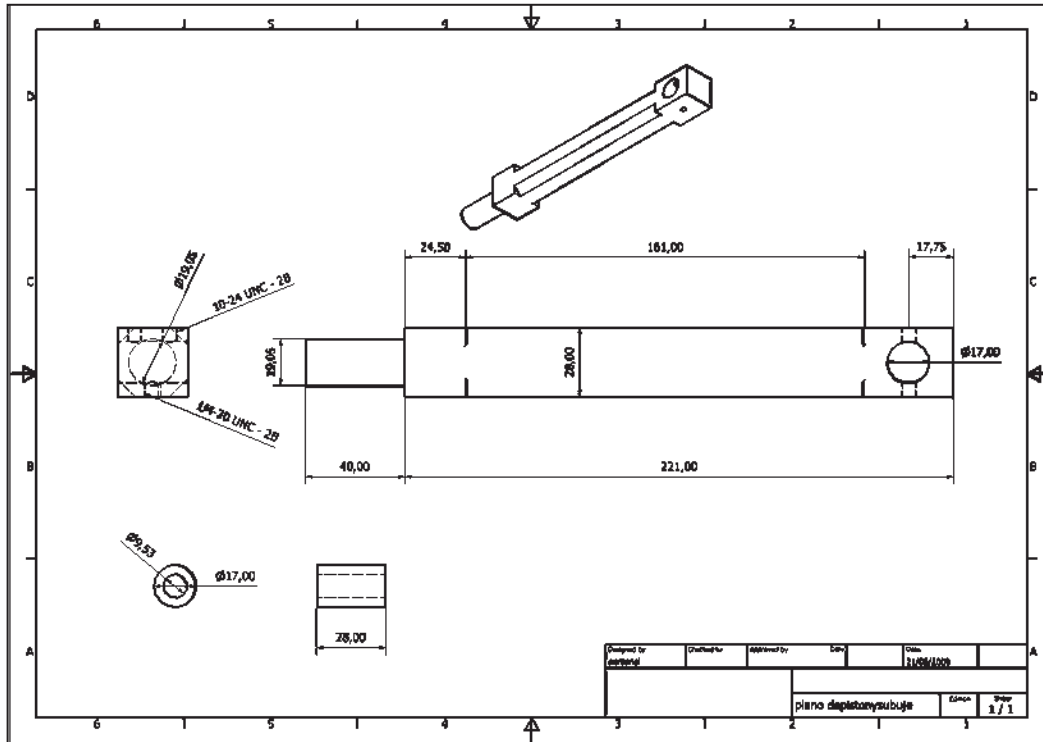


Figura 3.8 Dimensiones del brazo pivote.

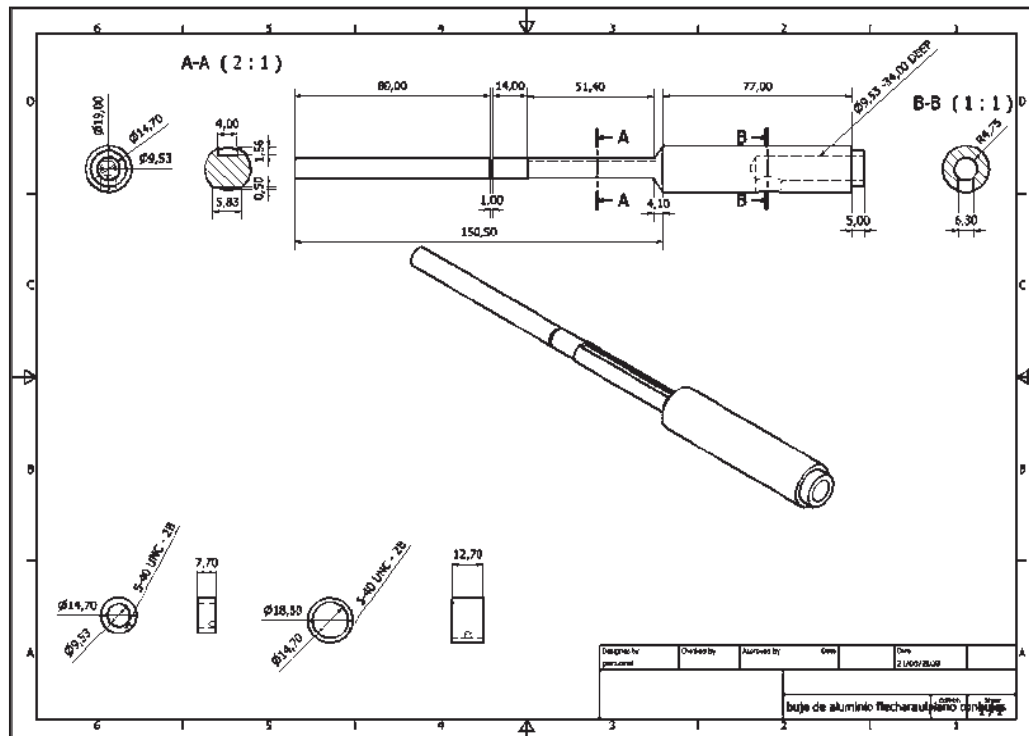


Figura 3.9 Dimensiones de la varilla porta muestra.

3.1.1.2 Disco de desgaste

Construido en acero AISI 4340, tiene un diámetro exterior de 110 mm y una pista de deslizamiento de 51 mm de diámetro interno y 92 mm de diámetro externo (Figuras 3.10 y 3.11). Incluye un canal para recolección de fragmentos de desgaste. Sometido a tratamiento térmico de temple y revenido que incrementó su dureza de 27.8 HRC hasta 55.9 HRC. En su pista de deslizamiento se pueden llevar a cabo varias pruebas en distintos puntos ya que tiene un ancho de 21 mm. Por su espesor, el disco puede someterse a diversas cargas sin sufrir deformaciones.

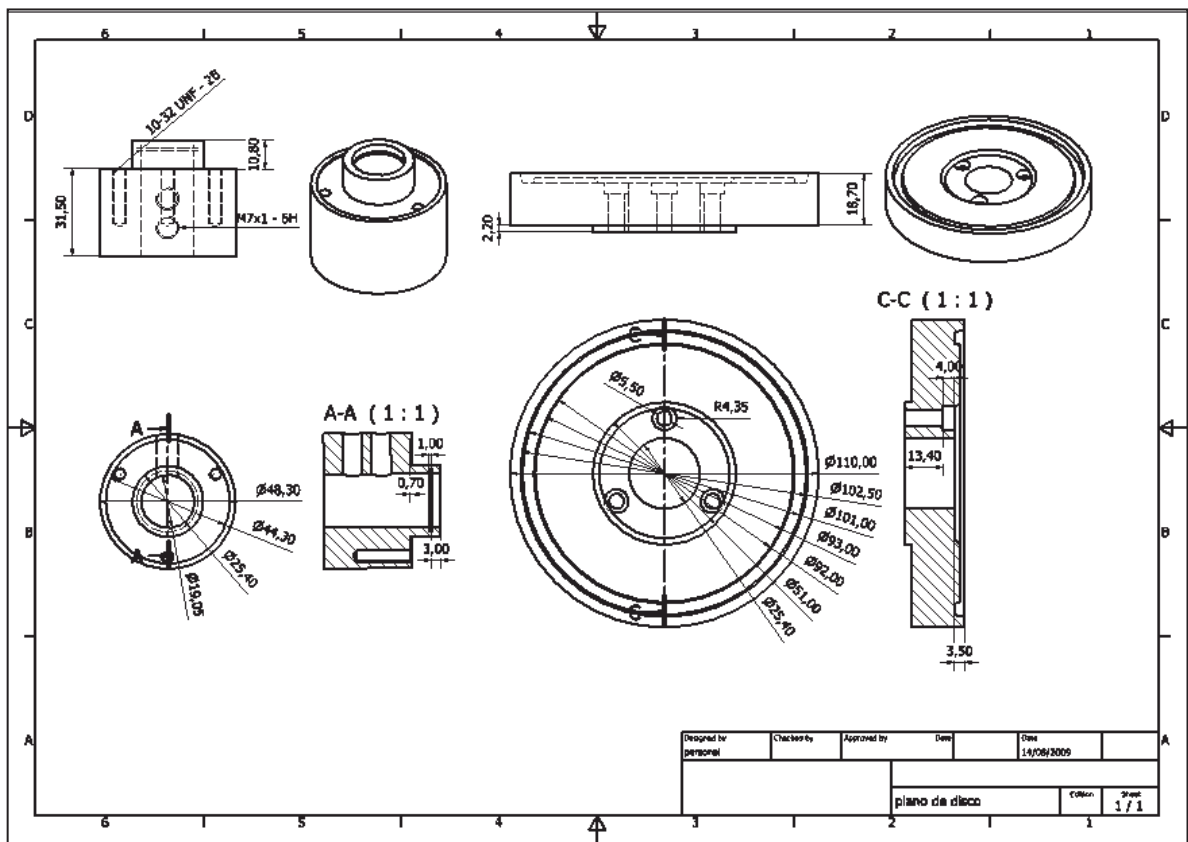


Figura 3.10 Dimensiones del disco de desgaste.

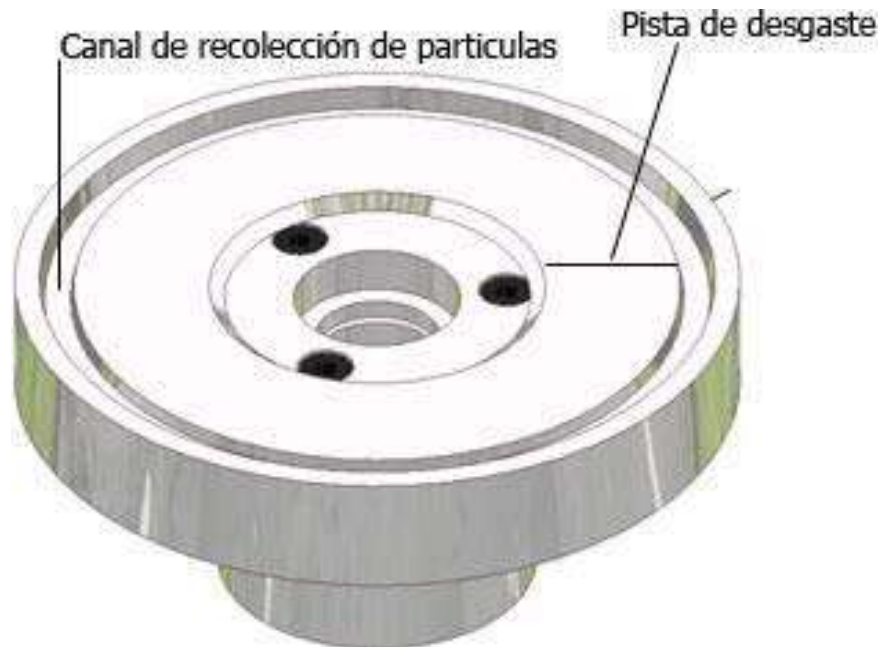


Figura 3.11 Pista de desgaste y canal de recolección de partículas.

3.1.2 Instrumentación

3.1.2.1 Control de velocidad del motor

Este tipo de control requiere de un variador de velocidad capaz de mantener la velocidad constante ($\pm 1\%$ a carga completa de la velocidad del motor). El motor debe ser instalado de manera que la vibración no afecte el proceso. La velocidad de rotación típica esta en los rangos de 0.3 a 3 rad/seg (60 a 600 rev/min).

Se instaló el control de velocidad BALDOR (Figura 3.12) de estado sólido para motores de corriente directa incluye:

- La circuitería integrada.
- Control para proporcionar la regulación de motor superior. Los cambios de velocidad debido a la carga, voltaje de la línea, o variaciones de temperatura se mantiene en niveles mínimos.
- Componentes de alta calidad

- Protección transeúnte
- Alta confiabilidad

APLICACIONES:

Tipo de motor: se diseñan para motores de CD de imán permanente y ser operados a 115 voltios de entrada del CA y rangos de 90 voltios.

- Los requisitos de torque: Al reemplazar un motor de inducción de CA con un motor de DC y mando de velocidad, debe darse la consideración para los requisitos del torque máximo.
- La aceleración inicial: Provee un control de aceleración ajustable que permite que el motor acelere de 0 al máximo en un tiempo de 2-10 segundos.
- Las limitaciones de uso. Se diseñan los controles para su uso en aplicaciones de máquinas.



Figura 3.12 Aspecto del control de velocidad para motor de CD.

3.1.2.2 Contador de revoluciones (tacómetro)

La máquina se equipó con un contador de revoluciones para indicar el número de revoluciones por minuto del disco, de preferencia que se pueda preseleccionar la velocidad del motor.

El tacómetro de la serie DTM8000 BALDOR mostrado en la fig. 3.13 está basado en un microprocesador con programación de campo. Esto permite programar los parámetros de operación deseados.



Figura 3.13 Tacómetro Digital BALDOR.

Tacómetro en modo velocidad: Este modo se usa para desplegar RPM, FPM, u otras unidades de la ingeniería deseadas. La programación del tacómetro no sólo muestra la velocidad del motor, sino también las velocidades de árboles manejadas del motor. Las fórmulas de la programación toman en cuenta proporciones para lograr las lecturas del despliegue deseadas. El punto decimal es seleccionable y puede apagarse. La programación del tacómetro se muestra en el Anexo 1.

Especificaciones: Funciona a base de un microprocesador programado para operar con señales emitidas por un sensor de velocidad acoplado a la flecha de un motor, en rangos de revoluciones por minuto.

- Capaz de medir las velocidades de la flecha tan bajas como 1 RPM.
- Indicador de 4 dígitos.
- 120VAC \pm 10%, 50/60 Hz. de voltaje a la entrada.
- Instrucciones programadas en memoria no-volátil.
- Resolución de 0.01 RPM.
- Precisión \pm 0.04%; la actualización del indicador en cada pulso o cada 0.5 segundos, el más largo.
- Suministro de poder para CA autónomo para la entrada de un transductor.
- Temperatura de operación de -10°C a 45°C.
- Señal máxima de entrada de 30,000 pulsos por minuto
- Campos programables, seleccionados por los interruptores interiores.
- Programable en el modo del auto rango.



Figura 3.14 Instrumentación de control: (de izquierda a derecha) luz indicadora de encendido, botonera de arranque y paro de motor, tacómetro y selector de velocidad en rpm.

3.1.2.3 Sensor de velocidad

El sensor de velocidad modelo HPU10 marca BALDOR (figura 3.15) es una forma económica de monitorear la velocidad de un motor. Con sus partes para instalarse en forma fácil y sencilla. El HPU10 opera con alimentación de +5V, produciendo una frecuencia de 5 volts que es proporcional a la velocidad, emitiendo 10 pulsos por revolución. Esta señal es alimentada al tacómetro DTM8000 como una referencia de la velocidad para el microprocesador. El montaje del sensor se presenta en el diagrama de la Figura 3.16.

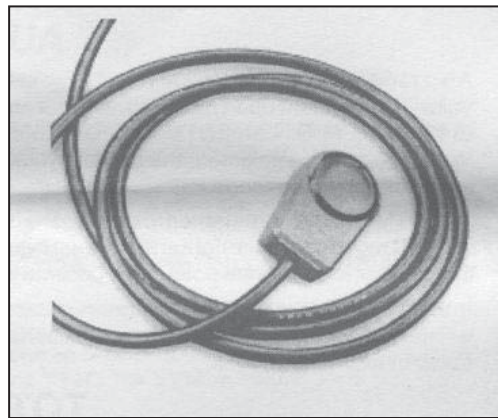


Figura 3.15 Sensor de velocidad.

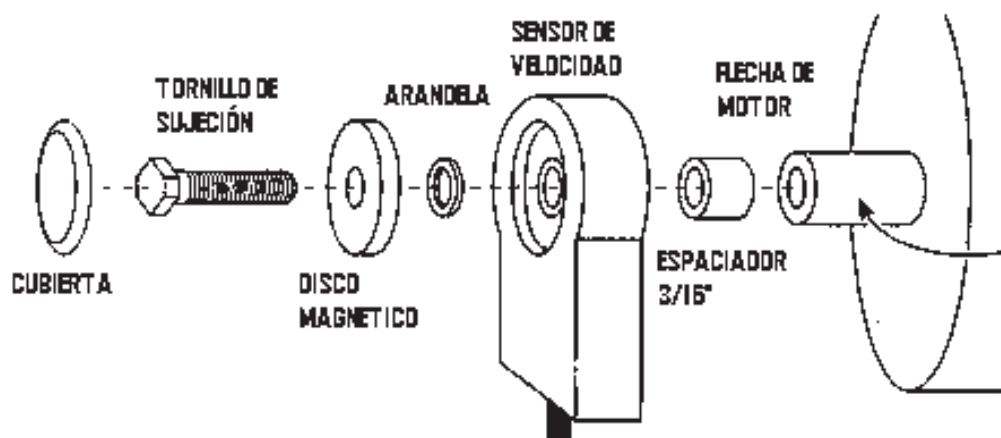


Figura 3.16 Montaje del sensor de velocidad en la flecha del motor eléctrico.

3.1.2.4 Motor eléctrico

Para este prototipo se utilizó un motor eléctrico de Corriente Directa con las siguientes características:

MARCA	RELIANCE
POTENCIA	0.75 HP
VELOCIDAD	2500 RPM
VOLTAJE	90 VOLTS
AMPERAJE	7.5 AMPS

El motor está acoplado a un reductor de velocidad de relación 4:1 y tiene una dirección de salida a 90° con respecto de la entrada. De igual manera se le colocó el sensor de velocidad en la parte posterior de la flecha, como se ilustra en la Figura 3.17.



Figura 3.17 Motor eléctrico (A) acoplado al reductor de velocidad (B) y al sensor de velocidad (C).

3.2 ENSAYO DE DESGASTE DEL ACERO EXPERIMENTAL

3.2.1 Desarrollo experimental

A continuación se describe el procedimiento experimental utilizado en el presente trabajo de investigación.

La secuencia experimental comienza con el conocimiento de las características del material de estudio y del material con el que se fabricó el disco de desgaste para el desarrollo del ensayo “espiga sobre disco”. Posteriormente se realizó un tratamiento térmico de temple al disco para obtener una dureza adecuada para su aplicación, para enseguida implementar el dispositivo de desgaste y se realizaron los ensayos respectivos.



Figura 3.18 Esquema de la secuencia experimental.

Posteriormente se analizaron y discutieron los resultados obtenidos en el ensayo mediante una caracterización de las partes desgastadas, aplicándose técnicas de microscopía electrónica de barrido y microscopía óptica. La figura 3.18 muestra la secuencia experimental.

3.2.2 Materiales utilizados

3.2.2.1 Características del material sometido a desgaste

En cuanto al material base de este estudio, se trata de una placa de acero especial con alto contenido de manganeso (Mn- 20%, Al-2%, Si-2%, C-0.4%, Fe- Balance), de 5.5 x 7.0 x 0.8 cm, al cual se le realizó un recargue con soldadura 7018 con la finalidad de aumentar su espesor y así obtener una mejor superficie de sujeción en el porta muestras durante el ensayo de desgaste.

En cuanto a propiedades mecánicas, este material, luego de haber sido laminado en caliente y solubilizado, presenta una resistencia a la cedencia de 346 MPa, resistencia máxima de 758 MPa y elongación de 79.2%. Al material en estado de colada se le realizó un tratamiento térmico de normalizado durante 2 horas a una temperatura de 900° C y enfriado al horno para eliminar la alta segregación y homogeneizar su microestructura. Durante el ensayo de dureza se obtuvo un valor de 93 HRB. La placa fue rectificada y cortada en barras de 0.8 x 0.7 x 7.0 cm (Figuras 3.19 y 3.20) para finalmente obtener probetas de 0.6 x 0.7 x 0.8 cm. (Figura 3.21)



Figura 3.19 Dimensiones de la sección longitudinal.

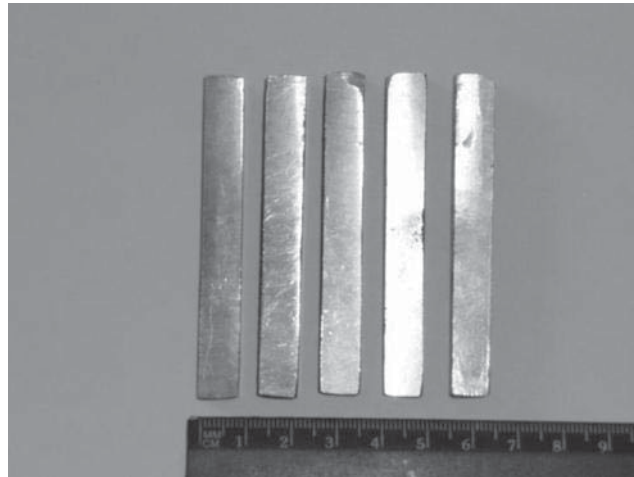


Figura 3.20 Dimensiones de la placa cortada en barras.

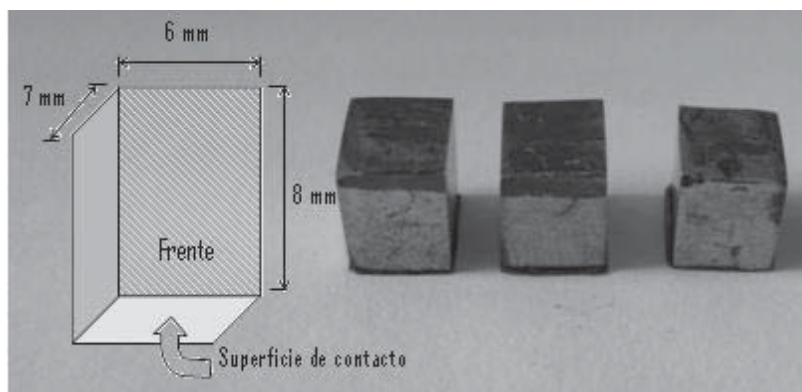


Figura 3.21 Forma y dimensiones en mm de la probeta a desgastar.

3.2.2.2 Preparación de las muestras

Una vez maquinadas las probetas con las dimensiones ya descritas, fueron rectificadas con una piedra de desbaste hasta obtener superficies paralelas y planas, posteriormente fueron lijadas para eliminar las rayas generadas durante el rectificado. Se utilizaron lijas de granulometría 220, 320, 400, 600, 800, 1000 y 1200. Finalmente, las probetas fueron limpiadas con alcohol etílico para evitar la formación de óxido en la superficie.

3.2.2.2.1 Densidad

Para el ensayo de desgaste se determinó realizar la medición del desgaste en masa, ya que por las dimensiones estrechas de las probetas resultaría complicado realizar una medición

física durante el ensayo de desgaste para determinar la pérdida de volumen. Sin embargo, se puede determinar la pérdida de volumen si se conoce la densidad del material.

La obtención de la densidad del material fue a través de un Picnómetro de Helio de la marca Micromeritics modelo AccuPyc 1330 (Figura 3.22) ubicado en el Laboratorio de Materiales Cerámicos del Instituto de Investigaciones Metalúrgicas, obteniendo los valores mostrados en la Tabla 3.1.



Figura 3.22 Picnómetro de Helio

Tabla 3.1. Valores de la densidad del material			
Densidad gr/cm³	Desviación estándar	Densidad gr/cm³	Desviación estándar
7.6469	0.0022	7.6452	0.0004
7.6453	0.0005	7.6421	-0.0027
7.6436	-0.0011	7.6447	0.0000
7.6461	0.0014	7.6442	-0.0006
7.6457	0.0009	7.6437	-0.0010
	PROMEDIO	7.6448	0.0000

Al no existir valor para la desviación estándar, se obtuvo que la densidad del material es de 7.6448 gr/cm^3 . La medición de la masa de las probetas se llevó a cabo mediante una balanza analítica de la marca OHAUS (Figura 3.23) con capacidad de 210 gramos y una resolución de ± 0.0001 gramos.



Figura 3.23 Balanza analítica OHAUS.

Con los datos anteriores y mediante la expresión 3.1, se determinó el volumen de cada una de las probetas:

$$v = \frac{m}{\rho} \quad (3.1)$$

Donde: v = volumen (cm^3); m = masa (gr) y ρ = densidad (gr/cm^3)

3.2.2.3 Disco de desgaste

Para la fabricación del disco de desgaste utilizado en este trabajo se utilizó un acero AISI 4340. Este acero es uno de los mejores aceros grado maquinaria por su alto contenido de aleación (Cr, Ni, Mo), posee una excelente y profunda templabilidad, buena tenacidad y

ductilidad y por su elevada resistencia a la tensión puede usarse en piezas sujetas a severos esfuerzos. [35]

El análisis químico según Norma Nacional NMX B-300 (% en peso) se muestra en la Tabla 3.2 [36].

Tabla 3.2 Especificación real del acero AISI 4340							
C	Si	Mn	P máx.	S máx.	Ni	Cr	Mo
0.38-0.43	0.15-0.35	0.60-0.80	0.035	0.040	1.65-2.00	0.70-0.90	0.20-0.30

Tipo: Acero de baja aleación níquel-cromo-molibdeno.

Formas y Acabados: Barra redonda, cuadrada, hexagonal y solera laminadas o forjadas en caliente, peladas o maquinadas. Placa laminada caliente.

Características: Se caracteriza por su alta templabilidad y resistencia a la fatiga. Es capaz de ofrecer buenas propiedades en piezas de grandes secciones. No presenta fragilidad de revenido. No se aconseja soldarlo; únicamente con soldadura especial.

Aplicaciones: Se utiliza en la fabricación de tornillería de alta resistencia, levas de mando, discos para frenos y ejes para camiones, entre otros.

3.2.3 Condiciones del ensayo de desgaste

3.2.3.1 Distancia de deslizamiento

La distancia total que recorrió la probeta durante el ensayo de desgaste fue de 10,000 metros (10 Km), debiendo parar a cada 500 metros de deslizamiento para realizar la medición de masa en la balanza analítica.

3.2.3.2 Velocidades de deslizamiento

Se utilizaron 9 probetas para este ensayo y se consideraron tres velocidades de deslizamiento diferentes: 0.75 m/seg, 1.19 m/seg y 2.05 m/seg; con cargas de 24.5N (2500grs.), 44.1N (4500 grs.) y 68.6 N (7000 grs.). La duración de cada procedimiento se calculó en base al posicionamiento de la probeta sobre la superficie del disco de desgaste y la velocidad de deslizamiento, para de esta manera seleccionar también la velocidad en rpm del motor eléctrico. Los valores de velocidades son mostrados en la Tabla 3.3.

Por ejemplo, una probeta que se coloca sobre el disco de desgaste en un radio marcado 3.85 cm que significa un diámetro de 7.7 cm, constituyendo un perímetro de 0.241932 m., el ensayo se proyecta para que se mida el cambio de masa por pérdida de material a cada 500 m, por lo que a cada revolución del disco se recorre una distancia de 0.241932 m, por lo tanto se requieren $\frac{500}{0.241932} = 2066.94$ revoluciones. Si se considera un tiempo de 7 min para completar 500 m de deslizamiento sobre el disco, entonces: $\frac{2066.94 \text{ rev}}{7 \text{ min}} = 295 \text{ rev}/\text{min}$. En la Tabla 3.3 se especifican las condiciones generales con cada una de las probetas durante el ensayo de desgaste.

Tabla 3.3 Velocidades utilizadas en el ensayo de desgaste		
No.	Velocidad (m/s)	Velocidad (rpm)
1	0.75	167-270
2	1.19	220-295
3	2.05	438-509-560

3.2.3.3 Cargas.

Las cargas utilizadas fueron desde 24.5 N a 68.6 N. Las masas fueron en el rango de 2500 a 7500 grs. Con la aplicación de ese rango de cargas se obtuvo también un rango de presiones a los que fueron sometidas cada una de las probetas. Los datos puntuales se muestran en la Tabla 3.4

Tabla 3.4 Cargas utilizadas durante el ensayo de desgaste		
No.	Carga (grs)	Carga (N)
1	2500	24.5
2	4500	44.1
3	7000	68.6

3.2.3.4 Tiempos de deslizamiento y duración de cada prueba.

La duración de la prueba se calculó en base a la velocidad de deslizamiento y a la velocidad en rpm del disco de desgaste, teniendo en consideración el tiempo para un recorrido de 500 m, distancia a la cual se planificaron las pausas para realizar la medición de masa, los tiempos son mostrados en la Tabla 3.5

Tabla 3.5 Tiempos de deslizamiento por cada 500 m.			
No.	Velocidad (m/seg)	Velocidad (rpm)	Tiempo (min)
1	0.75	167-270	4.06
2	1.19	220-295	7
3	2.05	438-509-560	11.11

3.2.3.5 Pérdida de masa

Antes de iniciar el ensayo, las probetas y el disco fueron limpiados con alcohol étílico. Las probetas fueron pesadas en una balanza analítica cuya precisión es de 0.0001 g. una vez iniciado el ensayo, las probetas fueron pesadas cada 500 m de recorrido. A continuación, la probeta se colocaba nuevamente en la misma posición y se reanudaba el ensayo. Las partículas acumuladas en el disco de desgaste durante cada uno de los ensayos fueron recogidas y marcadas en un empaque para poder analizarlas bajo técnicas de microscopia electrónica de barrido.

Las condiciones generales que caracterizaron este ensayo se resumen en la Tabla 3.6

Tabla 3.6 Condiciones generales durante el ensayo						
Probeta No.	Carga (N)	Posición sobre disco (radio en cm)	Distancia recorrida en metros por c/revolución	Velocidad de deslizamiento m/s	Tiempo en min por c/ 500 m	rpm del motor
1	24.5	4.3	0.2701	0.75	11.11	166.2
2	24.5	3.85	0.2419	1.19	7	295
3	24.5	4.3	0.2701	2.05	4.06	509
4	44.1	4.3	0.2701	0.75	11.11	166.2
5	44.1	3.85	0.2419	1.19	7	295
6	44.1	3.5	0.2199	2.05	4.06	560
7	68.6	2.65	0.1665	0.75	11.11	270
8	68.6	5.15	0.3235	1.19	7	220
9	68.6	4.5	0.2827	2.05	4.06	438

CAPITULO 4. ANALISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 Desempeño del equipo de desgaste

El dispositivo electromecánico implementado para la realización de la prueba de desgaste “espiga sobre disco” mostró buen desempeño para las distintas condiciones de ensayo que se pretendían llevar a cabo. A continuación se evalúa el desempeño de los diferentes componentes.

4.1.1 Barras de deslizamiento horizontal.

Las barras de deslizamiento horizontal permitieron posicionar las probetas a lo largo de la superficie del diámetro del disco de desgaste, con lo cual se realizaron ensayos utilizando en su totalidad la pista de desgaste del disco, como se muestra en las Figuras 4.1 y 4.2.

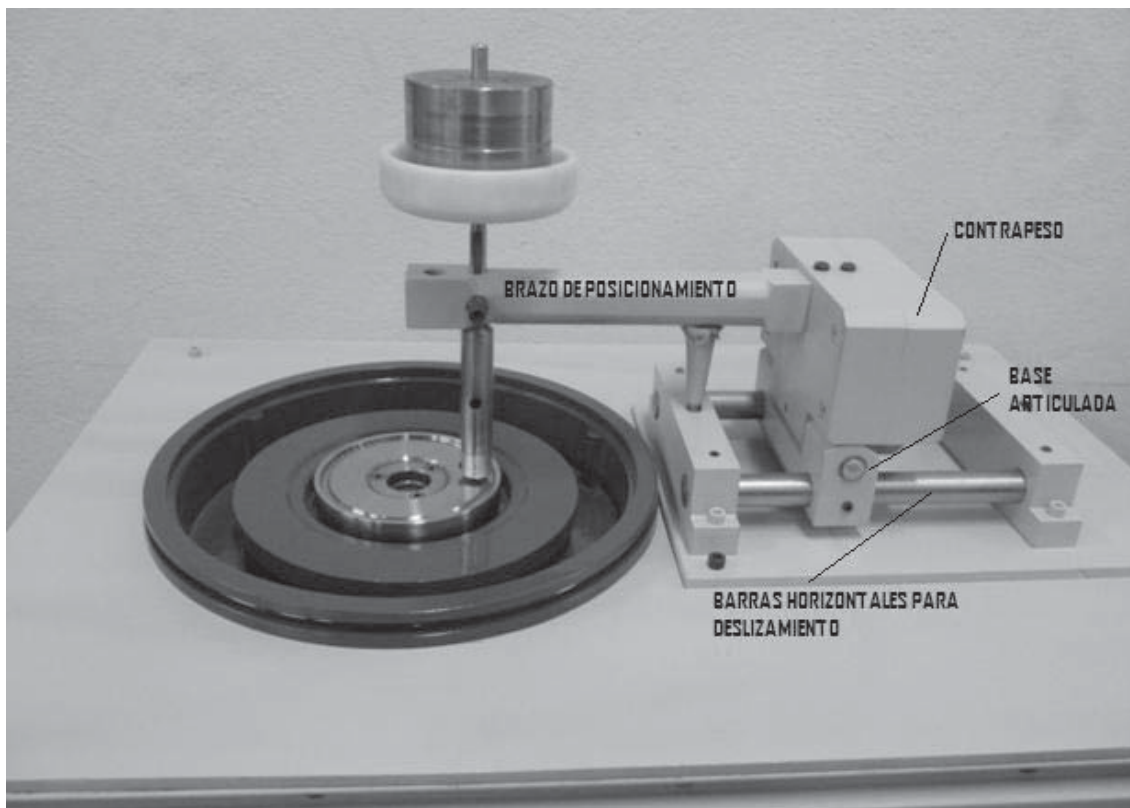


Figura 4.1 Disposición de los elementos para determinar la posición de la probeta sobre el disco de desgaste.

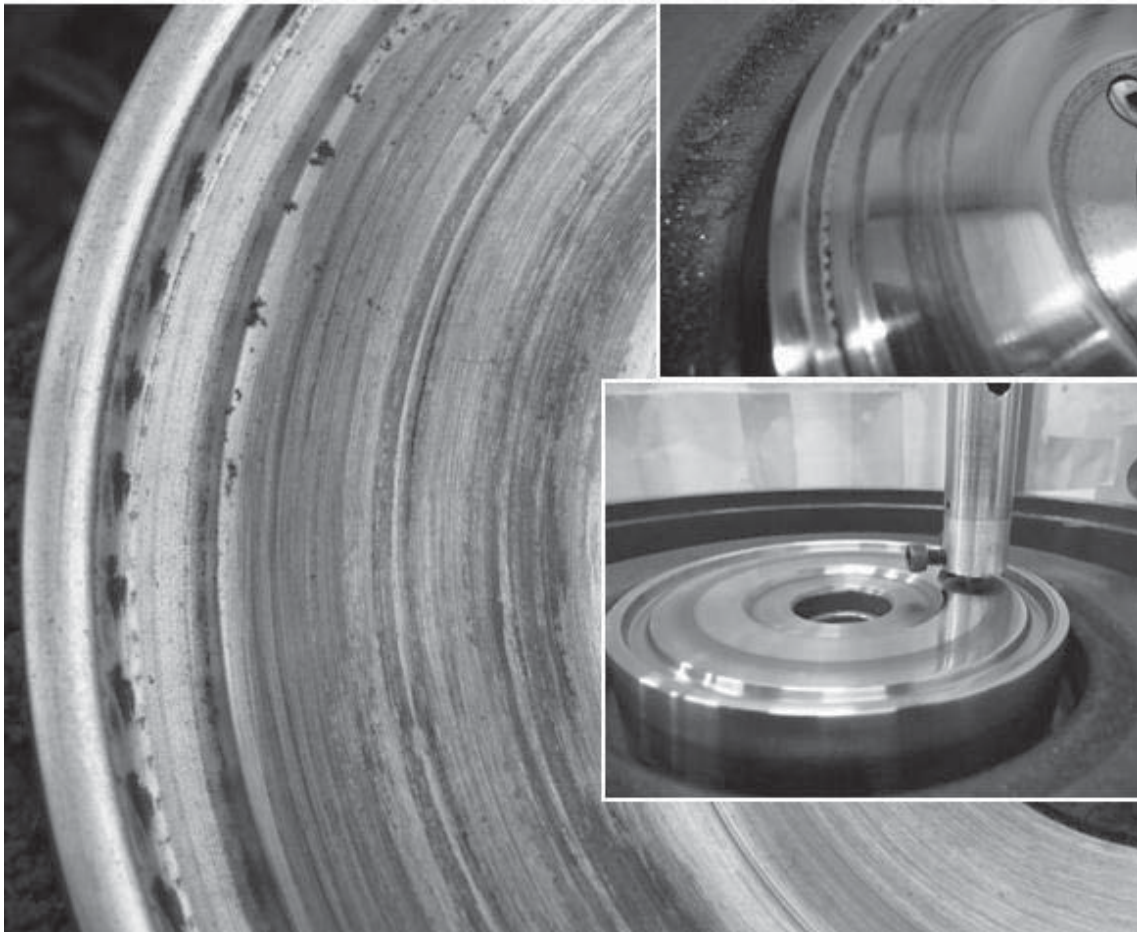


Figura 4.2 Huellas de contacto por fricción en toda la superficie de contacto del disco de desgaste.

4.1.2 Base articulada y contrapeso

La base articulada se deslizó sin problema sobre las barras de deslizamiento logrando una posición determinada para la realización de cada uno de los ensayos, en cada uno de los paros realizados durante los ensayos de desgaste fue necesario medir la pérdida de masa de las probetas, siendo necesario retirar las masas aplicadas sobre la probeta y levantar la varilla porta probetas mediante la articulación y el contrapeso. Este movimiento permite elevar la probeta sobre la superficie del disco en una distancia de 7 centímetros, lo que facilita el intercambio de probetas (Fig. 4.3).



Figura 4.3 Separación entre la probeta y el disco de desgaste, permitiendo la colocación de la probeta en la base de la varilla porta probetas.

4.1.3 Varilla porta probetas

La probeta logró ser posicionada sin dificultad gracias a la sujeción por opresores colocados de manera perpendicular a 5 mm en la punta de la varilla. Un canal realizado en la sección de menor diámetro, permite que la varilla se mantenga en una posición permanente durante la realización de los ensayos de desgaste, eliminando con esto la posibilidad de que la varilla gire sobre su eje producto de la rotación del disco sobre el que tiene contacto de fricción. La probeta conserva su posición durante todo el ensayo, de

manera que la dirección de contacto entre la cara de la probeta y la superficie del disco es la misma aún cuando la probeta se retira cada 500 metros de deslizamiento para determinar su pérdida de masa.

4.1.4 Control de velocidad y tacómetro

El sensor de velocidad posicionado en la flecha del motor eléctrico refirió buena señal, permitiendo buenas lecturas de velocidad en revoluciones por minuto del motor en el tacómetro digital. El selector de velocidad permitió ajustar los parámetros de velocidad en rpm con una variación de ± 1 rpm, con lo cual se debió estar atento a las lecturas registradas ya que estas tendieron a cambiar producto de ligeras vibraciones resultantes del contacto en seco entre los metales de prueba.

4.2 Desgaste

4.2.1 Velocidad de desgaste

4.2.1.1. Efecto de la velocidad de deslizamiento

Los datos de pérdida de masa de las probetas obtenidos durante el ensayo de desgaste, fueron transformados a pérdida de volumen en mm^3 por medio de la ecuación 3.1, a partir del valor de la densidad obtenida mediante el picnómetro de Helio enmarcada en la Tabla 3.1. Para cada una de las cargas utilizadas y para cada velocidad de deslizamiento, se grafican la pérdida de volumen (mm^3) contra la distancia de deslizamiento (metros). Las curvas obtenidas se ajustaron a una línea recta cuya pendiente proporciona la velocidad de desgaste del material para cada una de las condiciones de ensayo.

En las Figuras 4.4, 4.5 y 4.6 se observa la pérdida de volumen, en mm^3 , contra la distancia de deslizamiento, en metros, para carga de 24.5 N y velocidades de 0.75, 1.19 y 2.05 m/s., respectivamente.

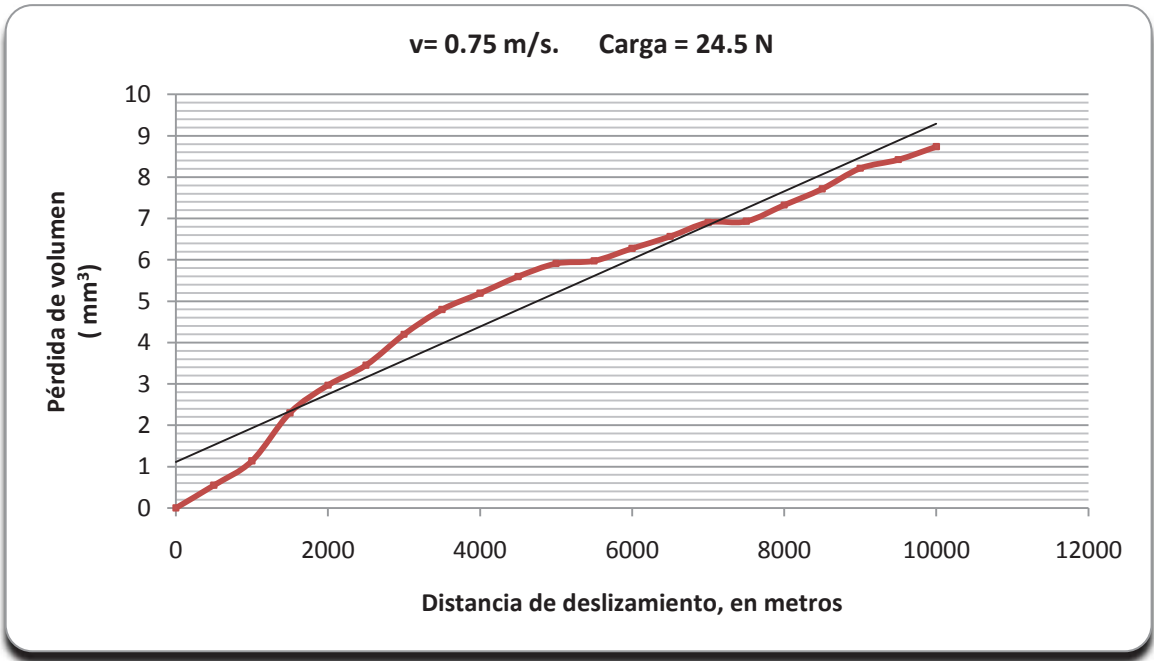


Figura4.4 Gráfica de velocidad de desgaste a 24.5 N y velocidad lineal de 0.75 m/s.

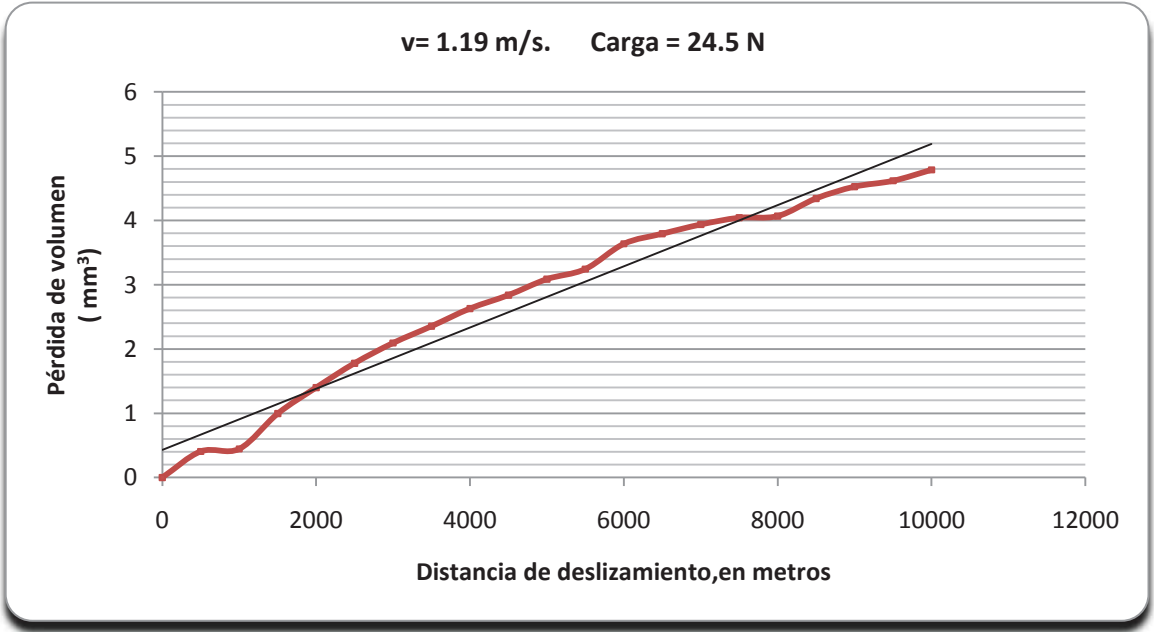


Figura 4.5 Gráfica de velocidad de desgaste a 24.5 N y velocidad lineal de 1.19 m/s.

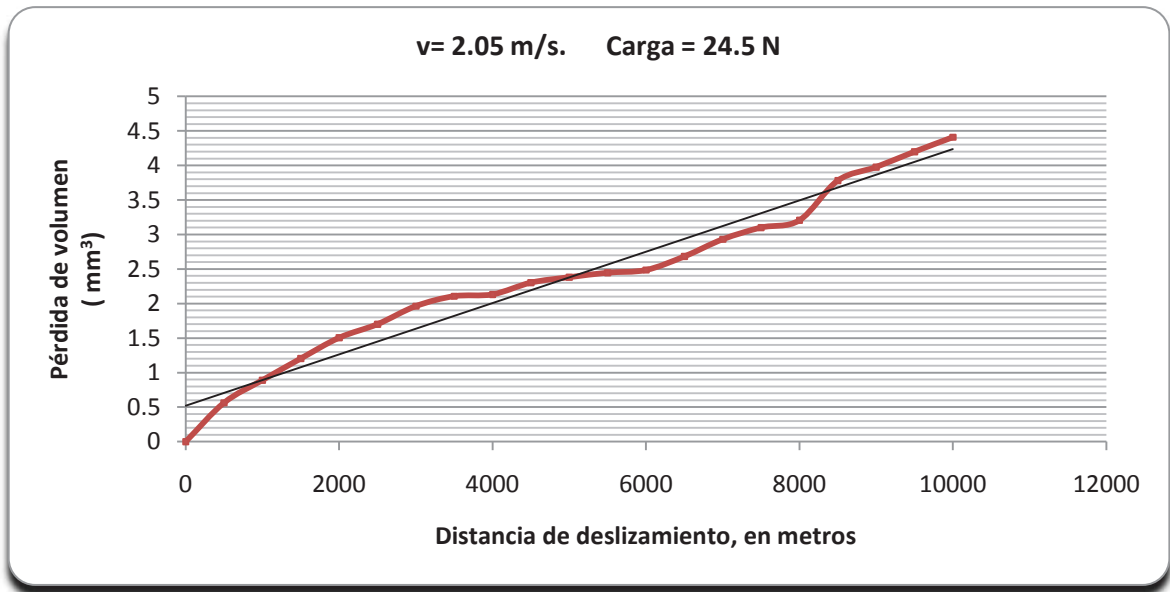


Figura 4.6 Gráfica de velocidad de desgaste a 24.5 N y velocidad lineal de 2.05 m/s.

Como puede observarse, la curva representativa de pérdida de volumen en los tres casos presenta valores que no son constantes a lo largo de los respectivos ensayos, como puede observarse, *a mayor velocidad menor desgaste*.

Las Figuras 4.7, 4.8 y 4.9 muestran los valores correspondientes a la pérdida de volumen para una condición de carga de 44.1 N y para los tres rangos de velocidad de deslizamiento.

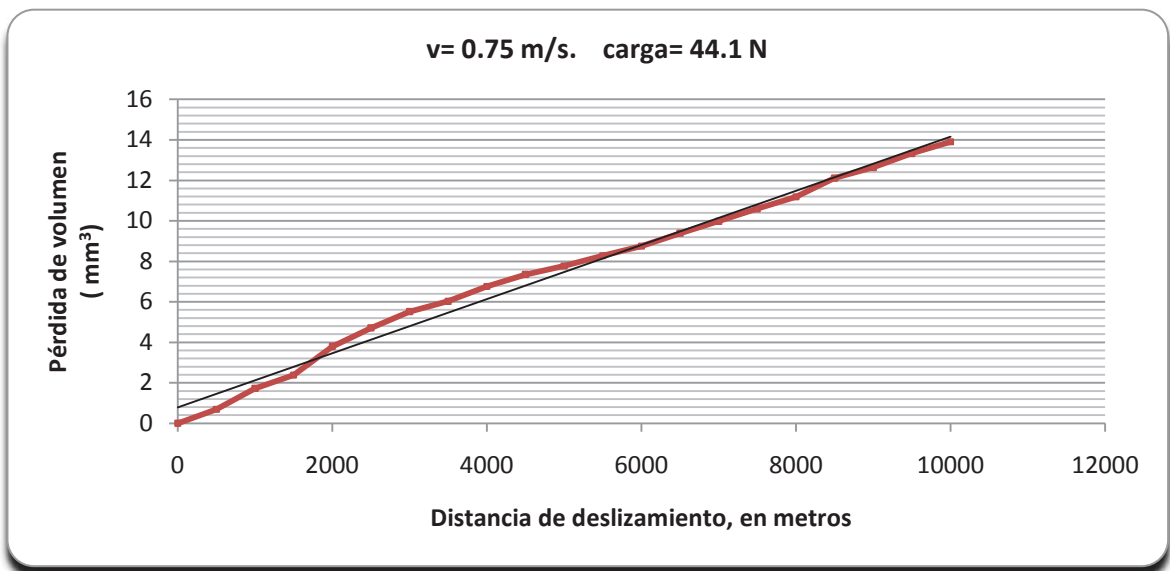


Figura 4.7 Gráfica de velocidad de desgaste a 44.1 N y velocidad lineal de 0.75 m/s.

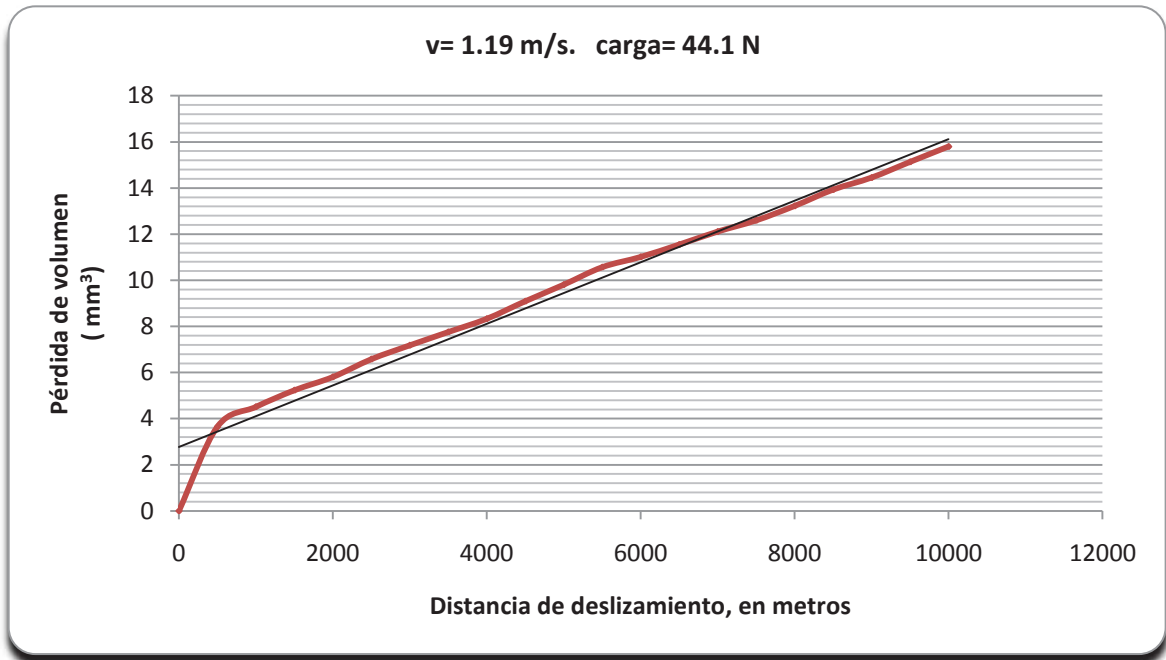


Figura 4.8 Gráfica de velocidad de desgaste a 44.1 N y velocidad lineal de 1.19 m/s.

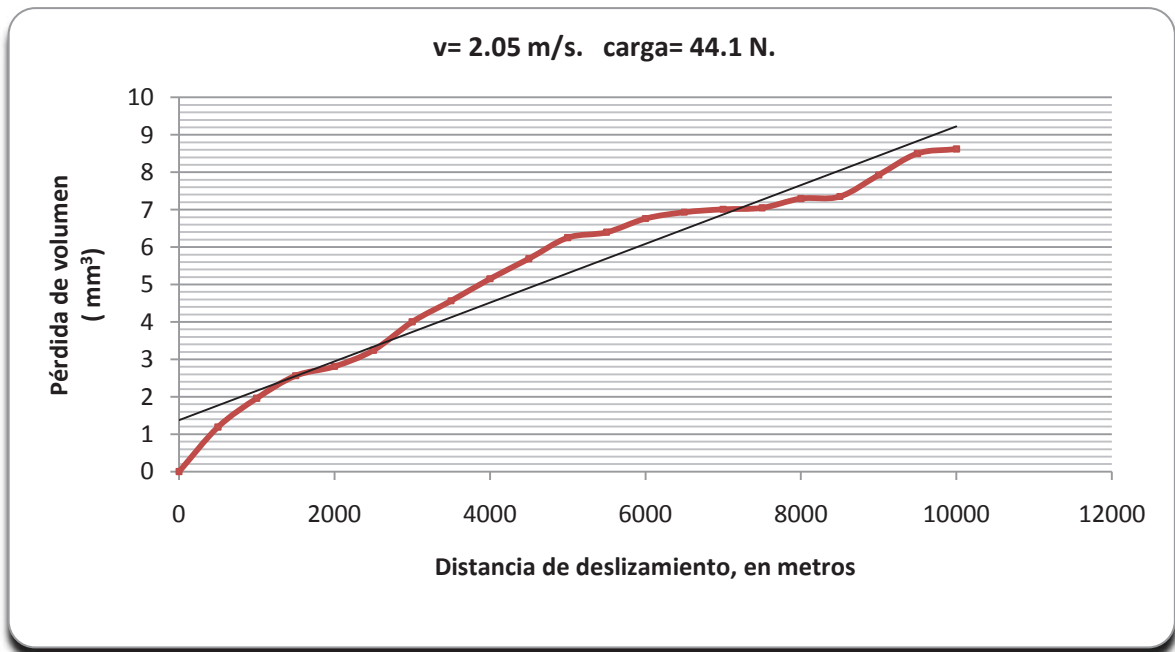


Figura 4.9 Gráfica de velocidad de desgaste a 44.1 N y velocidad lineal de 2.05 m/s.

De los tres casos anteriores se puede observar como para las velocidades de 0.75 y 1.19 m/s se asemejan de manera más cercana a la pendiente de la línea marcada de referencia, siendo mayor la cercanía para las condiciones de desgaste a la velocidad de 1.19 m/s. Solo en el caso de la pérdida de volumen para la velocidad de desgaste de 2.05 m/s los resultados muestran altibajos con respecto a la recta de referencia.

Por último, las Figuras 4.10, 4.11 y 4.12 demuestran los resultados obtenidos de pérdida de volumen, en mm^3 , para una carga de 68.6 N y velocidades de deslizamiento de 0.75, 1.19 y 2.05 m/s.

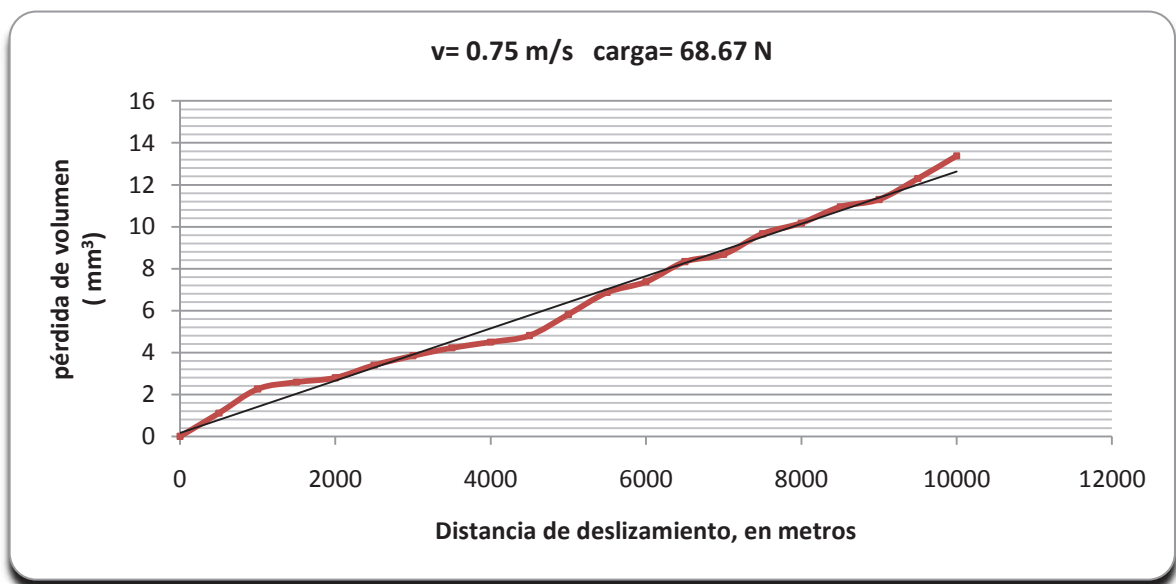


Figura 4.10 Gráfica de velocidad de desgaste a 68.6 N y velocidad lineal de 0.75 m/s.

Los resultados de pérdida de volumen contra velocidad de deslizamiento para la carga aplicada de 68.6 N presenta algunas variaciones respecto de la línea de referencia que denotaría un proceso constante, para las velocidades de 0.75 y 1.19 m/s respectivamente (Figuras 4.10 y 4.11). Sin embargo, la condición de velocidad de deslizamiento de 2.05 m/s (Figura 4.12) marca un proceso de desgaste que podría considerarse como constante a lo largo de toda la distancia de deslizamiento del ensayo de desgaste para esta carga aplicada. En general *a mayor velocidad, mayor pérdida de volumen*.

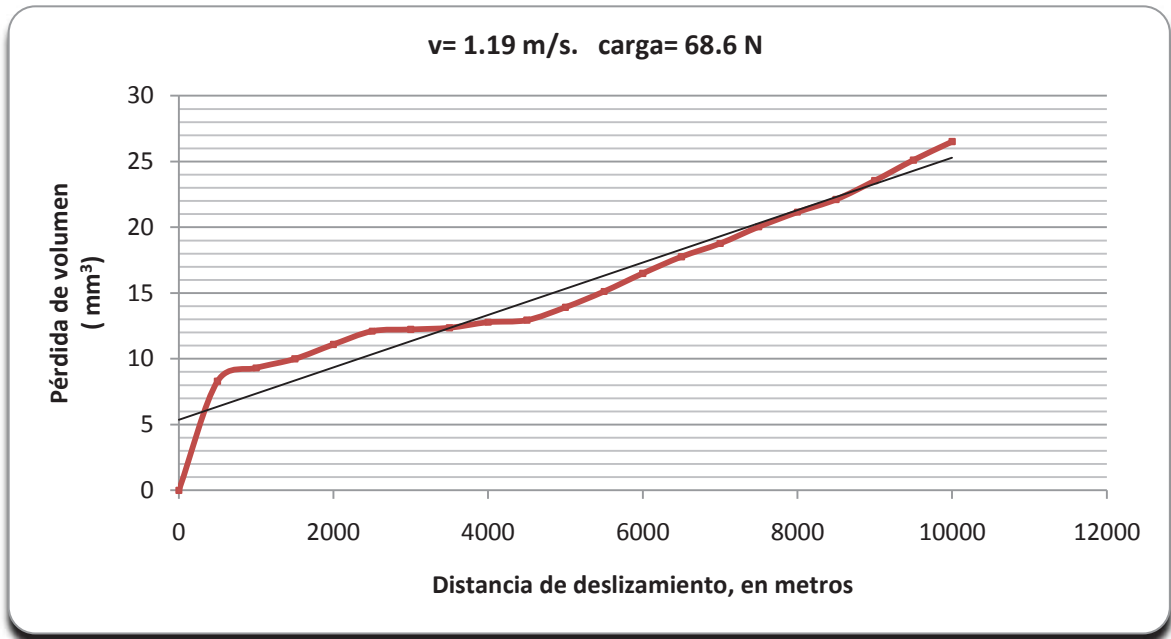


Figura 4.11 Gráfica de velocidad de desgaste a 68.6 N y velocidad lineal de 1.19 m/s.

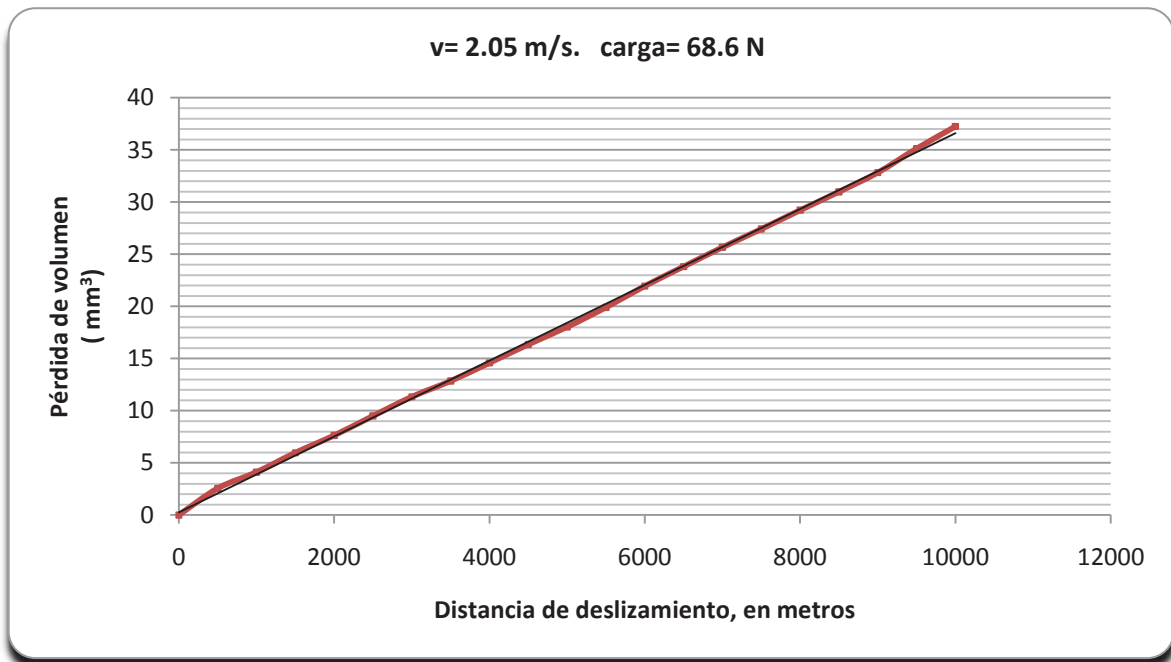


Figura 4.12 Gráfica de velocidad de desgaste a 68.6 N y velocidad lineal de 2.05 m/s.

En la Figura 4.13 se muestra la gráfica que resume la pérdida de volumen para una carga aplicada de 24.5 N en las tres distintas velocidades de deslizamiento durante el ensayo de desgaste, en esta se observan valores muy cercanos para las velocidades de 1.19 y 2.05 m/s, incluso existen zonas en donde sus respectivas líneas coinciden, esto es en el rango de los 2,000 a los 3,000 m de deslizamiento y termina por ser mayor la pérdida de volumen para la velocidad de 1.19 m/s en un 8.6% respecto de la pérdida a 2.05 m/s. Sin embargo, puede apreciarse una diferencia muy marcada en la línea de pérdida de volumen para la velocidad de deslizamiento más baja, 0.75 m/s, respecto de las dos anteriores; se puede observar que los valores en los que coincide con la velocidad de 2.05 m/s únicamente se da en los primeros 1,000 m de deslizamiento, después de ese punto sus valores aumentan considerablemente a lo largo de toda la prueba hasta alcanzar una diferencia del 83.4 % respecto de la pérdida de volumen para la velocidad de 1.19 m/s y de un 99.3 % para la velocidad de 2.05 m/s. Lo anterior permite concluir que para una carga baja, la mayor pérdida de volumen se presenta para las condiciones de velocidad de deslizamiento baja.

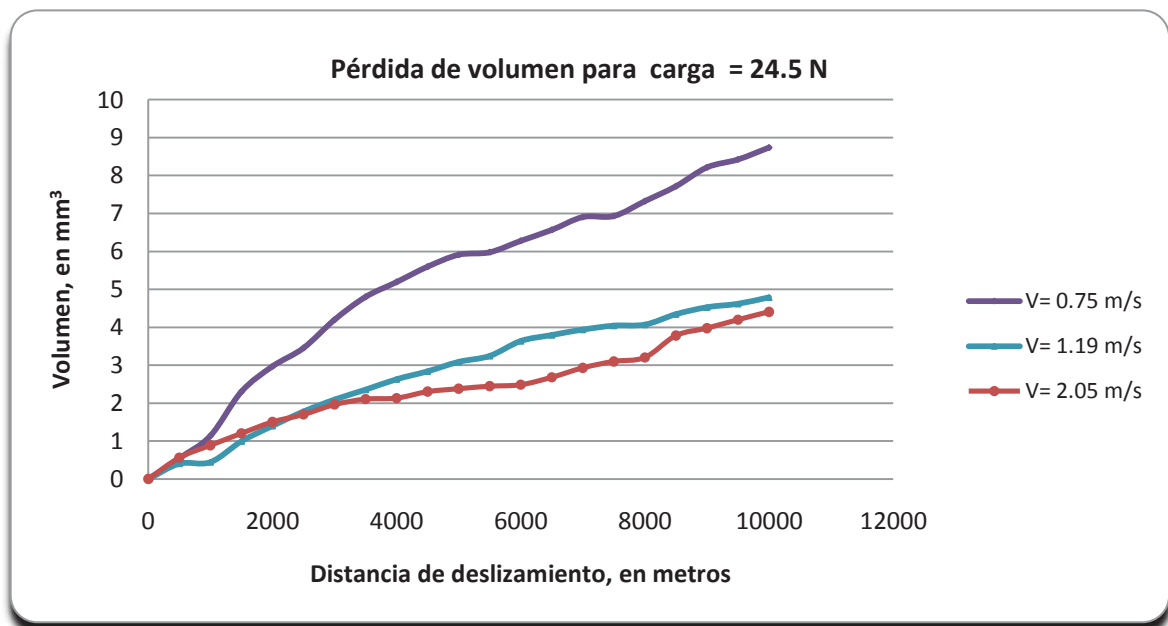


Figura 4.13 Gráfica que resume la pérdida de volumen para una carga aplicada de 24.5 N en los tres rangos de velocidad de deslizamiento.

La pérdida de volumen para la carga de 44.1 N durante la aplicación de tres distintas velocidades de deslizamiento son mostradas en la Figura 4.14, en esta se observa el comportamiento de las líneas representativas y ahora es a la velocidad de 1.19 m/s donde se presenta una mayor pérdida de volumen, siendo 13.66 % mayor a la pérdida generada para una velocidad de 0.75 m/s pero 83.72 % respecto de la producida a la velocidad de deslizamiento mayor.

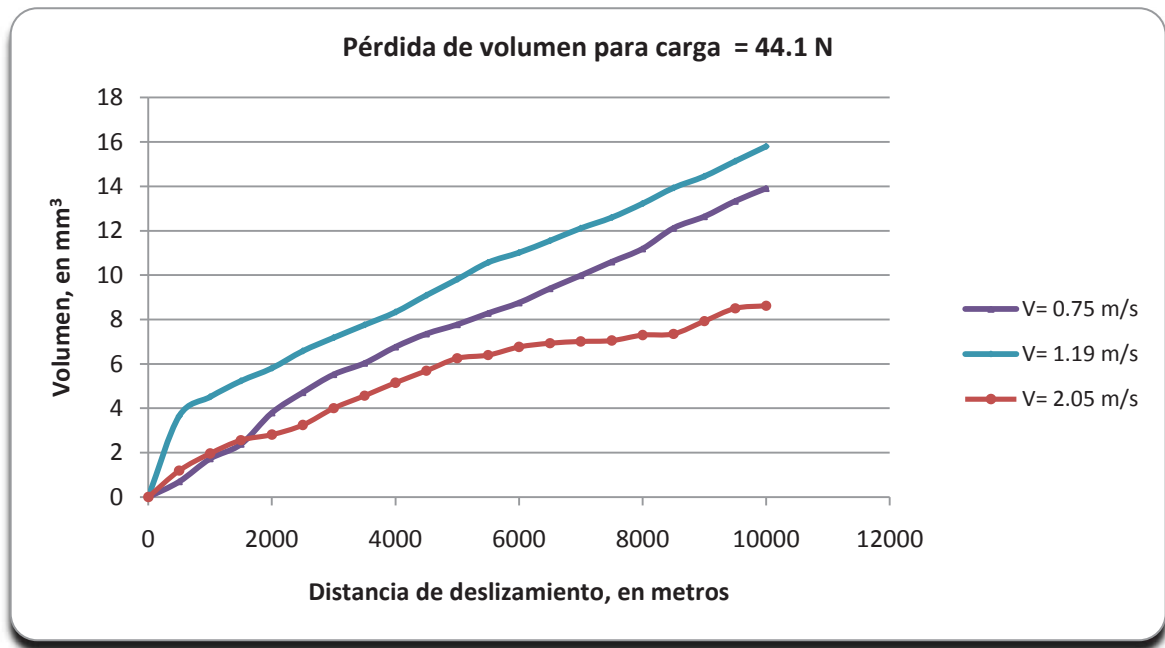


Figura 4.14 Gráfica que resume la pérdida de volumen para una carga aplicada de 44.1 N en los tres rangos de velocidad de deslizamiento.

Por lo que respecta a los resultados obtenidos durante el ensayo de desgaste con una aplicación de carga de 68.6 N, los valores obtenidos son presentados en la Figura 4.15. En esta se observa particularmente una condición constante en la pérdida de volumen para la velocidad de deslizamiento de 2.05 m/s a lo largo de todo el ensayo, contrastando con la irregularidad en los primeros 4,000 m de la línea representante de 1.19 m/s, la cual a partir de esta distancia y hasta los 10,000 m presenta mejores condiciones; para la velocidad de 0.75 m/s se presentó una pérdida más moderada pero casi constante. Los valores reflejan una mayor pérdida de volumen para la velocidad de deslizamiento más alta, representando

un 40.37 % mayor que la obtenida a velocidad de 1.19 m/s y de un 79.7 % respecto de la velocidad de 0.75 m/s.

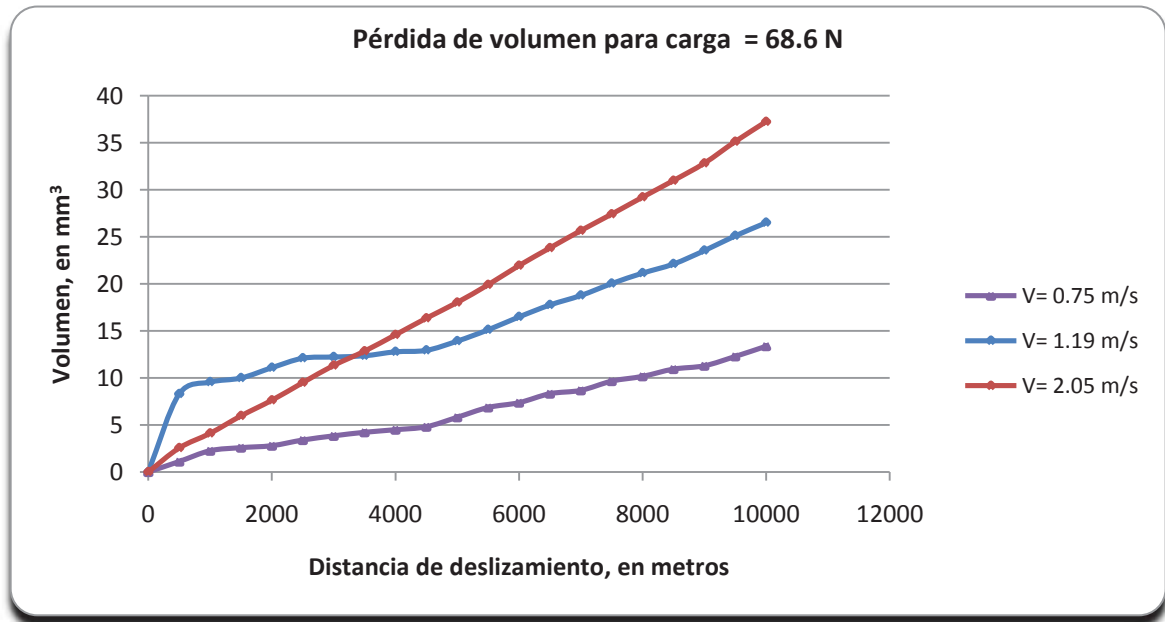


Figura 4.15 Gráfica que resume la pérdida de volumen para una carga aplicada de 68.6 N en los tres rangos de velocidad de deslizamiento.

Por lo que respecta a la pérdida de volumen acumulado para la velocidad de 0.75 m/s durante la aplicación de las tres distintas cargas, se observa que durante los primeros 1,500 metros la mayor pérdida de volumen es bajo la carga de 68.6 N, sin embargo, a partir de los 2,000 y hasta los 10,000 metros de recorrido se ve claramente que la mayor pérdida se genera bajo la carga de 41.1 N, esto puede observarse en la figura 4.16.

En grafica de la Figura 4.17 se muestran los resultados de la pérdida de volumen para la aplicación de las mismas cargas para una velocidad de deslizamiento de 1.19 m/s, en esta se nota claramente que la pérdida de volumen está relacionada directamente con la aplicación de carga. La menor pérdida se dio para la carga de 24.5 N, aumentando para la carga de 41.1 N y registrando la mayor pérdida para la carga de 68.6 N.

Finalmente la grafica de la Figura 4.18 muestra que la pérdida de volumen a una velocidad de deslizamiento de 2.05 m/s también es proporcional a la aplicación de carga, destacando que es para la carga de 68.6 N la línea representa una constante y es 7.46 veces mayor que

la pérdida producto de la aplicación de 24.5 N y 3.33 veces mayor a la resultante de aplicar 41.1 N.

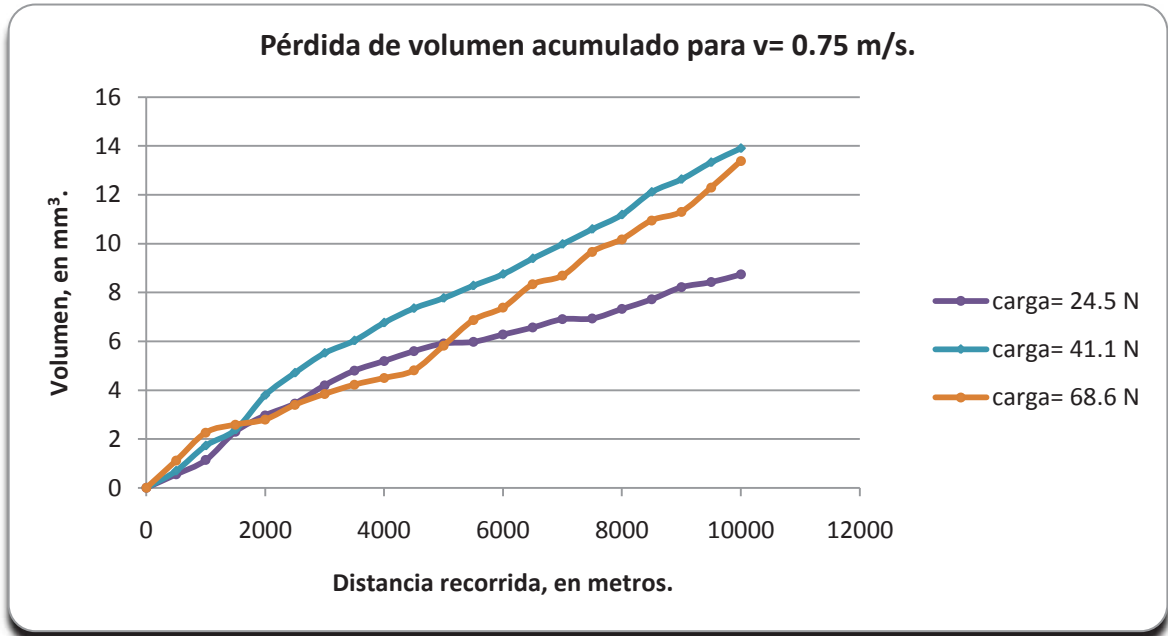


Figura 4.16 Gráfica que resume la pérdida de volumen para una velocidad de deslizamiento de 0.75 m/s en los tres rangos de carga aplicada.

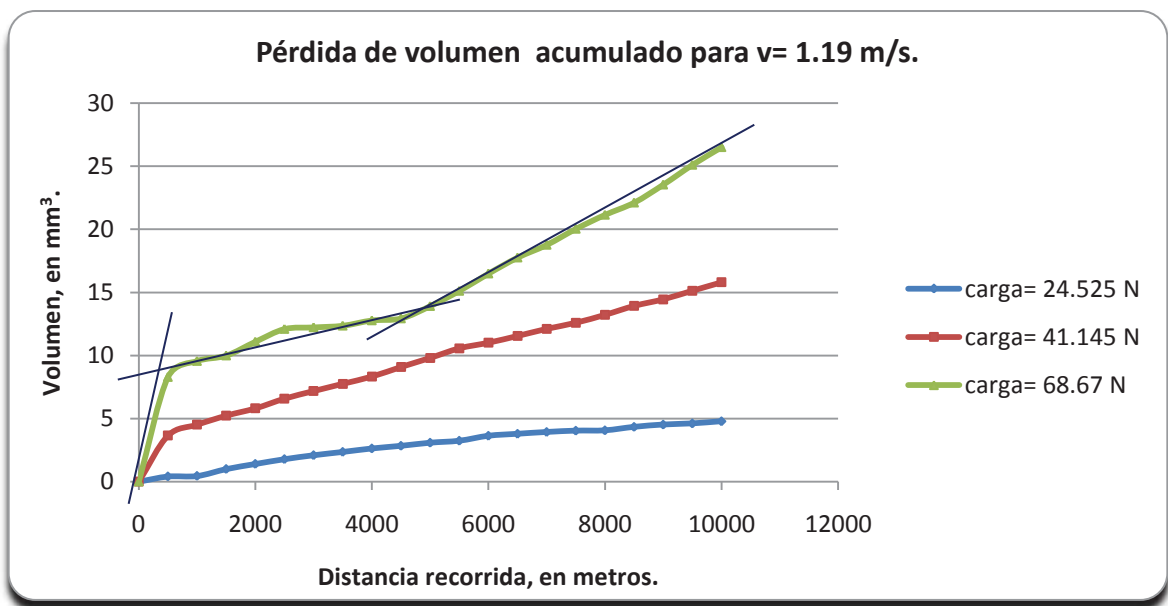


Figura 4.17 Gráfica que resume la pérdida de volumen para una velocidad de deslizamiento de 1.19 m/s en los tres rangos de carga aplicada.

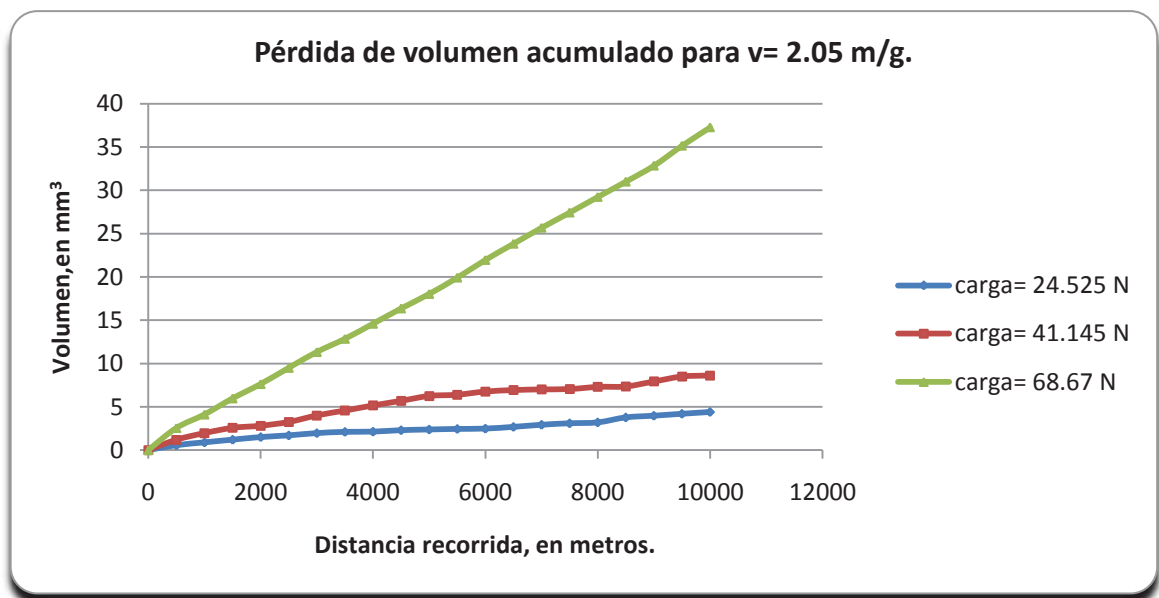


Figura 4.18 Gráfica que resume la pérdida de volumen para una velocidad de deslizamiento de 2.05 m/s en los tres rangos de carga aplicada.

Con estos datos podemos obtener la velocidad de desgaste promedio (mm^3/m) para cada una de las condiciones del ensayo de desgaste.

Tabla 4.1 Velocidades de desgaste		
Carga (N)	Velocidad de deslizamiento (m/s)	Velocidad de desgaste (mm^3/m)
24.5	0.75	0.000877
24.5	1.19	0.000478
24.5	2.05	0.000440
44.1	0.75	0.001390
44.1	1.19	0.001580
44.1	2.05	0.000862
68.6	0.75	0.001338
68.6	1.19	0.002651
68.6	2.05	0.003725

4.2.2 Efecto de la carga sobre la velocidad de desgaste

La Figura 4.19 es la gráfica de velocidad de desgaste contra las cargas aplicadas y puede observarse la velocidad de desgaste en mm^3/m a tres distintas velocidades de deslizamiento, puede notarse que la transición de desgaste de moderado a severo se presenta a niveles altos de carga con la velocidad de deslizamiento mayor.

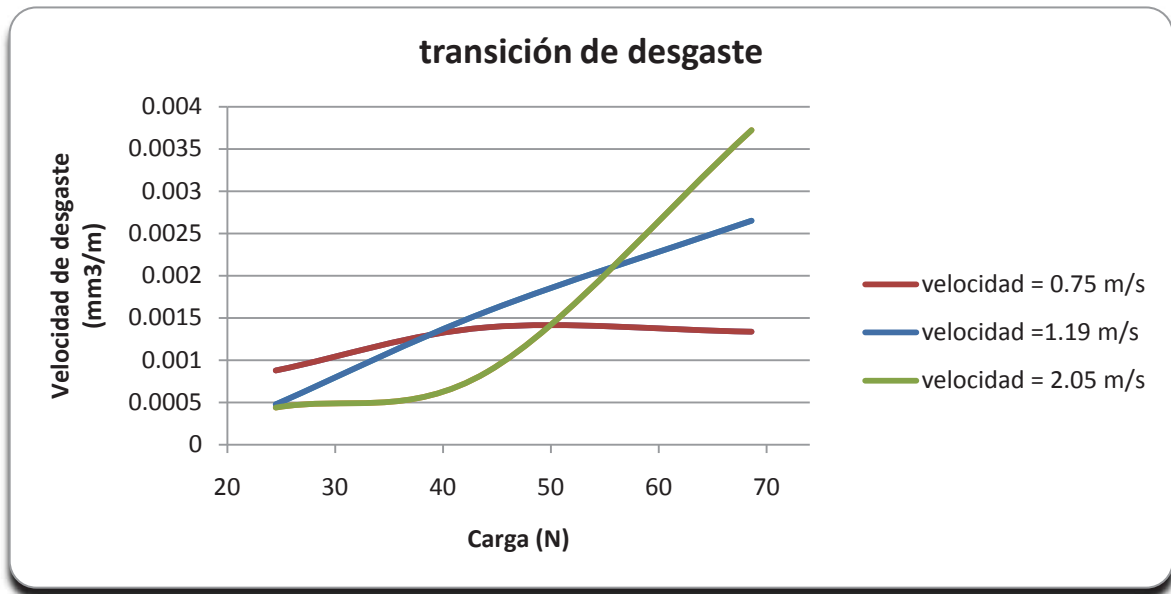


Figura 4.19 Gráfica que muestra la transición del desgaste en función de la carga aplicada.

4.2.3 Efecto de la velocidad de deslizamiento sobre la velocidad de desgaste

La gráfica de la velocidad de desgaste contra la velocidad de deslizamiento se muestra en la grafica de la Figura 4.20. Aquí podemos observar que la velocidad de desgaste para carga baja tiende a disminuir a partir de velocidades de deslizamiento media y alta. Al aplicar carga media, la velocidad de desgaste aumenta desde velocidad de deslizamiento de 0.75 a 1.19 m/s, pero disminuye a partir de de 1.19 a 2.05 m/s. Para una carga de 68.6 N, la velocidad de desgaste aumenta de manera gradual respecto de la velocidad de deslizamiento, mostrando una transición de desgaste moderado a severo para carga alta con velocidad de deslizamiento alta.

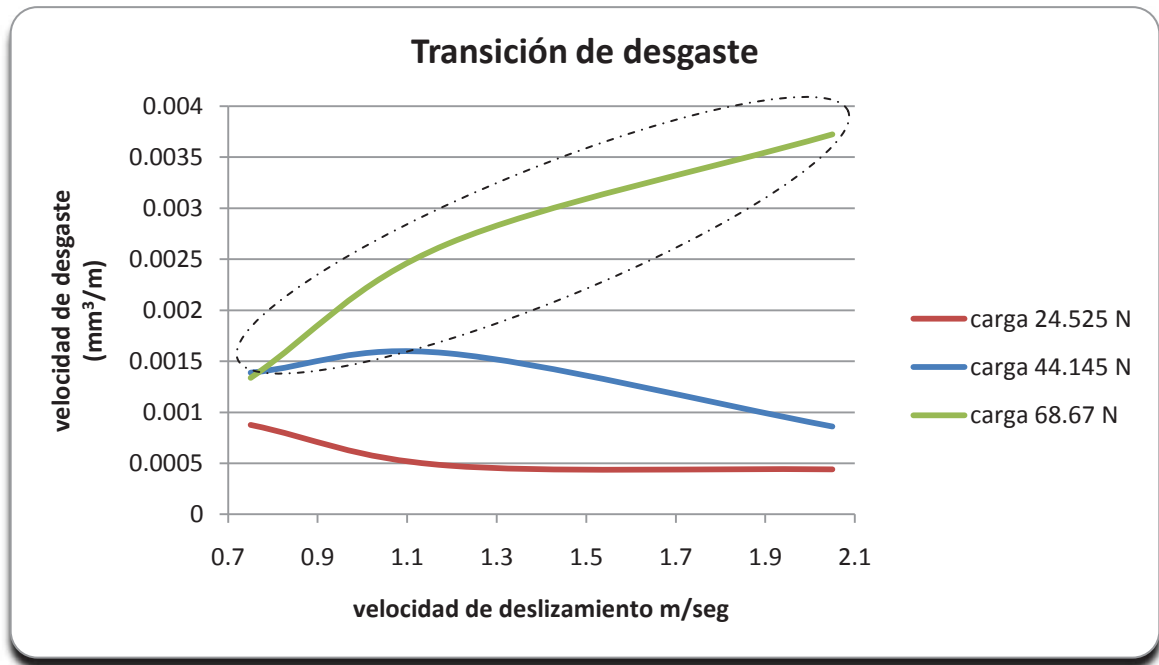


Figura 4.20 Gráfica que muestra la transición del desgaste en función de la velocidad de deslizamiento.

4.3 Análisis de las superficies desgastadas

4.3.1 Disco de desgaste

Durante el ensayo de desgaste, la superficie del disco fue sometida a distintas condiciones, las cuales dejaron marcas relevantes para cada condición de carga y de velocidad. Para una carga de 24.5 N y en las tres distintas velocidades de ensayo, la característica principal fue una marca constante de óxido en color rojizo como se muestra en la Figura 4.21. Aplicando la carga de 44.1 N las marcas de óxido generadas se veían en un tono oscuro como se muestra en las Figuras 4.21 y 4.22. Durante la aplicación de carga de 68.6 N se pierde completamente cualquier marca o vestigio de óxido y se presentan partículas desgastadas de la probeta adheridas a la superficie del disco, las cuales presentan a la vez desgaste sobre su superficie, como puede observarse en la Figura 4.23.



Figura 4.21 Marcas en la superficie del disco de desgaste. La marca A muestra una tonalidad rojiza producto de la presencia de óxido. La marca B demuestra una coloración más oscura, reflejo del incremento de la temperatura presente en el ensayo.



Figura 4.22 Imagen que muestra los residuos de óxido de tono oscuro presentes durante el ensayo de fricción para una carga de 44.1 N.

Las distintas superficies del disco fueron vistas al microscopio óptico en distintos niveles de aumento, por ejemplo la Figura 4.24 con una amplificación a 200x muestra los residuos de óxido en la superficie desgastada. La Figura 4.25 muestra residuos de óxido de color oscuro sobre la superficie del disco de desgaste a un aumento de 500x, así mismo, en la Figura 4.26 se ven claramente las partículas de desgaste de la probeta adheridas a la superficie del disco. Finalmente en la imagen de la Figura 4.27 se muestra una zona de transición en la superficie del disco entre una zona desgastada y otra libre de desgaste.



Figura 4.23 Imagen que muestra la adherencia de partículas de desgaste en la superficie del disco.

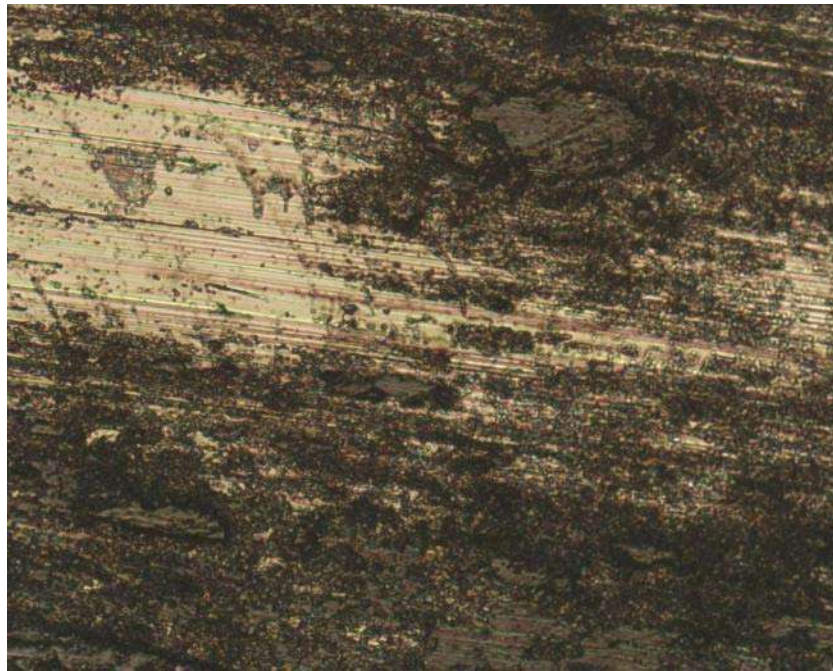


Figura 4.24 Microfotografía a 200x donde se observan los residuos de óxido durante el ensayo de desgaste a una carga de 44.1 N.

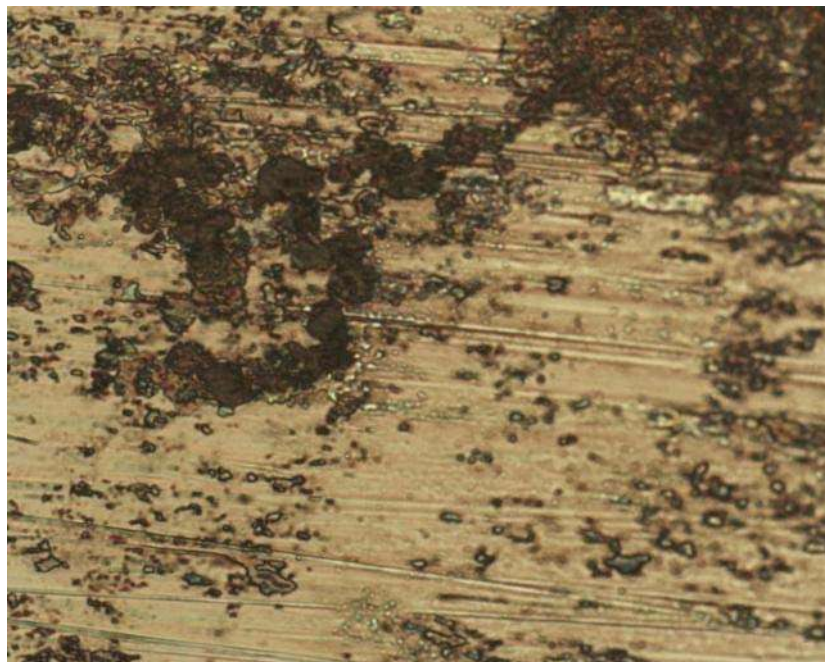


Figura 4.25 Microfotografía que muestra las partículas de óxido sobre la superficie del disco de desgaste, a 500x.

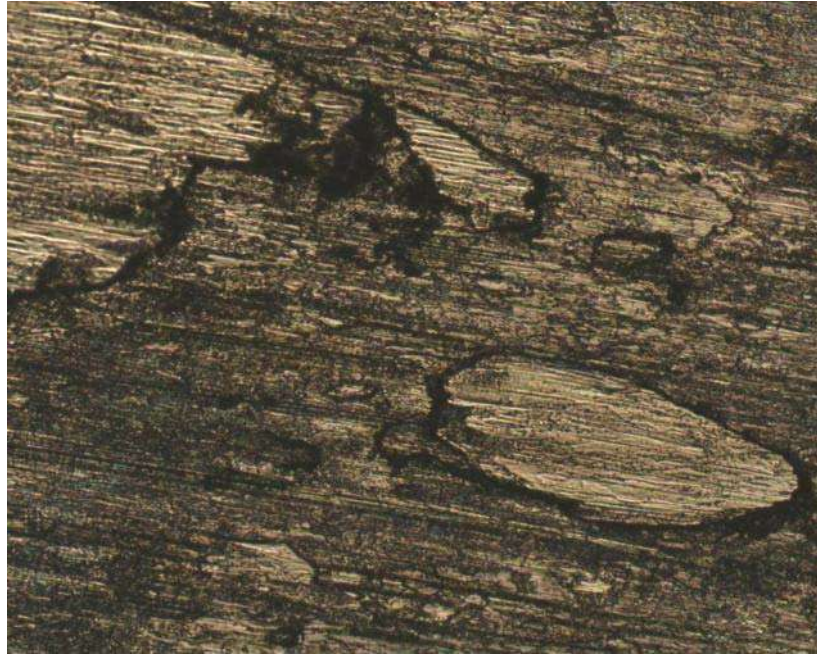


Figura 4.26 Microfotografía en donde se observan las partículas de la probeta, adheridas a la superficie del disco de desgaste durante la aplicación de una carga de 68.6 N, 100x.



Figura 4.27 Microfotografía que muestra la frontera entre dos zonas, una desgastada bajo la aplicación de una carga de 68.6 N y otra sin desgaste, 50 x.

4.3.2 Probetas desgastadas.

La superficie de las probetas sometidas a proceso de desgaste fueron observadas mediante microscopía electrónica de barrido y presentan características de agrietamiento (Figura 4.28), combinadas con huellas muy visibles de óxido. A 100x se visualizan claramente dos zonas de distinto contraste, la zona oscura representa el material base de la probeta, mientras que la zona más clara representa una tribocapa de óxido producto de la interacción del aire del medio ambiente con la superficie de la probeta. Esta condición estuvo presente durante las distintas velocidades de deslizamiento y para las cargas de 24.5 y 44.1 N, respectivamente. Las zonas de contraste pueden observarse en las Figuras 4.29 y 4.30.

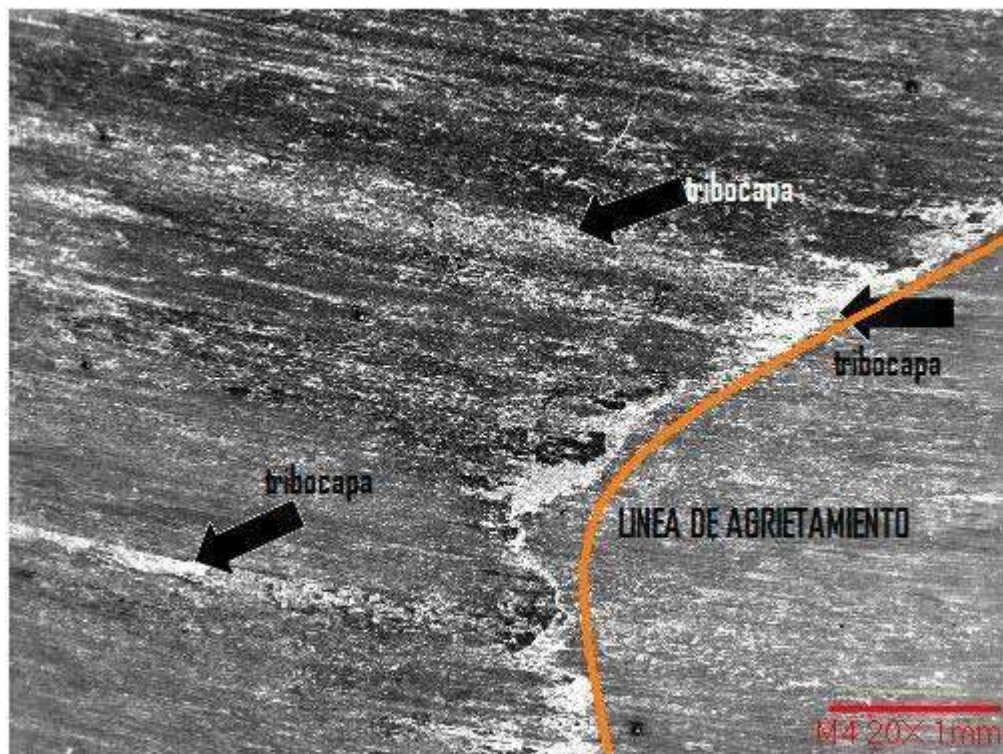


Figura 4.28 Micrografía de superficie de probeta sujeta a carga de 24.5 N

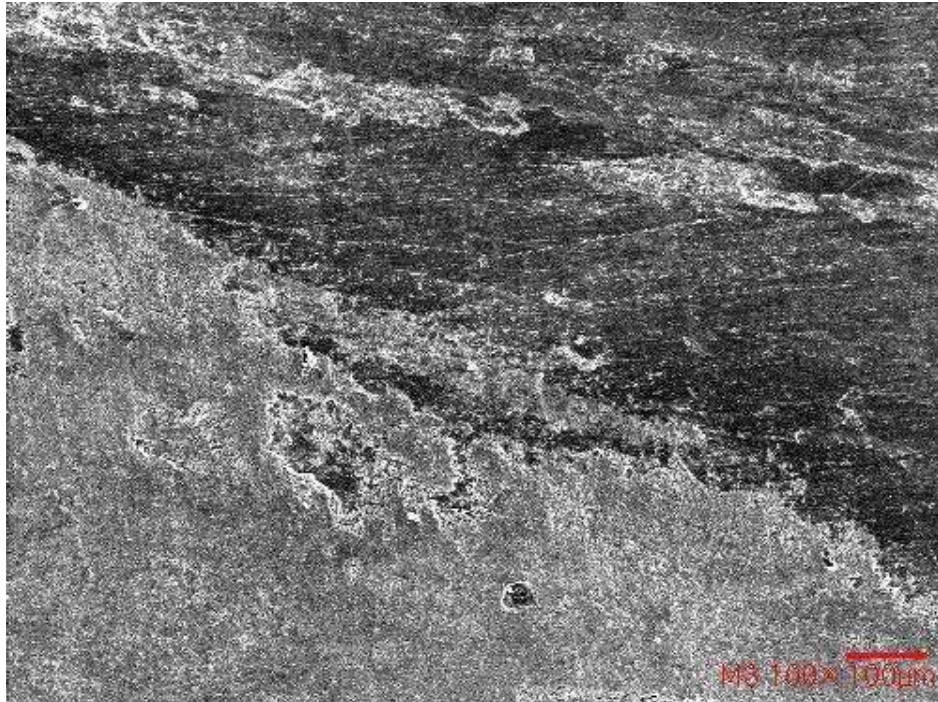


Figura 4.29 Microfotografía a 100x de la superficie de la probeta bajo una carga de 24.5 N.

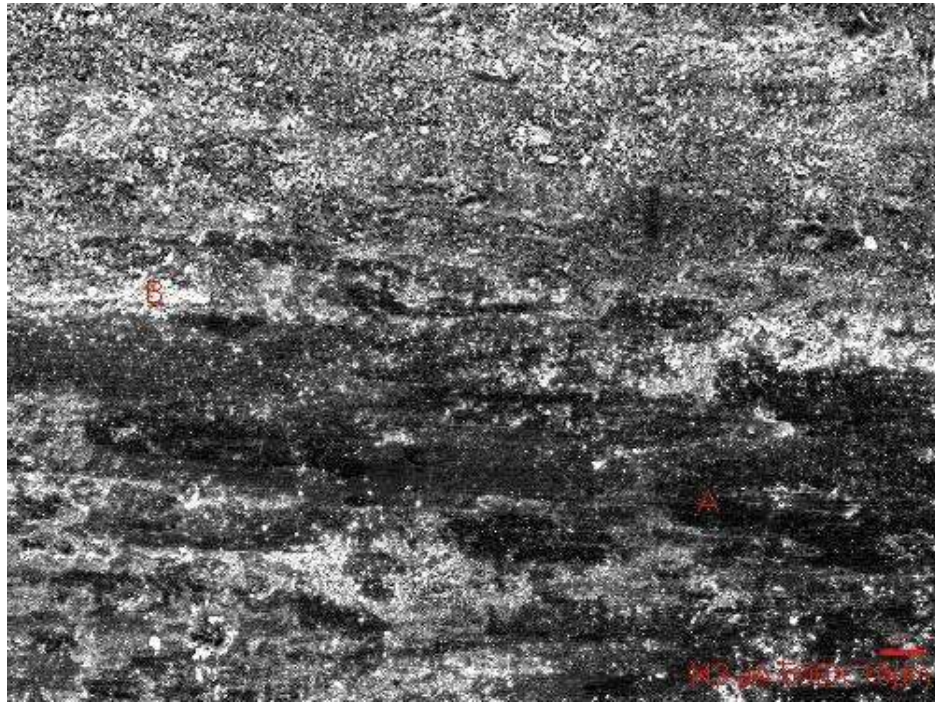


Figura 4.30 Microfotografía a 500x de la superficie de la probeta bajo una carga de 24.5 N.

Como se menciono anteriormente, para las condiciones de carga baja y carga media se tuvo la presencia de una capa de óxido entre la superficie del disco de desgaste y la cara de la probeta sujeta a desgaste, en la Figura 4.31 se observa un microanálisis químico de la superficie de una probeta realizado en el microscopio electrónico de barrido. En este microanálisis se puede observar de manera muy clara, que además de los elementos constitutivos de la probeta (Al, Mn, Si, Fe y C) existe la presencia de una gran cantidad de oxígeno, con lo cual se demuestra un proceso de desgaste por oxidación.

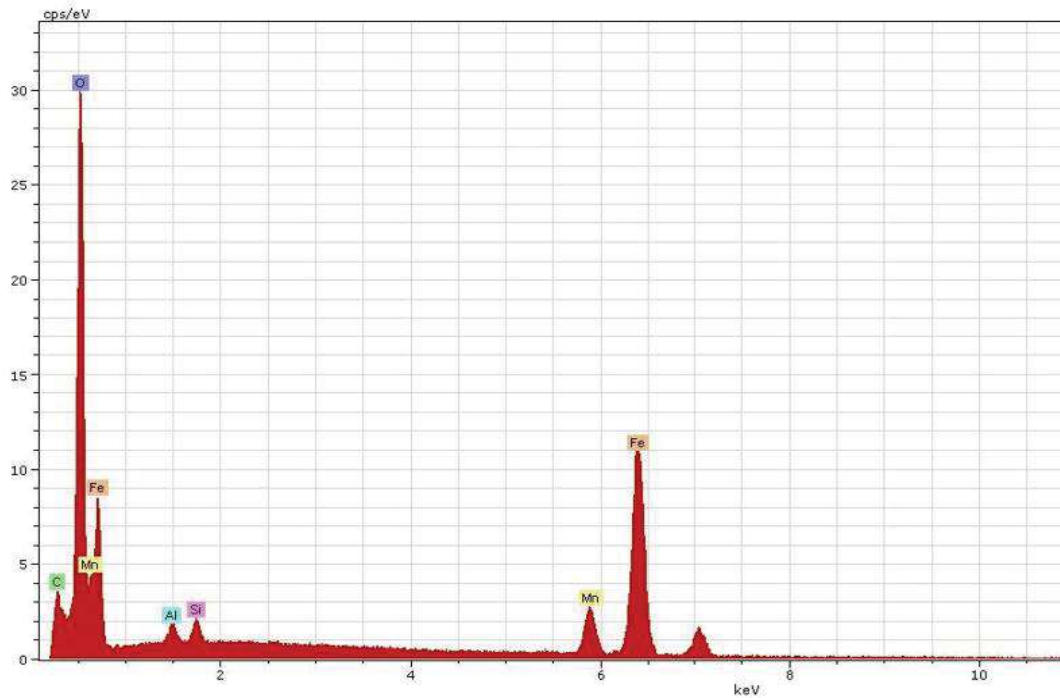


Figura 4.31 Microanálisis que muestra la elevada presencia de oxígeno en una probeta desgastada bajo condiciones de 24.5 N de carga y 1.19 m/s.

La Figura 4.32 muestra la imagen de la superficie de una probeta sujeta a desgaste bajo condiciones de carga de 41.1 N y velocidad de deslizamiento de 0.75 m/s, en ella puede observarse zonas claras correspondientes a residuos de óxido presente durante la prueba, esto debido a las condiciones atmosféricas y la interacción del oxígeno presente durante el desarrollo de las pruebas. La presencia de óxido estuvo presente en las tres velocidades de deslizamiento para cargas media y baja. Para el caso de desgaste bajo condiciones de carga de 68.6 N en los tres rangos de velocidad, el mecanismo de desgaste fue distinto, ya que la

superficie de las probetas presenta signos de escamas o delaminación sin la presencia de óxido, las escamas presentan tamaños y formas distintas vistos a 2000X en el microscopio electrónico de barrido, como se muestra en la Figura 4.33



Figura 4.32 Superficie de una probeta sometida a desgaste bajo carga de 41.1 N y velocidad de deslizamiento de 0.75 m/s, vista a 100X.

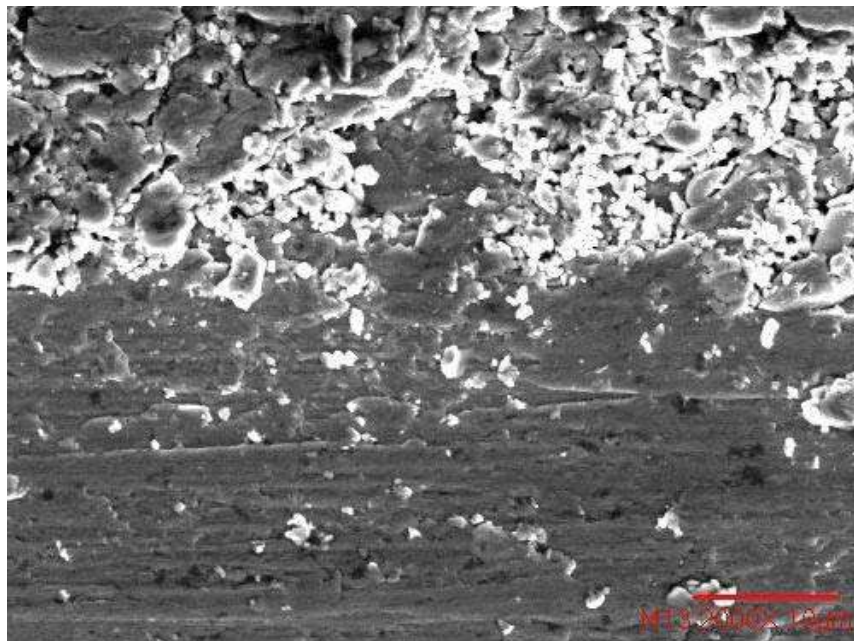


Figura 4.33 Superficie de una probeta sometida a desgaste en condiciones de carga de 68.6 N y velocidad de deslizamiento de 1.19 m/s, vista a 2,000X, distinguiéndose hojuelas o escamas como parte de un proceso de delaminación.

4.3.3 Partículas de desgaste

Las partículas producto del proceso de desgaste (debris) se observaron mediante microscopia de barrido y en ellas se ve la acción del oxígeno de la atmosfera, donde la capa de óxido formado en la superficie experimenta desgaste. La formación de óxido protege a la superficie contra el daño, este se forma durante el tiempo en el que las asperezas no entran en contacto con las asperezas del otro cuerpo. La misma cantidad de óxido se forma en cada contacto después del cual, cuando la película alcanza un espesor crítico, la capa se rompe, localizándose la ruptura en la frontera metal-óxido. La presencia de óxidos en los productos de desgaste fue establecida para el deslizamiento en seco y con lubricación [37]. Las partículas producto del desgaste bajo condiciones de carga media y baja en las tres distintas velocidades (Figuras 4.34 y 4.35) presentan en su superficie una serie de grietas producto de los esfuerzos cíclicos a los que fue sometido, seguido por una coalescencia de las grietas para finalmente dar como resultado un desgaste o pérdida de material, las muestras presentan una buena proporción de partículas de óxido (Figura 4.36), razón por la cual reflejan una combinación de desgaste por delaminación y desgaste por oxidación.

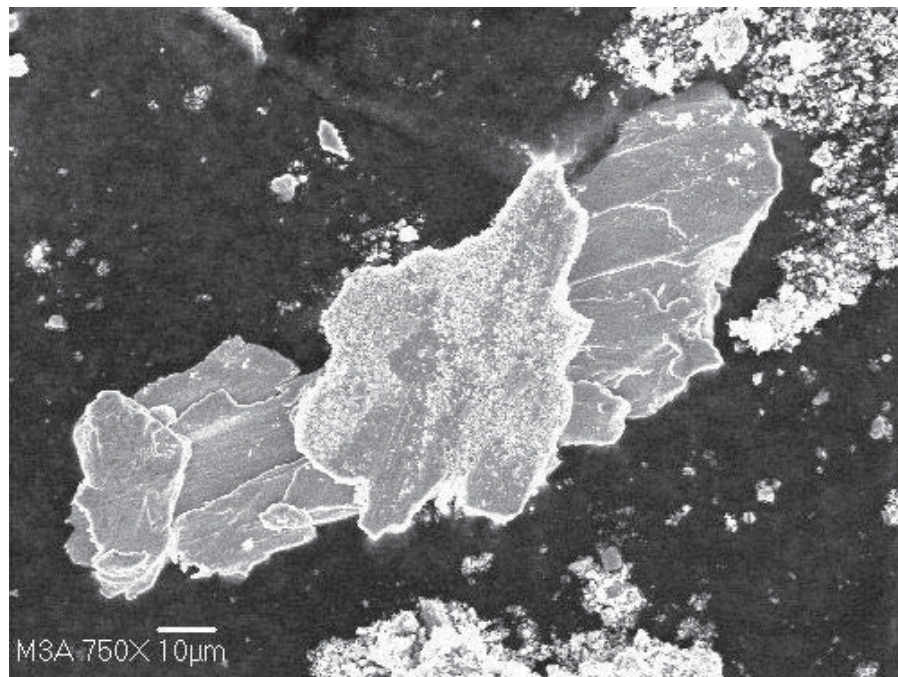


Figura 4.34 Partículas desgastadas en condición de carga de 24.5 N después de un recorrido 3,000 m, a una velocidad de deslizamiento de 2.05 m/s.

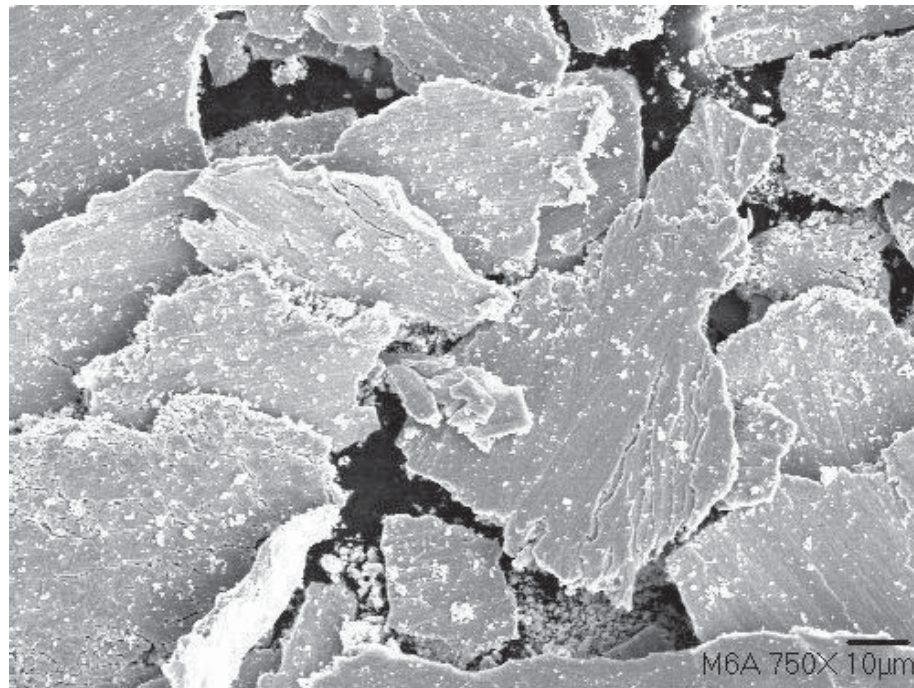


Figura 4.35 Partículas desgastadas en condición de carga media, (44.1 N) después de un recorrido de 3,000 m, a una velocidad de deslizamiento de 2.05 m/s.

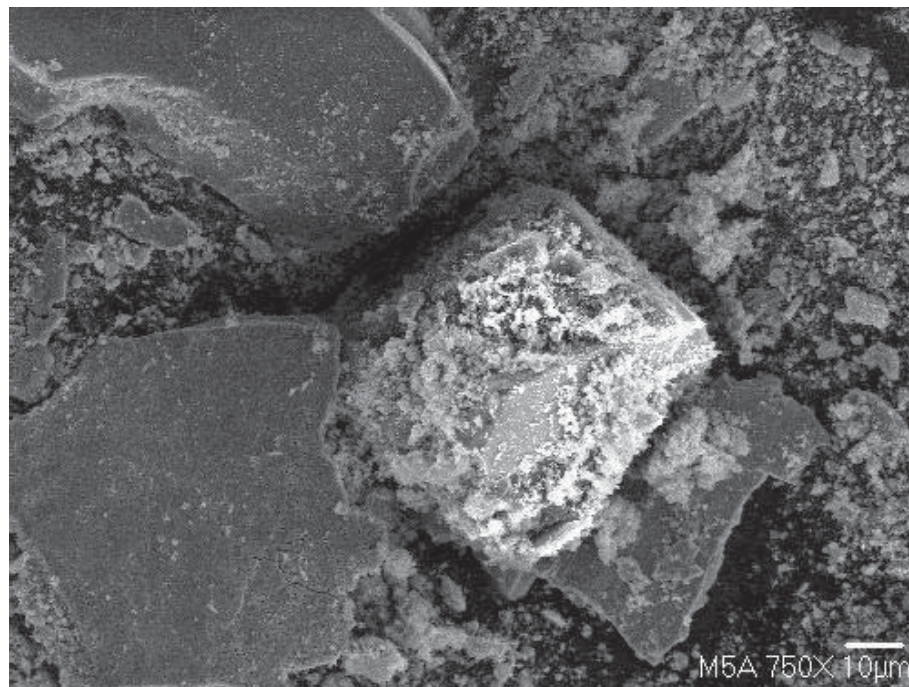


Figura 4.36 Partículas desgastadas en condición de carga media, (44.1 N) después de un recorrido de 6,000 m, a una velocidad de deslizamiento de 0.75 m/s. que presenta residuos visibles de óxido.

Las dimensiones de las partículas de desgaste para la condición de carga baja, 24.5 N, se presentan en los rangos de 100 a 200 μm de largo por 50 a 80 μm de ancho (Figura 4.37). De la aplicación de carga de 44.1 N, las dimensiones se presentan de 80 a 120 μm de ancho y 120 a 600 μm de largo, como puede observarse en la Figura 4.38, cabe mencionar que este tamaño y forma de partícula se obtuvo en el primer ensayo realizado durante los primeros 3,000 metros de deslizamiento sin la presencia de óxido. Se encontraron para esta condición de carga, para un rango de deslizamiento de los 3,000 a los 6,500 metros, partículas de 2.4 μm de espesor como se muestra en la Figura 5.39, donde ya se nota la presencia de óxido.

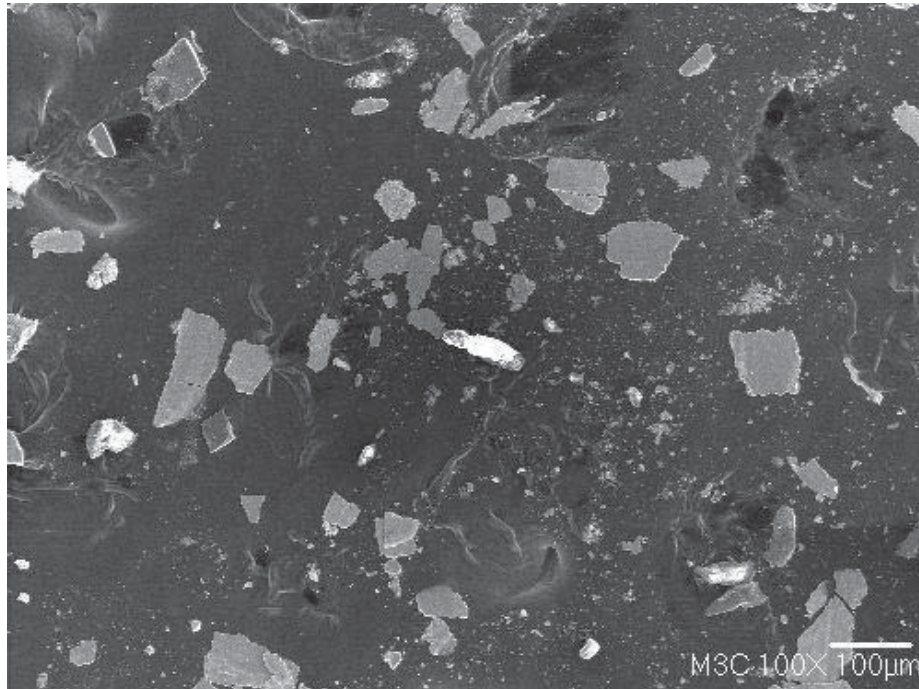


Figura 4.37 Forma y tamaño de partículas desgastadas bajo condiciones de carga de 24.5 N.

En la Figura 4.40 se observa una muestra de la forma y cantidad de partículas producidas bajo condición de carga media, 44.1 N. La forma de las partículas es de hojuelas delgadas y alargadas de dimensiones muy variadas, producidas en gran cantidad.

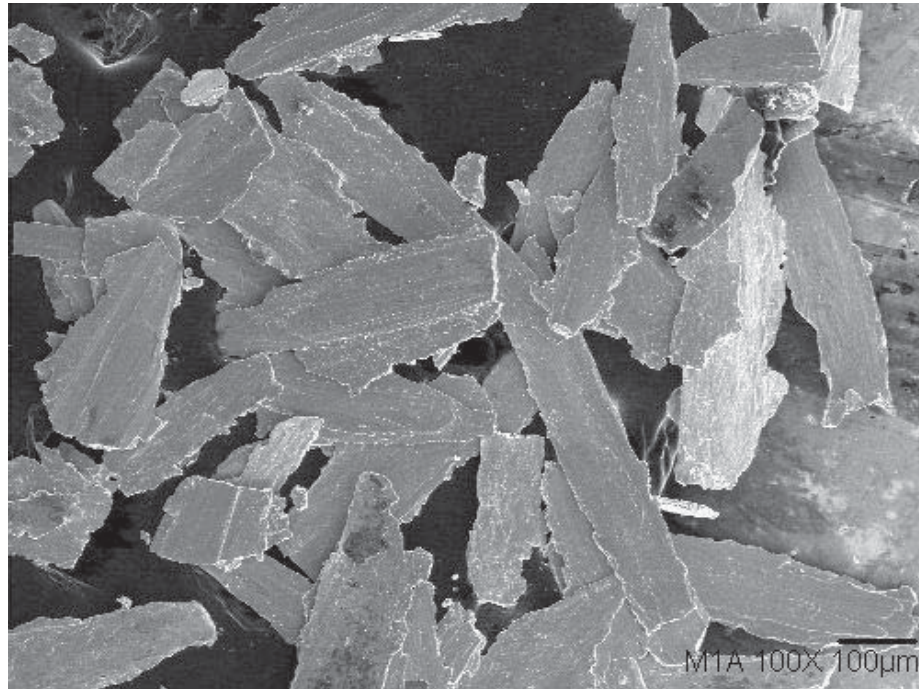


Figura 4.38 Forma y dimensiones de partículas desgastadas para condiciones de carga de 44.1 N, durante los primeros 3,000 m de recorrido.

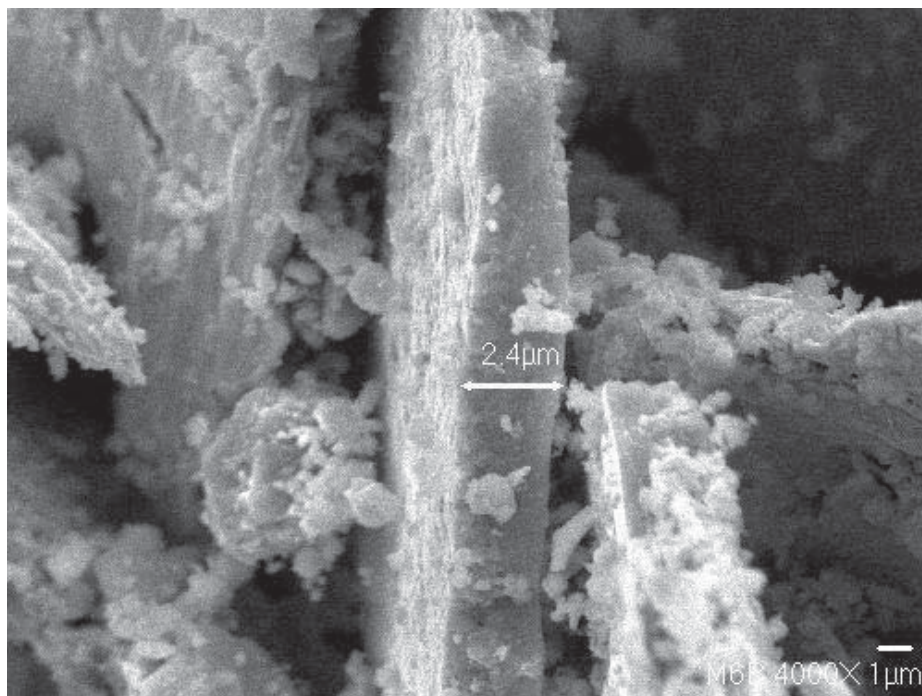


Figura 4.39 Espesor en partículas desgastadas para condiciones de carga de 44.1 N, de los 3,000 a 6,500 m de recorrido.

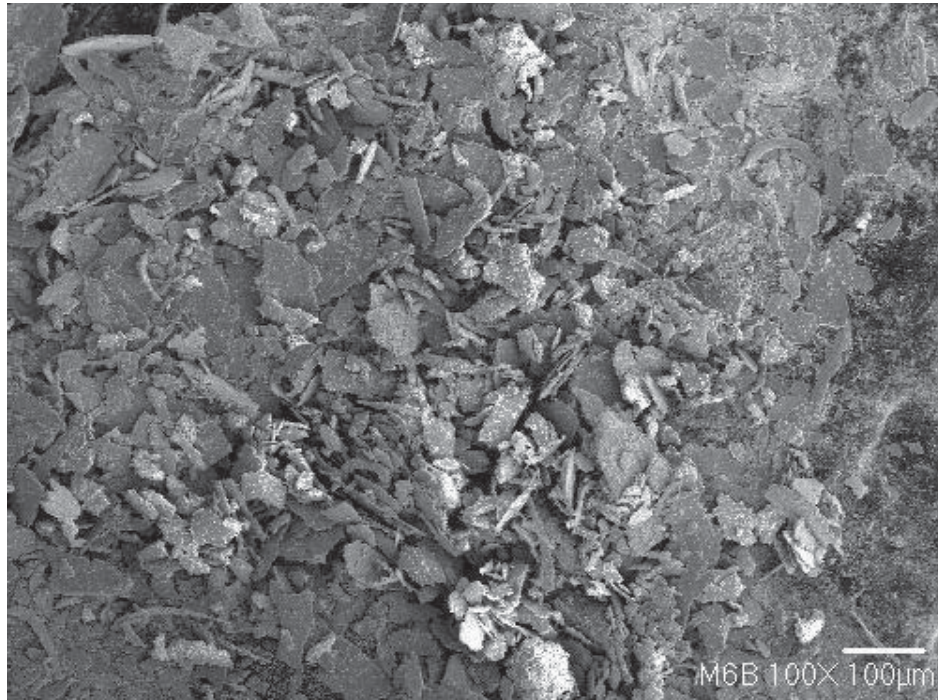


Figura 4.40 Forma y tamaño de partículas desgastadas para condiciones de carga de 44.1 N, de los 3,000 a 6,500 m de recorrido.

Para la condición de carga de 68.6 N en sus tres distintas velocidades de deslizamiento se encontraron partículas libres de material de oxidación, son hojuelas en forma de placa alargada que muestran grietas producto de los esfuerzos a los que fue sometida la superficie de la probeta (Figura 4.41).

En esta etapa de desgaste se pudo observar que el material fue arrancado de manera masiva, ya que es posible observar a simple vista, una gran cantidad de material desprendido, como lo muestra la Figura 4.42.

La tribocapa formada en las condiciones de carga media y baja, presente como óxido, no se observa en estas partículas.

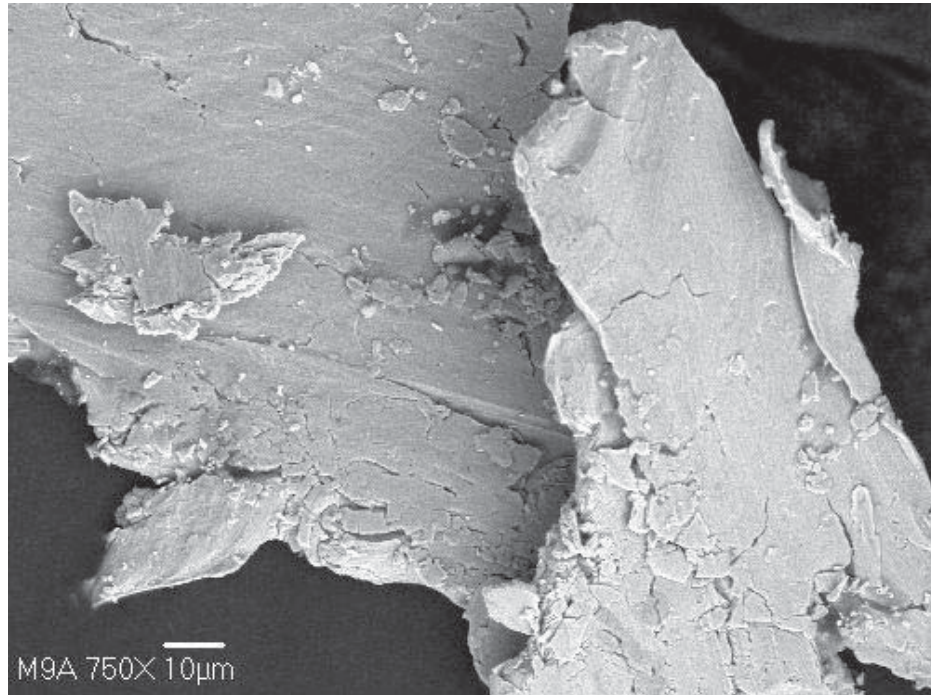


Figura 4.41 Partículas desgastadas bajo condición de carga de 68.6 N libre de óxido con grietas visibles que originan la fragmentación de estas partículas.

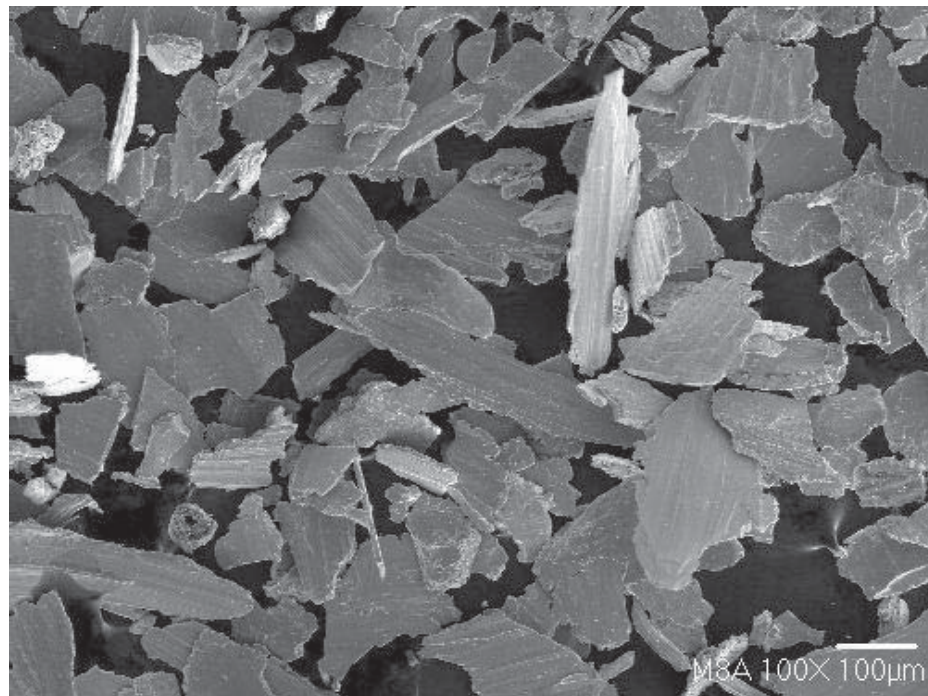


Figura 4.42 Forma y tamaño de partículas de desgaste en condiciones de 68.6 N de carga durante los primeros 3,000 m.

CONCLUSIONES

1. Se diseño y construyó un equipo electromecánico para desarrollar pruebas de desgaste bajo la configuración “espiga sobre disco” y se implementó la instrumentación necesaria para controlar los parámetros de funcionamiento como: velocidad de giro, carga y posición de las probetas de desgaste.

2. La configuración “espiga sobre disco” permitió obtener resultados satisfactorios para el rango de condiciones operativas establecidas, permitiendo obtener información relevante para el tribosistema estudiado Mn-20%, Al-2%, Si-2%, C-0.4%, Fe-Balance, en donde se pudo establecer el rango de valores para la transición de desgaste moderado a desgaste severo.

3. El régimen de desgaste moderado se obtuvo bajo la aplicación de cargas de 24.525 y 41.145 N respectivamente, bajo los tres distintos rangos de velocidad de giro. En este régimen de desgaste se produjeron partículas de desgaste en forma de hojuelas delgadas y alargadas de dimensiones muy variadas, producidas en gran cantidad, con presencia de óxido.

4. El régimen de desgaste severo se manifestó para la carga aplicada de 68.67 N en sus tres rangos de velocidad de deslizamiento, donde se encontraron partículas libres de material de oxidación, son hojuelas en forma de placa alargada que muestran grietas producto de los esfuerzos a los que fue sometida la superficie de la probeta. En esta etapa de desgaste se pudo observar que el material fue arrancado de manera masiva, ya que es posible observar, a simple vista, una gran cantidad de material desprendido

5. El mecanismo de desgaste predominante en el régimen de desgaste moderado fue por delaminación superficial combinado con un mecanismo de desgaste por oxidación, producto de la interacción del oxígeno del aire en la tribocapa formada entre las superficies del disco y de las probetas durante los ensayos de desgaste.

6. Para el régimen de desgaste severo se presento un desgaste por delaminación superficial, incluida una combinación con desgaste adhesivo para las condiciones de máxima carga y máxima velocidad de deslizamiento, pues se notaron a simple vista

partículas de material plásticamente deformado y adherido a la superficie del disco de desgaste.

7. Se puede establecer que la carga aplicada es el parámetro primordial que decide la transición de un régimen de desgaste moderado a un régimen de desgaste severo.

BIBLIOGRAFÍA

- [1]. *Annual Book of ASTM Standard 2001*, sección 3, volumen 3.02, **Metals Test Methods and Analytical Procedures**. Pag. 417-421 (código)
- [2]. *A. D. Sarkar, Desgaste de Materiales*, 1990. Pag. 17-23 (libro)
- [3] <http://www.ecoeduca.cl/chatarra/acero2.htm>
- [4] http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/080/htm/sec_8.htm
- [5] O. Grässel, L. Krüger, G. Frommeyer, L.W. Meyer, **High Strength Fe-Mn-(Al, Si) TRIP/TWIP Steel Development-Properties-Application** [J]. *International J Plasticity*, 2000, 16: 1391- 409.
- [6]Z.L. Mi, D.Tang, L. Yan et al. **High Strength and High Plasticity TWIP Steel for Modern Vehicle** [J]. *Mater SciTechnol*, 2005, 21(4): 451-454.
- [7] H. Ding, Z.Y. Tang, W. Li, M. Wang, D. Song, **Microstructures and Mechanical Properties of Fe-Mn-(Al Si) TRIP/TWIP Steels**, *Journal of Iron and Steel Research, International*. 2006, 13(6) : 66-70
- [8] *ASM Handbook Volume 4. Heat Treating*. ASM International 1991
- [9] G. Shang, J. Dong, Y. Min **Impact wear resistance of WC/Hadfield steel composite and its interfacial characteristics**. *Wear*. June 2005
- [10] *ASM Handbook Volume 1. Properties and Selection: Irons, Steels and High performance alloys*. ASM International. 1990
- [11]<http://www.mitecnologico.com/im/Main/AcerosHadfield>
- [12] *ASTM A128/A128M-93*(reapproved 1998) **Standard specification for steel castings, austenitic manganese**. American society for testing and materials.
- [13] G. Frommeyer, E.J. Drewes, B. Engl. **Physical and mechanical properties of iron-aluminium-(Mn, Si) lightweight steels***. *La Revue de Métallurgie*.2000
- [14] <http://www.columbiasteel.com/Spanish/xtralloy.manganese.crusher.parts.html>

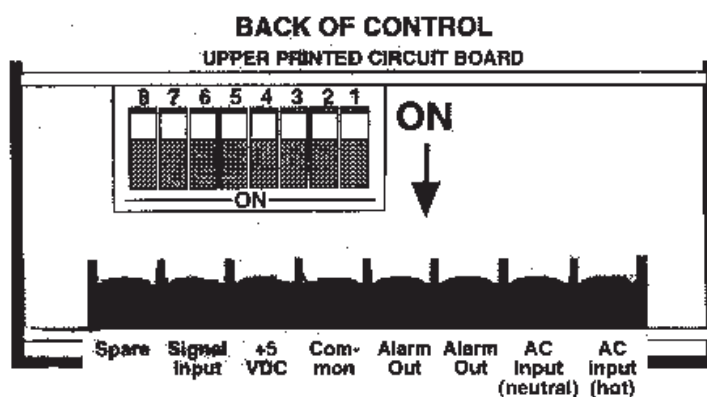
- [15] http://www.bnamericas.com/news/metales/Arcelor_y_ThyssenKrupp_desarrollan_acer_o_con_manganeso
- [16] *A. García de la Rosa. Caracterización metalográfica de aceros avanzados de alta resistencia microaleados con Boro.* 2009 Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería Mecánica, UMSNH.
- [17] *J. Baron, J. Shaw, Formado de Aceros Avanzados de Alta Resistencia,* Metal Forming, México, 2006, <http://mexico.pma.org>.
- [18] *SSAB Swedish Steel S.L., Aceros Avanzados de Alta Resistencia,* Madrid España, Marzo de 2006, paper ES900., <http://www.ssab.es>.
- [19] *SSAB Swedish Steel S. L., Mayor Resistencia Menor Peso,* Madrid España, Marzo de 2006, paper ES2000., <http://www.ssab.es>.
- [20] O. Grassel, G. Frommeyer, *Material Science and Technology* 14 (1998), pp. 1213-1216.
- [21] G. Frommeyer, U. Brück, P. Neumann, **Supra-Ductile and High-Strength Manganese-TRIP/TWIP Steels for High Energy Absorption Purposes,** *ISIJ Int.* 43 (2003), pp. 438-446.
- [22] World Auto-Steel, **Advanced high strength steels (AHSS) application guidelines,** V. 4.1, 2009, pp. 1-338.
- [23] O. Bouaziz, N. Guelton, **Modelling of TWIP effect on work-hardening,** *Materials Science and Engineering A.* Vol. 319–321 (2001), pp. 246-249.
- [24] K. Sato, K. Tanaka, Y. Inoue, **Determination of the equilibrium in the iron rich portion of the Fe-Mn-Al system,** *ISIJ Int.* 29 (1989), pp. 788-792.
- [25] P.Y. Volosevich, V.N. Grindnev, Y.N. Petrov, **Manganese influence on stacking-fault energy in iron-manganese alloys,** *Phys. Met. Metallogr.* 42 (1976), pp. 126 -130.
- [26] Y.K. Lee, C.S. Choi, **Driving force for martensitic transformation and stacking fault energy of Fe-Mn binary system,** *Metall. Mater. Trans. A* 31A (2000), pp. 355-360.

- [27] J. Charles, A. Berghezan, A. Lutts, **Structural and mechanical properties of high-alloy manganese-aluminum steels**, J. Phys. 43 (1982), pp. C4-435.
- [28] S. Takaki, T. Furuya, Y. Tokunaga, **Effect of si and al additions on the low temperature toughness and fracture mode of Fe-27Mn alloys**, *ISIJ Int.* 30 (1990), pp. 632-638.
- [29] S. Lampman (1997), **Friction and wear testing Source Book of Selected References 9from ASTM Standards and ASM Handbooks**, ASM International, ASTM
- [30] D. A. Rigney, W.A. Glaeser (1978), **Source Book on Wear control Technology** American Society of Metals Engineering Bookself, Metals Park Ohio, First Edition 1978.
- [31] V. H. Baltasar Hernández, **Comportamiento al desgaste de un material compuesto Al 6061 / Al₂O₃ en condiciones de envejecido natural y envejecido artificial**, 2001
- [32] A.D. Sarkar B (1990), **Desgaste de Metales**, Editorial Limusa de Noriega Editores, Primera edición 1990.
- [33] K.L. Johnson, **Contact Mechanics**, Cambridge Press, Cambridge, U.K. 1985
- [34] C. Maldonado, **The Effect of Interlayers on the Properties of Dissimilar Friction Welds**. PhD Thesis, Department of Metallurgy & Materials Science, University Of Toronto, Toronto, Ont. Canada, 2001.
- [35]
http://iirsacero.com.mx/index.php?option=com_content&task=view&id=34&Itemid=49
- [36] <http://www.acerospalmexico.com.mx/4340.htm>
- [37] F. Martínez Pérez, **LA TRIBOLOGÍA Ciencia y técnica para el mantenimiento**, Editorial Limusa de Noriega Editores, segunda reimpresión 2002.

ANEXO 1

PROGRAMACIÓN DEL CONTROL DE VELOCIDAD, TACOMETRO

La programabilidad del DTM8000 no sólo muestra la velocidad del motor, sino también las velocidades de árboles manejadas del motor. Las fórmulas de la programación toman en las cuenta paseo tren proporciones para lograr las lecturas del despliegue deseadas. El punto decimal es seleccionable y puede apagarse.



Switch 7 ON = Programar Modo.

Switch 1 ON = Introducir el valor de “M” mediante el display, colocar el switch 1 en posición OFF.

Switch 2 ON = Introducir el valor de “D” mediante el display, colocar el switch 2 en posición OFF.

Switch 5 ON = Introducir la posición del punto decimal mediante el display, colocar el switch 5 en posición OFF.

Switch 7 OFF = Regresar al modo de trabajo.

ANEXO 2

PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO DE DESGASTE SEGÚN LA NORMA ASTM 99[1]

I.- Antes de iniciar la prueba, y antes de a medir o pesar, limpie y seque los especímenes. Tenga el cuidado para quitar toda la suciedad y la materia extraña de los especímenes. Use agentes de limpieza y solventes. Especímenes de Acero (ferromagnéticos) que tienen magnetismo residual deben desmagnetizarse. Se debe informar los métodos usados para limpiar.

II.- Medir apropiadamente las dimensiones del espécimen lo más cercano a $2.5 \mu\text{m}$ o pesar los especímenes lo más cercano a 0.0001 g .

III.- Insertar el disco firmemente en el dispositivo de manera que el disco este perpendicular ($\pm 1^\circ$) al eje de la resolución.

IV.- Insertar el “pin” en el portamuestras y, si es necesario, ajustar para que el “pin” este perpendicular ($\pm 1^\circ$) a la superficie del disco para mantener el las condiciones del contacto necesarias.

V.- Agregar la masa apropiada al brazo del sistema para que desarrolle la fuerza seleccionada que presione al alfiler “pin” contra el disco.

VI.- Encender el motor y ajustar la velocidad al valor deseado mientras el espécimen del alfiler no se encuentre en contacto con el disco. Detenga el motor.

VII.- Seleccione el contador de la revolución (o equivalente) a la velocidad deseada.

VIII.- Comenzar la prueba con los especímenes en contacto bajo la carga.

La prueba no se desarrolla hasta que se logre establecer el número deseado de revoluciones.

IX.- Remover los especímenes y limpiarlos de cualquier residuo de desgaste. Note la existencia de residuos delante o cerca de la zona desgastada como: material desplazado, decoloramiento, microfisuración o manchando.

X.- Medir nuevamente las dimensiones del espécimen lo más cercano $2.5 \mu\text{m}$ o pesar los especímenes lo más cercanos 0.0001 g .