

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

“EFECTO DE LA CARGA NORMAL, LA VELOCIDAD Y LA DISTANCIA SOBRE LA RESISTENCIA AL DESGASTE POR DESLIZAMIENTO Y ABRASION DE UN RECUBRIMIENTO ELECTROLITICO DE CROMO DURO”

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por los bachilleres:
Bello González, Angélica A
Tuesta Sánchez, Wilmer F.
Para Optar al Título de
Ingeniero Mecánico

Caracas, 2013

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

“EFECTO DE LA CARGA NORMAL, LA VELOCIDAD Y LA DISTANCIA SOBRE LA RESISTENCIA AL DESGASTE POR DESLIZAMIENTO Y ABRASION DE UN RECUBRIMIENTO ELECTROLITICO DE CROMO DURO”

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Pedro Cadenas

Trabajo especial de grado Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por los bachilleres:
Bello González, Angélica A
Tuesta, Wilmer
Para Optar al Título
De Ingeniero Mecánico

Caracas, 2013

ACTA



ACTA

Los abajo firmantes, Miembros del Jurado Examinador designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por los Bachilleres:

Angélica Bello y Wilmer Tuesta

Titulado

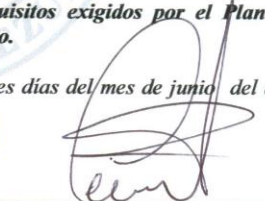
“Efecto de la Carga Normal, la Velocidad y la Distancia sobre la Resistencia al Desgaste por Deslizamiento y Abrasión de un Recubrimiento Electrolítico de Cromo Duro”

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el Plan de Estudios conducente al Título de Ingeniero Mecánico.

Acta se levanta en la ciudad de Caracas, a los tres días del mes de junio del año dos mil trece.


Prof. María de los A. Rodríguez
Jurado




Prof. Crisanto Villalobos
Jurado


Prof. Pedro Cadenas
Tutor

DEDICATORIA

A Dios, Todopoderoso, Rey de Reyes y Señor de Señores, por darme la Bendición de poder culminar satisfactoriamente este trabajo, por brindarme Tolerancia, Fortaleza, Valor, Sabiduría, Inteligencia, Salud, Bienestar, Consuelo, Tranquilidad y Paz.

A mis hijos, Alexandra Guillen Bello y Egdar Rafael Guillen Bello por su amor y paciencia con los estudios de su mami.

A mi madre, Teresa González, a mi hermana Eunice Hollihan, y mi tía Rosaura González, quienes con su amor, mucha paciencia y esperanzas puestas en mí, me ayudaron en los momentos difíciles a creer en mí misma y convencerme que Sí se Puede.

Angélica Bello

DEDICATORIA

A Dios, el Padre Creador y dador de vida, a mis padres Rosalba Tuesta y Milciades Tuesta por siempre estar ahí en todos los momentos vividos durante la carrera, a mi hermana Madeleing Tuesta y a mi sobrina Eva.

A la enseñanza, por los invaluable conocimientos adquiridos y por brindarme el conocimiento de las herramientas necesarias para afrontar y mejorar mi vida en todo ámbito.

A mi gran amiga Eva García, por apoyarme en todo momento y ser siempre una verdadera amiga incondicional y una maravillosa persona.

A todos mis alumnos particulares que me permitieron reforzar y ampliar mis conocimientos sobre física y matemática básica, así como también sostenerme económicamente durante el estudio de la carrera.

Wilmer Tuesta

AGRADECIMIENTOS

A la Ilustre Universidad Central de Venezuela, la máxima casa de estudios del país, por brindarnos la oportunidad de crecer personalmente, profesionalmente con Ética y Moral y de cumplir nuestro gran sueño de obtener el título de ingeniero en beneficio de nuestro país y nuestra familia.

A nuestro Tutor el Doctor en Ingeniería Mecánica el Prof. Pedro Cadenas, por creer en nosotros, por todo su apoyo tanto académicamente como personal y brindarnos la oportunidad de cumplir con este Trabajo Especial de Grado bajo su asesoramiento.

A la Escuela de Ingeniería Mecánica, por brindarnos la oportunidad de cumplir satisfactoriamente todos los requisitos para alcanzar nuestro grado académico, a los profesores: Antonio Barragán, Crisanto Villalobos, Augusto Carrillo, Ing. Rafael Farfán, Ing. Maryangel Guzmán, Licenciada de la Biblioteca de Ing. Mecánica, T.S.U. Hamyit Blanco, T.S:U. Oneida Gutiérrez, Jhon, Carlos, a los preparadores de los laboratorios, a los técnicos de los laboratorios de mecanizado.

A las empresas TURBO CROMO C.A., Ing. Nieves y a GOMAINCA, C.A., Ing. Jorge Shell, por donarnos sus servicios para la realización de este trabajo.

A los profesores de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales en especial a la profesora Maribel Suarez y su grupo de preparadores por su colaboración en el préstamo del Laboratorio de Corrosión para la realización de los ensayos.

Al FONACIT por haber financiado la totalidad de todos los gastos para la realización de este TEG a través del Proyecto N° PEI-2011001106.

A nuestros compañeros de aula, A TODOS, gracias por su apoyo.

RESUMEN

Bello G, Angélica A y Tuesta Sánchez, Wilmer F.

EFFECTO DE LA CARGA NORMAL, LA VELOCIDAD Y LA DISTANCIA SOBRE LA RESISTENCIA AL DESGASTE POR DESLIZAMIENTO Y ABRASION DE UN RECUBRIMIENTO ELECTROLÍTICO DE CROMO DURO

Tutor Académico: Prof. Pedro Cadenas, U.C.V. Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica. Año 2013, 150 pág.

Palabras Clave: Recubrimiento Electrolítico Cromo Duro, desgaste deslizante, abrasión.

En el presente trabajo se estudiaron los efectos de la carga normal, la velocidad de deslizamiento y la distancia, sobre el desgaste por deslizamiento y abrasión de un recubrimiento electrolítico de Cromo Duro utilizando como contraparte al acero AISI D-2. Para esto se utilizó un tribómetro con la configuración geométrica bloque sobre anillo ("block on ring"), según la norma ASTM D2714-88. Todos los ensayos se realizaron al aire en ausencia de lubricantes. Las cargas normales aplicadas fueron: 11.1, 22.3, 33.4, 44.5 N y las velocidades de deslizamiento: 0.1, 0.2, 0.4, 0.5 m/s, para una distancia de deslizamiento constante de 550m. Se determinó que la tasa de desgaste de los bloques aumentó por efecto del aumento de la carga y por efecto del aumento de la velocidad. Se encontró que para los anillos la tasa de desgaste aumentó por el efecto del aumento de la carga aplicada. El aumento tanto de la carga, como el aumento de la velocidad, tuvo como efecto el aumento de la temperatura. Se encontró que el coeficiente de fricción disminuye con el aumento de la velocidad de deslizamiento para todas las categorías de la carga normal aplicada. La disminución en los valores en el coeficiente de fricción promedio va desde 0.7877 para la carga de 11.1 N y la velocidad de deslizamiento igual a 0.1 m/s, hasta 0.4375 para la carga normal de 44.5 N y la velocidad de deslizamiento de 0.5 m/s. El efecto de la Carga aplicada y la velocidad de deslizamiento con respecto a la temperatura es un aumento de la misma al aumentar dichos factores. En el estudio del desgaste por abrasión se utilizó un equipo construido según a la norma G65-00, con cargas aplicadas de 1.12, 2.23 y 4.45N con tiempos de 60, 150 y 300s girando a 239 rpm, obteniéndose que la pérdida volumétrica presente aumenta a medida que se incrementa la carga aplicada y aumenta igualmente a medida que se recorria mayores distancias dentro de las categorías ensayadas. Los valores de las tasas de desgaste encontradas en el presente trabajo corresponden a un mecanismo de desgaste suave (menores a $1E-05\text{mm}^3/\text{m}$).

INDICE GENERAL

ACTA	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTOS	vi
RESUMEN	vii
INDICE GENERAL	viii
INDICE DE FIGURAS	xiii
INDICE DE TABLAS	xvii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I	6
EL PROBLEMA	6
1.2.OBJETIVO DE LA INVESTIGACIÓN	9
1.2.1. Objetivo General	9
1.2.2. Objetivos Específicos	9
1.3. JUSTIFICACIÓN	11
1.4. ALCANCE	12
1.5. ANALISIS PRELIMINAR O ANTECEDENTES	13
CAPITULO II	21
MARCO TEORICO	21
2.1. RECUBRIMIENTO DE CROMO DURO	22
2.1.1. PRINCIPALES USOS DEL CROMO DURO	23
2.1.1.1. Resistencia al desgaste y a la corrosión	23
2.1.2. SELECCIÓN DE FACTORES PARA EL USO DEL CROMO DURO	24
2.1.2.1. Dureza	26
2.1.2.2. Tamaño	26
2.1.2.3. Metal base	26
2.1.3. CARACTERÍSTICAS Y CONSIDERACIONES DEL CROMO DURO	27
2.1.3.1. Relación entre micro grietas, esfuerzos residuales y dureza	27

2.1.3.2. Efecto de la temperatura	29
2.1.3.3. Costos	29
2.2. DESGASTE	30
2.2.1. Concepto Básico de la Adhesión (Cadenas H, Pedro, 2005)	30
2.3. GRÁFICAS TRIBOLÓGICAS.....	33
2.3.1. Curva Maestra Fricción Vs tiempo	34
2.3.2. Curva Maestra Desgaste Vs tiempo	36
2.4. MECANISMOS DE DESGASTE	38
2.4.1. Desgaste Adhesivo	38
2.4.2. Desgaste Abrasivo	39
2.4.2.1. Tipos de abrasión	40
2.4.2.1.1. Abrasión pura o de bajo esfuerzo	40
2.4.2.1.2. Abrasión de alto esfuerzo	40
2.4.2.1.3. Abrasión por desgarramiento	41
2.4.3. Desgaste por erosión	41
2.4.4. Desgaste por fatiga	41
2.4.5. Desgaste por Corrosión.....	42
2.4.6. Desgaste micro-oscilatorio o fretting corrosivo	42
2.5. CLASIFICACION DEL DESGASTE	42
2.6 TEORÍAS SOBRE EL DESGASTE.....	45
2.6.1. Teoría de Adhesión	45
2.6.2. Teoría de la Delaminación.....	47
2.6.3. Teorías relacionadas con fatiga	49
2.6.4. Teoría del desgaste oxidativo.....	50
2.6.5. Teoría del deterioro cíclico	52
2.7. FACTORES QUE INFLUYEN SIGNIFICATIVAMENTE EN EL DESGASTE	53
2.7.1. Carga Normal	53
2.7.2. Distancia recorrida	53
2.7.3. Velocidad de Deslizamiento	55

2.7.4. Ambiente	55
2.8. DISEÑO EXPERIMENTAL FACTORIAL	56
CAPÍTULO III	58
3.1. INVESTIGACIÓN.....	59
3.1.1. Investigación Documental	59
3.1.2. Investigación Experimental.....	59
3.2. PROCEDIMIENTOS Y ACTIVIDADES.....	60
3.3. MATERIAL.....	61
3.3.1. Deposición por electrolisis de recubrimiento de Cromo Duro.....	62
3.4. FABRICACIÓN DE LAS PROBETAS	63
3.5. DISTRIBUCIÓN DE LAS PROBETAS.....	64
3.6. PROCEDIMIENTO PARA LOS ENSAYOS DE DESGASTE	65
3.6.1. Limpieza de las probetas.....	65
3.6.2. Descripción del Equipo.....	66
3.7. PARAMETROS DEL ENSAYO.....	70
3.8. ENSAYOS DE DUREZA ABSOLUTA.....	71
3.9. ENSAYO DE ABRASIÓN	72
3.9.1. Procedimiento a utilizar para ensayar en la máquina de abrasión	75
3.9.2. Método para el Cálculo de la densidad de los recubrimientos.....	76
3.9.3. Pérdida Volumétrica	77
3.10 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (MEB)	79
CAPITULO IV. PRESENTACION Y ANALISIS DE RESULTADOS	
4.1. Resultados Obtenidos	81
4.1.1. Resultados Experimentales	83
4.1.2. Resultados Calculados.....	87
4.2. Análisis de resultados	90
4.2.1. Efecto de la velocidad de deslizamiento sobre el coeficiente de fricción	90
4.2.2. Efecto de la carga aplicada sobre el coeficiente de fricción.....	92

4.2.3. Efecto de la carga sobre la temperatura	100
4.2.4. Efecto de la velocidad sobre la temperatura.....	101
4.2.5. Efecto de la carga sobre la tasa de desgaste del bloque	103
4.2.6. Efecto de la velocidad sobre la tasa de desgaste del bloque	106
4.2.7. Efecto de la carga sobre la tasa de desgaste del anillo.....	111
4.2.8. Efecto de la velocidad sobre la tasa de desgaste del anillo	113
4.2.9. Análisis Comparativo de los resultados obtenidos de la Tasa de Desgaste y el Coeficiente Específico de Desgaste	118
4.2.10. Efecto de la carga sobre el volumen de desgaste de la pletina en el ensayo de abrasión	119
4.2.11. Evaluación de la Micro dureza	121
4.3. Análisis Micro estructural del Recubrimiento de Cromo Duro	124
4.3.1. Análisis Micro estructural por Microscopia Electrónica de barrido (MEB) del recubrimiento de Cromo Duro sometidos a desgaste por deslizamiento	125
4.3.2. Mecanismos de Desgaste	130

CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones	149
5.2. Recomendaciones	152
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	154

ANEXOS

ANEXOS A: GRAFICAS COEFICIENTE DE FRICCION VS. DISTANCIA PARA VALORES DE CARGA APLICADA CONSTANTE

A-1: Para 11.1N

A-2: Para 22.3N

A-3: Para 33.4N

A-4: Para 44.5N

ANEXOS B: GRAFICAS TEMPERATURA VS. DISTANCIA PARA VALORES DE CARGA APLICADA CONSTANTE

B-1: Para 11.1N

B-2: Para 22.3N

B-3: Para 33.4N

B-4: Para 44.5N

ANEXOS C: GRAFICAS COEFICIENTE DE FRICCION VS. DISTANCIA
PARA VALORES DE VELOCIDAD CONSTANTE

C-1: Para 0.1m/s

C-2: Para 0.2m/s

C-3: Para 0.4m/s

C-4: Para 0.5m/s

ANEXOS D: GRAFICAS TEMPERATURA VS. DISTANCIA PARA VALORES
DE VELOCIDAD CONSTANTE

D-1: Para 0.1m/s

D-2: Para 0.2m/s

D-3: Para 0.4m/s

D-4: Para 0.5m/s

ANEXOS E: GRAFICAS COEFICIENTE DE FRICCIÓN PROMEDIO VS.
DISTANCIA

E-1: : Para velocidad de deslizamiento constante

E-2: : Para carga aplicada constante

ANEXOS F: GRAFICAS TEMPERATURA PROMEDIO VS. DISTANCIA

F-1: : Para velocidad de deslizamiento constante

F-2: : Para carga aplicada constante

INDICE DE FIGURAS

FIGURA:	Pagina
2.1: Curva maestra coeficiente de fricción-tiempo	35
2.2: Curva maestra Desgaste-tiempo.....	36
2.3: Representación esquemática para la formación de una partícula de desgaste por delaminación	49
3.1: Diseño y dimensiones del bloque para el ensayo bloque sobre anillo (Duarte y Farfán, 2011)	63
3.2: Diseño y dimensiones del anillo para el ensayo de bloque sobre anillo. (Duarte y Farfán, 2011)	64
3.3: Dibujo esquematizado de la maquina FALEX alfa LFW1.....	67
3.4: Microdurómetro	72
3.5: Máquina de ensayos de abrasión de la Escuela de Ingeniería Mecánica. UCV	73
4.1: Grafica de coeficiente de fricción promedio f contra velocidad de deslizamiento	91
4.2: Gráfica coeficiente de fricción promedio f contra carga normal aplicada F_n	94
4.3: Grafica a) Coeficiente de fricción promedio contra distancia deslizada para la categoría de 0.1 m/s de velocidad de deslizamiento b) Temperatura promedio contra distancia deslizada para la categoría de 0.1 m/s de velocidad de deslizamiento	95
4.4: a) Coeficiente de fricción promedio contra distancia deslizada para la categoría de 0.5 m/s de velocidad de deslizamiento	97
4.4: b) Temperatura promedio contra distancia deslizada para la categoría de 0.5 m/s de velocidad de deslizamiento.....	97
4.5: Gráfica a) Coeficiente de fricción promedio contra distancia deslizada para la condición favorable de carga de 11.1 N	

y velocidad de 0.1 m/s (F1,V1)	
b) Temperatura promedio contra distancia deslizada para la condición desfavorable de carga de 44.5 N y velocidad de 0.5 m/s (F4,V4)	99
4.6: Gráfica Coeficiente de fricción contra distancia deslizada para los 10 primeros metros de distancia deslizada para las condición favorable y desfavorable	101
4.7: Gráfica de temperatura promedio T contra carga aplicada F_n	100
4.8: Gráfica de temperatura promedio T del bloque contra velocidad de deslizamiento V.....	104
4.9: Gráfica Tasa de desgaste de los bloques recubiertos con cromo duro contra carga aplicada	106
4.10: Gráfica Tasa de desgaste del recubrimiento de cromo duro en función de la carga normal V	107
4.11: Gráfica Tasa de desgaste del recubrimiento de cromo duro en función de la velocidad de deslizamiento	108
4.12: Gráfica Tasa de desgaste contra velocidad de deslizamiento.....	111
4.13: Fotografías de la superficie desgastada de los bloques recubiertos con cromo duro para todas las categorías de carga y velocidad.....	112
4.14: Tasa de desgaste contra velocidad de deslizamiento para los anillos	115
4.15: Gráfica Tasa de desgaste contra carga aplicada para los anillos	116
4.16: Gráfica Tasa de desgaste contra carga normal para los anillos	117
4.17: Gráfica Tasa de desgaste contra velocidad de deslizamiento para los anillos	118
4.18: Fotografías de la superficie desgastada de los anillos AISI D2 para todas las categorías de carga y velocidad	122

4.19: Perdida volumétrica contra carga aplicada para el ensayo de abrasión	127
4.20: Gráfica Micro dureza Vickers del recubrimiento de cromo duro y del substrato contra el inverso de la diagonal de la impronta (1/L)	128
4.21: Metalografía de recubrimiento de Cromo Duro a 500X	130
4.22: a) Micro estructura del recubrimiento de Cromo Duro (MEB 300X)	
b) EDX realizado en la fase gris oscura	
c) Elementos presentes	131
4.23: a) Micro estructura del recubrimiento de Cromo Duro (MEB 300X)	
b) EDX realizado en la fase gris clara	
c) Elementos presentes	132
4.24: a) Micro estructura de la contraparte anillo AISI D-2 (MEB 300X)	
b) EDX realizado en la fase gris oscura	
c) Elementos presentes	133
4.25: a) Micro estructura de la contraparte anillo AISI D-2 (MEB 300X)	
b) EDX realizado en la fase gris clara	
c) Elementos presentes	134
4.26: a) Huella de la superficie desgastada	
Condición: ($F_n = 11.13\text{N}$ y $V = 0.1\text{ m/s}$) (30X)	
b) Huella de la superficie desgastada del anillo contraparte	
Condición: ($F_n = 11.13\text{ N}$ y $V = 0.1\text{ m/s}$) (30X)	137
4.27: a) Huella de la superficie desgastada	
Condición: ($F_n = 11.13\text{N}$ y $V = 0.1\text{ m/s}$) (100X)	
b) Huella de la superficie desgastada del anillo contraparte	

Condición: ($F_n = 11.13 \text{ N}$ y $V = 0.1 \text{ m/s}$) (100X)	138
4.28: a) Huella de la superficie desgastada	
Condición: ($F_n = 11.13 \text{ N}$ y $V = 0.1 \text{ m/s}$) (300X)	
b) Huella de la superficie desgastada del anillo contraparte	
Condición: ($F_n = 11.13 \text{ N}$ y $V = 0.1 \text{ m/s}$) (300X)	139
4.29: Huella de la superficie desgastada del anillo contraparte	
Condición: ($F_n = 11.13 \text{ N}$ y $V = 0.1 \text{ m/s}$) (300X)	140
4.30 a) Huella de la superficie desgastada	
Condición: ($F_n = 44.45 \text{ N}$ y $V = 0.5 \text{ m/s}$) (30X)	
b) Huella de la superficie desgastada del anillo contraparte	
Condición: ($F_n = 44.45 \text{ N}$ y $V = 0.5 \text{ m/s}$) (30X)	143
4.31 a) Huella de la superficie desgastada	
Condición: ($F_n = 44.45 \text{ N}$ y $V = 0.5 \text{ m/s}$) (100X)	
b) Huella de la superficie desgastada del anillo contraparte	
Condición: ($F_n = 44.45 \text{ N}$ y $V = 0.5 \text{ m/s}$) (100X)	144
4.32: a) Huella de la superficie desgastada	
Condición: ($F_n = 44.45 \text{ N}$ y $V = 0.5 \text{ m/s}$) (300X) BSE	
b) Huella de la superficie desgastada del anillo contraparte	
Condición: ($F_n = 44.45 \text{ N}$ y $V = 0.5 \text{ m/s}$) (300X) BSE	145
4.33: Platinas con recubrimiento de Cromo Duro ensayadas por abrasión. Condición: $F_n = 4.45 \text{ N}$ y $t = 300 \text{ s}$	146
4.34: Platinas con recubrimiento de Cromo Duro ensayadas por abrasión. Condición: $F_n = 1.12 \text{ N}$ y $t = 60 \text{ s}$	147

INDICE DE TABLAS

TABLA:	pagina
2.1: Aplicaciones Típicas del Cromo Duro	25
2.2: Valores de dureza del Cromo Duro con distintos indentadores	29
2.3: Clasificación del desgaste de acuerdo a su importancia para la industria. (Eyre, 1978)	38
2.4: Diferencia entre desgaste suave y desgaste severo (Eyre, 1978)....	43
2.5: Valores típicos de coeficientes de desgaste, K con deslizamiento en seco. Se utilizó acero para herramientas como material para desgastar sin lubricación con ensayo de tipo esfera sobre disco (pin-on-disk) en aire. En todas las pruebas los coeficientes de fricción están en el rango $0.18 < f < 0.8$ (Archard y Hirst.1956) *PTFE Politetrafluoretileno	44
3.1: Composición Química del acero AISI 1020	61
3.2: Composición Química del acero AISI D-2	62
3.3: Distribución de las probetas según el tipo de ensayo	65
3.4: Composición del Recubrimiento de Goma (Pinto, Rangel.199).....	74
3.5: Parámetros de Ensayo según la Norma G65-00	75
3.6: Valores de densidad de los recubrimientos	77
4.1: Resultados obtenidos experimentalmente carga = 11.1 N	83
4.2: Resultados obtenidos experimentalmente carga = 22.3 N	83
4.3: Resultados obtenidos experimentalmente carga = 33.4 N	84
4.4: Resultados obtenidos experimentalmente carga = 44.5 N	84
4.5: Resultados obtenidos experimentalmente velocidad = 0.1m/s	85
4.6: Resultados obtenidos experimentalmente velocidad = 0.2 m/s	85
4.7: Resultados obtenidos experimentalmente velocidad = 0.4 m/s	86
4.8: Resultados obtenidos experimentalmente velocidad = 0.5 m/s	86

4.9: Resultados calculados para los bloques recubiertos con cromo duro rango de carga normal constante $F_n = 11.1, 22.3, 33.4$ y 44.5 N	87
4.10: Resultados calculados para los anillos de AISI D 2 desgastados por los bloques recubiertos con cromo duro, rango de carga normal constante $F_n = 11.1, 22.3, 33.4$ y 44.5	88
4.11: Resultados calculados para los bloques recubiertos con cromo duro rango de velocidades constantes $V = 0.1, 0.2, 0.4$ y 0.5 m/s... 88	
4.12: Resultados calculados para los anillos de AISI D 2 desgastados por los bloques recubiertos con cromo duro, rango de carga normal constante $F_n = 11.1, 22.3, 33.4$ y 44.5 N	89
4.13: Curvas de mejor ajuste para la tasa de desgaste contra la velocidad de deslizamiento para los anillos	118
4.14: Valores medidos de masa y valores calculados de perdida de volumen para las pletinas en el ensayo de abrasión	126
4.15: Micro dureza Vickers y valor de la diagonal "L" de la huella para el recubrimiento de cromo duro y para el substrato de acero AISI 1020	128

INTRODUCCIÓN

El ingeniero mecánico recibe adiestramiento para investigar, desarrollar, diseñar, producir, construir, operar y seleccionar diferentes tipos de máquinas, se basa en múltiples disciplinas de la ciencia para lograr los resultados esperados. La Tribología es definida como la ciencia que estudia la fricción y los efectos que tienen lugar entre superficies sólidas que interaccionan en movimiento relativo, de esta manera busca elevar la vida útil de las máquinas, mediante la disminución de la fricción y el desgaste.

El desgaste puede definirse como la pérdida de material de la superficie de un cuerpo como consecuencia de la interacción con otro u otros cuerpos. Esto ocurre en una amplia variedad de operaciones, y en muchas industrias este fenómeno eleva considerablemente el gasto anual por concepto de reposición de piezas desgastadas. Todos los elementos de máquinas, están propensos al desgaste, por ello es de vital importancia el estudio exhaustivo de diversos pares tribológicos con el fin de implementar nuevas tecnologías que minimicen el daño en cuestión y mejoren el rendimiento operacional.

En los últimos veinte años se ha incrementado el interés en la investigación del fenómeno del desgaste, en conseguir las causas que lo originan y en la formulación de leyes que permitan predecir sus efectos. Como una consecuencia de esta necesidad, se han agrupado en un solo campo todas las interacciones que ocurren en el contacto entre sólidos en movimiento relativo, y es lo que constituye en la actualidad la “Tribología” o “Ciencia del Desgaste y la Fricción”.

Un tribosistema está definido por superficies en contacto mecánico bajo movimiento relativo y está sujeto a contacto deslizante y de impacto (carga transitoria).

A este respecto Cubillan (2002), definió el desgaste como la pérdida de material de la tribosuperficie. El tribosistema general puede estar afectado por una multitud de parámetros, la mayoría de los cuales son difíciles de controlar, medir o igualmente identificar.

En la práctica esos parámetros se dividen en tres grupos, diseño, material y medio ambiente, como se puede observar en la Tabla 1.1.

DISEÑO	Condición de la tribosuperficie, tal como material y micro dureza. Área de contacto nominal entre los cuerpos. Forma del contacto mecánico, por ejemplo, contacto puntual entre una bola y un plano, contacto lineal entre un rodillo y un plano. Niveles de las fuerzas aplicadas. Niveles de la velocidad relativa de las superficies de contacto.
MATERIALES	Propiedades del material, mecánicas, físicas y químicas, etc. Estado de fase: gas, líquido, sólido Combinaciones del material, por ejemplo, la solubilidad entre los dos metales Alteraciones inducidas a la fricción y al desgaste, cortes, fisuras, etc.
MEDIO AMBIENTE	Propiedades químicas: potencial químico, agresividad, corrosión, etc.

Propiedades físicas: cambios de temperatura, presión, humedad, atmosfera, etc.

Propiedades mecánicas: coeficiente de fricción, viscosidad, etc.

Debido a la cantidad de factores, y tomando en cuenta que hasta la fecha se han generado gran cantidad de información experimental al respecto, no se ha llegado a proponer patrones generales que permitan predecir con cierto grado de exactitud, como se va a comportar un determinado sistema tribológico en un caso real. Por esta razón los trabajos realizados en esta área han tomado orientaciones diversas de acuerdo a las variables asociadas. Así, los trabajos sobre desgaste se podrían agrupar en tres grandes áreas. Un primer grupo, aquellos que tratan de obtener una comprensión general del fenómeno, con miras al desarrollo de modelos matemáticos que permitan postular las "leyes del desgaste". Un segundo grupo, los que se dedican a estudiar un aspecto en particular, por ejemplo el efecto de alguna variable. Y por último, un tercer grupo, donde se intenta producir información para el uso directo por parte de los diseñadores de máquinas e ingenieros de mantenimiento. El presente trabajo especial de grado se ubica en el segundo grupo, ya que se pretende evaluar el efecto de la carga normal, la velocidad de deslizamiento y la distancia recorrida sobre la resistencia al desgaste por deslizamiento.

Entre las diversas manifestaciones del desgaste, el producido por deslizamiento es de gran interés para los ingenieros mecánicos, pues se presenta en la mayoría de las máquinas y es una de las principales causas de reemplazo de componentes en la industria.

Aunque la mayoría de los contactos ocurren en presencia de lubricantes, hay casos en los que se producen interacciones en seco o cuando falla el suministro continuo de lubricante, y es en estas condiciones, donde se

pueden fácilmente simular empleando el tribómetro y realizando ensayos de laboratorio sin la presencia de un lubricante.

En los últimos años a medida que surgen nuevos avances en el desarrollo de materiales nos damos cuenta que incrementar la vida útil de una máquina es más factible. Revertir la disminución de la eficiencia utilizando recubrimientos con novedosas aleaciones ya es una opción bastante considerada, más aun cuando se dispone de los recursos tecnológicos para lograrlo.

La experiencia nacional en esta materia ha motivado a grandes fabricantes internacionales para incluir en sus nuevos diseños toda la experiencia desarrollada por ingenieros e investigadores venezolanos en cuanto al uso de recubrimientos como tratamientos superficiales, y hoy en día se pueden ver los frutos de dichas investigaciones en el campo laboral de todo el mundo.

En este trabajo, se utiliza como material para formar el recubrimiento por electrolisis, el Cromo Duro, en la cual el cromo es Electro depositado sobre la superficie de los materiales metálicos desde una solución (acuosa) que básicamente contiene iones de, Cr^{+6} , Cr^{+3} , SO_4^{-2} , y aditivos especiales. El proceso de cromado duro se diferencia del cromado decorativo sustancialmente por lo que no tiene películas intermedias de cobre y níquel; por lo tanto las condiciones del proceso (temperatura ,densidad de corriente, concentración de electrolitos Cr^{+6} , Cr^{+3} , SO_4^{-2} ,y catalizadores) y los tratamientos previos al cromado son muy diferentes; este hecho hace que el cromo electro depositado mediante el proceso del cromado duro para aplicación en ingeniería tenga las propiedades tan especiales en su estructura cristalina que es muy similar al diamante ,es decir cristales cúbicos de tipo (CCC) al cual se debe esencialmente las propiedades como dureza , homogeneidad de película, brillo y otras más que ningún otro elemento metálico reúne. Los

recubrimientos de “cromo duro” o de “cromado duro para aplicación en ingeniería”, cuyo proceso ha sido realizado correctamente, reunirán las siguientes propiedades especiales tales como: elevada resistencia al desgaste, resistencia al rayado, dureza, resistencia a la corrosión, bajo coeficiente de rozamiento y buena conductividad térmica y eléctrica. El recubrimiento de cromo duro soporta adecuadamente altas temperaturas de trabajo (hasta 400°C) sin variar significativamente sus propiedades. Los ensayos para desgaste por deslizamiento sin lubricación y fricción que se han realizado para este recubrimiento, han sido usando un tribómetro con configuración geométrica de bloque sobre anillo o “Block en Ring”, según la norma ASTM G77-98 evaluando el efecto de la carga normal, la velocidad de deslizamiento y la distancia recorrida variando los parámetros operacionales en cuatro niveles, a fin de determinar los regímenes de desgaste suave y desgaste severo como se han reportado para otros pares tribológicos donde se han utilizado otros recubrimientos(Da Silva, 2008). Además también se hizo el ensayo de abrasión según la norma ASTM G65-00. Y para las propiedades mecánicas se realizó el ensayo de microindentación para dureza vickers según la norma ASTM E92-82.

Para la obtención de los resultados de este trabajo, se realiza un diseño de experimentos factorial 4^2 , el cual corresponde a dos variables (carga normal y velocidad de deslizamiento) a cuatro niveles cada una, realizándose tres replicas para cada ensayo.

CAPÍTULO I
EL PROBLEMA

1.1 Planteamiento del Problema

El presente trabajo tiene el propósito de evaluar el efecto de la carga normal, la velocidad y la distancia recorrida sobre la resistencia al desgaste por deslizamiento y abrasión de un recubrimiento electrolítico de cromo duro, debido a que éste es uno de los recubrimientos frecuentemente utilizados en la recuperación de piezas desgastadas en la industria como capas protectoras contra el desgaste, la corrosión y como acabado decorativo.

Para evaluar el efecto de estos factores se utiliza un tribómetro con la configuración geométrica de bloque sobre anillo o "Block on Ring", el cual esta normalizado por la ASTM número D-2714-88. Este aparato permite variar la carga normal y la velocidad de deslizamiento y reporta los valores de fuerza de fricción del par tribológico ensayado en las condiciones experimentales escogidas.

El par tribológico en estudio está compuesto de un anillo de acero AISI D-2 y un bloque de acero AISI 1020 recubierto con Cromo Duro, que representa la contraparte utilizada en estos tipos de ensayos estándar.

En este presente trabajo se hace ensayos a cuatro niveles de carga normal: 44.5, 33.4, 22.3 y 11,1 N, y cuatro niveles de velocidad de deslizamiento: 0.10, 0.20, 0.40, 0.50 m/s; y un nivel de distancia recorrida. 550 m con la finalidad de evaluar el efecto de estas variables sobre el desgaste por deslizamiento sin lubricación Para esto, se sigue un modelo estadístico de diseño de experimentos de dos variables a cuatro niveles (4^2), para verificar el efecto de cada variable sobre la resistencia al desgaste del par tribológico utilizado.

Una vez obtenidos los resultados de los ensayos se analizan las huellas de desgaste producidas, empleando la técnica de microscopía electrónica de barrido (MEB), con el fin de determinar el mecanismo de desgaste.

El volumen desgastado se determina por diferencia de masa multiplicado por la densidad del material desgastado según la norma ASTM D-2714-88.

Para la evaluación de la resistencia al desgaste por abrasión del par tribológico recubrimiento de cromo duro depositado electrolíticamente se utiliza una maquina normalizada por la “American Society of Testing and Materials” (ASTM) según la norma ASTM G -65 para determinar el volumen desgastado.

1.2.OBJETIVO DE LA INVESTIGACIÓN

1.2.1. Objetivo General

El presente trabajo tiene el propósito de evaluar el efecto de la carga normal, la velocidad de deslizamiento y la distancia sobre la resistencia al desgaste por deslizamiento y abrasión de un recubrimiento electrolítico de cromo duro.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Seleccionar el material que hará de contraparte en los ensayos para el recubrimiento en estudio.
- Fabricación de los anillos y los bloques correspondientes a los ensayos a realizar.
- Especificar las condiciones a aplicar en la deposición electrolítica de cromo duro en los bloques.
- Seleccionar los niveles de las variables de ensayo que se utilizarán para el recubrimiento en estudio.
- Determinar experimentalmente el coeficiente de fricción del par tribológico del recubrimiento de cromo duro depositado electrolíticamente y el material seleccionado como contraparte para los cuatro valores de carga normal seleccionados.
- Determinar experimentalmente el coeficiente de fricción del par tribológico del recubrimiento de cromo duro depositado electrolíticamente y el material seleccionado como contraparte para los cuatro valores de velocidad de deslizamiento seleccionados.
- Determinar experimentalmente el coeficiente de fricción del par tribológico del recubrimiento de cromo duro depositado electrolíticamente y el material seleccionado como contraparte para el valor de distancia recorrida seleccionados.

- Determinar experimentalmente el volumen de desgaste de los materiales ensayados.
- Determinar el coeficiente específico de desgaste de los materiales ensayados.
- Graficar los resultados obtenidos de los ensayos realizados.
- Determinar la resistencia al desgaste por abrasión de acuerdo a la ASTM G-65
- Determinar el efecto de la carga, la velocidad y la distancia sobre el desgaste por deslizamiento y abrasión a través de sus gráficas en función de las variables estudiadas.
- Determinar los mecanismos del desgaste por deslizamiento presente en las superficies de los recubrimientos a ensayar por MEB.
- Comparar los resultados obtenidos de la resistencia al desgaste para el par tribológico de recubrimiento de cromo duro contra el acero AISI D-2 con respecto a los consultados en la bibliografía.
- Determinar la dureza en la superficie de los recubrimientos y en la sección transversal de los mismos mediante el ensayo de micro-indentación vickers y establecer comparaciones entre el par tribológico en estudio.
- Analizar los resultados obtenidos del estudio el par tribológico recubrimiento de cromo duro contra su contraparte.
- Emitir las conclusiones y recomendaciones de este trabajo.

1.3. JUSTIFICACIÓN

En la mayoría de las industrias, uno de los principales problemas que deben ser considerados son los relacionados con el reemplazo de componentes deteriorados en las máquinas producto del desgaste. En este sentido los recubrimientos están ideados para minimizar este problema, recuperando la funcionalidad de las piezas dañadas y extendiendo la vida útil de las mismas lo que influye directamente en los costos del proceso de producción y fomenta el incremento de productividad.

Uno de los aspectos importantes que motiva la presente investigación es el estudio del comportamiento al desgaste del cromo duro, ya que este tiene características tribológica y mecánicas sobresalientes.

El recubrimiento de Cromo Duro se realiza por vía electrolítica por lo que se reviste a las piezas con una película fina y dura de cromo. El tratamiento electrolítico de cromo se realiza a baja temperatura (no excede de los 60° C), proporcionando un espesor variable desde unas micras hasta 1mm de espesor y puede ser localizado en las zonas útiles de las piezas. El cromo duro se aplica a piezas tanto nuevas como usadas, de acero, aceros especiales, cobre y sus aleaciones, fundiciones finas, aluminio...etc.

Son pocos los trabajos de investigación que se relacionan con la evaluación de recubrimientos de cromo duro y como afectan las variables de los ensayos al comportamiento al desgaste de dicho recubrimiento. Adicionalmente cabe mencionar que dicho recubrimiento es posible hacerlo en el país sin tener que enviar las piezas al exterior para recubrirlas ahorrando mucho tiempo y recuperando pronto la productividad de los equipos cuyas piezas o componentes se tienen que recubrir.

1.4. ALCANCE

- Depositar el recubrimiento electrolítico de cromo duro utilizando los parámetros dados por la empresa TurboCromo, C.A.
- Seleccionar las variables que intervienen en el ensayo bloque sobre anillo y utilizar un diseño experimental factorial para dos variables y cuatro niveles (4^2).
- Seleccionar la contraparte que se utilizará para evaluar los recubrimientos en el ensayo de deslizamiento.
- Verificación del estado inicial, funcionamiento y modificaciones respecto a la norma ASTM G77-98 de la máquina de ensayo Falex Block On Ring.
- Calibración de la máquina de ensayos Falex según la norma ASTM D-2714.
- Calcular la resistencia al deslizamiento del recubrimiento por medio de las tasas de desgaste presentes.
- Calcular el coeficiente de roce, utilizando los valores de la fuerza de roce mediante el indicador de la máquina Falex entre los valores de la carga normal aplicada.
- Seleccionar las variables de ensayo que se utilizarán en el ensayo de abrasión siguiendo el diseño experimental factorial para dos variables y tres niveles (3^2).
- Evaluar la resistencia al desgaste por abrasión del recubrimiento a través del volumen desgastado.
- Calcular la dureza del recubrimiento a través del ensayo de dureza Vickers utilizando un microdurómetro.
- Determinar mediante microscopía electrónica de barrido los mecanismos de desgaste presentes en la superficie desgastada del par tribológico.

1.5. ANALISIS PRELIMINAR O ANTECEDENTES

Se han realizado numerosas investigaciones acerca de la resistencia al desgaste de las aleaciones con molibdeno, Da Silva, Domingo R; Hoyer R, Rafael E (2008) concluyeron en su trabajo “Resistencia al desgaste por deslizamiento utilizando el equipo falex block on ring bajo la norma ASTM G77-98R03” variando condiciones de velocidad y carga. Además realizó ensayo de dureza con un microdurómetro, microscopía óptica y electrónicas para determinar el comportamiento estructural y tribológico de las aleaciones molibdeno depositado por la técnica de rociado térmico con plasma y fueron comparados con las propiedades mecánicas de una fundición gris.

Caicedo, Holman F; Valdés O, Jairo A; Coronado M, John J (2005) en su trabajo “Caracterización de recubrimientos duros frente al desgaste abrasivo a tres cuerpos”. En este trabajo de investigación se estudiaron cinco recubrimientos duros ricos en cromo empleados en la industria azucarera. Se evaluaron ante el desgaste abrasivo a tres cuerpos usando la rueda de caucho con chorro de arena seca, de acuerdo con el procedimiento A de la norma ASTM G65. Las probetas con los recubrimientos se analizaron empleando un microscopio óptico y un durómetro Rockwell. Realizando evaluaciones en la máquina de rueda de caucho-arena seca, la microestructura que mejor resistencia al desgaste abrasivo presenta es aquella en la que se encuentran carburos primarios de cromo de gran tamaño (tipo M7C3) y carburos complejos de Nb, Mo, W y V embebidos en una matriz eutéctica. Los carburos globulares finamente dispersos que se forman a partir de los elementos adicionales de aleación no brindan una protección al desgaste tan efectiva como los carburos primarios de cromo de mayor tamaño, que se oponen al mecanismo de micro-corte. Por tanto, en aplicaciones de desgaste abrasivo es más importante asegurar una baja dilución del metal base para obtener una solidificación hipereutéctica, que incluyen elementos adicionales formadores de carburos. Depositando dos

capas ricas en W sobre un sustrato de acero estructural ASTM A36 no se encontró una relación entre dureza y resistencia al desgaste abrasivo; no obstante, sí una relación proporcional entre carbono equivalente y resistencia al desgaste abrasivo. Existe un efecto o influencia de los tratamientos sobre la variable respuesta; por tanto, la correcta elección del recubrimiento y su procedimiento de aplicación son de gran importancia para obtener la mejor resistencia al desgaste abrasivo.

Navas G, María C; (2007) en su tesis doctoral “Recubrimientos de NiCrBSi resistentes a la corrosión y al desgaste” donde se emplearon dos tipos de aleaciones NiCrBSi, cuya denominación comercial más conocida Colmonoy 6, y de forma estándar son designadas como aleaciones RNiCr-C. Los recubrimientos NiCrBSi se depositaron sobre probetas planas de diferente composición y tamaño. Se emplearon sustratos de acero al carbono y acero inoxidable, cuya denominación americana es AISI 1015 y AISI 304, respectivamente. Se han depositado recubrimientos de una aleación de NiCrBSi mediante diferentes técnicas: recubrimientos mediante flame-spray (FS), flame spray con fusión a la llama (FSF), flame spray con fusión laser (FSL) y recubrimientos depositados mediante plaquero laser (LS). En todos los casos, la optimización de todos los parámetros de deposición ha permitido obtener capas con propiedades similares independientemente de sustrato sobre el cual se aplican. No obstante, la caracterización de las capas es distinta en función del proceso de deposición empleado. Esto se debe a la diferente microestructura obtenida en cada uno de los casos. Del estudio del comportamiento frente al desgaste de los recubrimientos se deduce que los aspectos micro estructurales ejercen una influencia distinta dependiendo de las condiciones tribológicas existentes. Bajo condiciones de desgaste por deslizamiento en seco, las diferencias micro estructurales entre las capas no son relevantes. Los recubrimientos FSF y LC presentan tasas y mecanismos de desgaste semejantes, lo que es

coherente con su similar dureza, siendo la resistencia del recubrimiento FSL la más baja, debido a la menor dureza de su matriz. Por otra parte, bajo condiciones de desgaste abrasivo, las características micro estructurales de las capas son más o menos influyentes en función de la morfología de las partículas abrasivas, la cual afecta de manera importante la tasa de desgaste como al mecanismo de desgaste de los recubrimientos.

Por otra parte en la Escuela de Ingeniería Mecánica de la UCV se han hecho estudios sobre desgaste en aceros y otros tipos de metales.

Oscar R, Liccionis F; Alfredo A, Cubillán T (2002) en su tesis “Estudio de la resistencia al desgaste del acero AISI 4340 bajo condiciones de deslizamiento sin lubricación” en dicho trabajo se estudiaron los efectos de la carga normal y la velocidad de deslizamiento, sobre el desgaste deslizante del par tribológico AISI 4340 y AISI D-2, empleando un tribómetro en la configuración geométrica bloque sobre anillo (“Block on Ring”), según norma ASTM D2714-88. Todos los ensayos se realizaron al aire y en ausencia de lubricantes. Las cargas normales aplicadas fueron de 44.5, 89, 133.5 y 178 N, las velocidades de deslizamiento de 0.1, 0.2, 0.4 y 0.6 m/s y la distancia deslizada fija de 55.977 m. Se determinó que la tasa de desgaste en los bloques aumento por efecto del aumento de la carga de forma lineal en algunos de los ensayos y que disminuyo por efecto del aumento de la velocidad en forma exponencial en todos los ensayos. Se encontró que para los anillos la tasa de desgaste disminuyó con un fuerte efecto al aumentar la velocidad de deslizamiento, a partir de cargas normales aplicadas superiores a 89 N y velocidades superiores a 0.2 m/s y que aumento al aumentar la carga normal aplicada, para todas las categorías de velocidad de deslizamiento constante. El aumento tanto de la carga, como el aumento de la velocidad, tuvo como efecto el aumento de la temperatura. Se encontró que el coeficiente de fricción disminuye con el aumento de la velocidad de deslizamiento, para todas las categorías de carga normal aplicada. La

disminución en los valores en el coeficiente de fricción promedio va desde 0.8235 para una carga aplicada de 89 N y velocidad de deslizamiento igual a 0.1 m/s, hasta 0.5182 para una carga aplicada de 89 N y velocidad de deslizamiento igual a 0.6 m/s. El coeficiente de fricción se mantuvo estable, es decir, invariable para cada una de las categorías de velocidad constante al aumentar la carga, con excepción de la categoría de 0.6 m/s de velocidad, en el rango de carga aplicada que va desde los valores de 44.5 N a 89 N en donde se aprecia una disminución promedio más pronunciada. La técnica de microscopía electrónica se utilizó para determinar los mecanismos de desgaste, permitiendo encontrar la presencia de un acentuado proceso de adhesión en los anillos para baja velocidad y un proceso mixto de adhesión y delaminación a alta velocidad, ya que se detecta la presencia de “capas” de material. Se encontró pequeñas zonas indicativas de un desgaste adhesivo ligero en los bloques y zonas claramente definidas con la presencia de adhesión a medida que aumenta la carga aplicada. Además se detectó en los bloques la presencia de capas de material que son más pronunciadas según la mayor o menor carga aplicada, lo que denota a su vez la existencia de un mecanismo de delaminación y la presencia de algunas zonas donde se observan grietas, las cuales indican la existencia de un mecanismo de desgaste por deterioro cíclico o fatiga. Los valores de las tasas de desgaste encontradas en el presente trabajo corresponden a un régimen de desgaste severo (mayores que $2.36E-02 \text{ mm}^3/\text{m}$) por lo que no se encontraron transiciones en el régimen de desgaste.

Cadenas H, Pedro V. (2005) en su trabajo de ascenso “ Evaluación del desgaste por deslizamiento sin lubricación de un recubrimiento base níquel termo-rociado por HVOF con y sin tratamiento térmico posterior por llama oxiacetilénica “En este trabajo se estudiaron los efectos de la carga normal y la velocidad de deslizamiento, sobre el desgaste por deslizamiento, de un recubrimiento base níquel conocido comercialmente como Colmonoy 88

depositado por la técnica de alta velocidad oxígeno combustible (HVOF) con y sin tratamiento térmico posterior por llama oxiacetilénica, utilizando como contraparte al acero AISI D-2. Para esto se utilizó un tribómetro con la configuración geométrica bloque sobre anillo (“block on Ring”), según la norma ASTM D2714-88. Todos los ensayos se realizaron al aire y en ausencia de lubricantes. Las cargas normales aplicadas fueron 0,1, 0,2, 0,4 y 0,5 m/s, para una distancia de deslizamiento constante de 550m. A partir de los resultados obtenidos se pudo determinar que el tratamiento térmico por llama oxiacetilénica distribuye mejor las fases endurecedoras de la microestructura, aumenta la densidad, la cohesión y la micro dureza del recubrimiento, y por eso, el recubrimiento con tratamiento térmico tiene mayor resistencia al desgaste que el recubrimiento sin tratamiento térmico, para todos los niveles de carga normal y velocidad de deslizamiento. Además, se determinó que la tasa de desgaste del recubrimiento sin tratamiento térmico y con tratamiento térmico aumenta con la carga normal. También, se determinó que la tasa de desgaste para el recubrimiento con tratamiento térmico disminuye con la velocidad de deslizamiento, debido al ablandamiento térmico del material por el calor generado en la fricción, mientras que esta disminución se presentaba para el recubrimiento sin tratamiento térmico solo a los mayores niveles de carga y velocidad de deslizamiento.

Igualmente para los anillos utilizados como contraparte en los ensayos, se determinó que la tasa de desgaste aumenta con la carga normal y tiende a disminuir para los mayores niveles de velocidad de deslizamiento debido al ablandamiento térmico producto del calor generado por la fricción. La técnica de microscopía electrónica se utilizó para determinar los mecanismos de desgaste, encontrándose un mecanismo mixto: adhesivo, oxidativo, abrasivo y de deterioro cíclico compitiendo entre ellos simultáneamente. El régimen de desgaste presente en todos los ensayos fue severo, ya que las tasas de

desgaste son superiores a $1E-05\text{mm}^3/\text{m}$. El recubrimiento con tratamiento térmico es mucho más resistente al desgaste que el acero AISI 4340, el cual se usa en la fabricación de piezas sometidas a desgaste, por esto se recomienda utilizar ampliamente a este recubrimiento en la recuperación de piezas desgastadas.

Maryangel Guzman M, (2011) en su trabajo especial de grado “Influencia de los parámetros de rociado sobre las propiedades de recubrimientos depositados por rociado térmico (HVOF) utilizando polvos WC-12%Co nanoestructurado” En este trabajo se determinó los parámetros de deposición óptimos (tasa de alimentación de los polvos y la relación de oxígeno combustible, modificando el nivel de kerosene) de polvos nanoestructurados de WC-12%Co vía proyección térmica HVOF sobre un acero 1020. Se seleccionó un diseño factorial 3^2 en el cual se variaron los dos parámetros anteriormente mencionados a tres niveles. La respuesta a la variación de los parámetros seleccionados fue evaluada mediante ensayos de desgastes de abrasión según la norma ASTM G-65 y la dureza estática promedio obtenida por técnicas de microindentación según la norma ASTM E-384. Se condujo un análisis de varianza para evaluar la significancia de los parámetros del proceso. La microestructura y las superficies de desgaste fueron estudiadas mediante Microscopía Óptica (MO), Microscopía Electrónica de Barrido (MEB). A través de los resultados obtenidos en el presente trabajo se pudo determinar que el flujo de combustible y la tasa de alimentación de los polvos son parámetros significativos en la resistencia al desgaste abrasivo de los depósitos estudiados, en líneas generales a medida que disminuye el flujo de combustible aumenta la tasa de desgaste lo cual es atribuido a que disminuye la temperatura del proceso y por lo tanto se obtiene menor cohesión entre las partículas y aumenta la porosidad, por otro lado también se pudo determinar que a medida que se aumenta la tasa de alimentación de los polvos disminuye la tasa de desgaste debido a las partículas alcanzan menores temperaturas evitando la degradación de las

mismas. Para la dureza de la sección transversal el parámetro significativo es el flujo de combustible debido a que mientras menor sea el flujo de combustible hay mayor degradación de carburos producto del oxígeno sobrante en la mezcla y si se tiene un mayor flujo de combustible se obtiene mayor decarburización debido a las altas temperaturas. Adicionalmente no se encontró correlación entre la dureza en la sección transversal y la respuesta ante el desgaste abrasivo en los recubrimientos evaluados. A la luz de los resultados obtenidos a través de esta investigación podemos decir que elevados valores de dureza y alta resistencia al desgaste abrasivo pueden obtenerse en recubrimientos WC-12%Co nanoestructurados depositados por el proceso de HVOF.

Vargas, Jesús (2012) en su trabajo especial de grado “Estudio comparativo de la resistencia al desgaste, propiedades mecánicas de recubrimientos CoCrMo depositados por plasma de arco transferido y recubrimientos de cromo duro”. El objetivo de dicho trabajo fue evaluar la resistencia al desgaste por deslizamiento y abrasión de recubrimiento de Cromo Duro depositado por vía electrolítica y comparación con recubrimiento de CoCrMo depositado por plasma de arco transferido, este último a ser utilizado como una alternativa para recuperar las carcasas de las bombas hidráulicas de desplazamiento positivo utilizadas en la industria petrolera. La determinación del desgaste por deslizamiento se realizó en concordancia con la norma ASTM G77 con una configuración geométrica bloque sobre anillo. Los pares tribológicos a ser ensayados fueron bloques de acero 1020 recubiertos con la aleación CoCrMo y Cromo Duro siendo su contraparte Stellite 6. Para determinar las condiciones de carga y velocidad a utilizar en el ensayo de desgaste por deslizamiento, previamente se utilizó un diseño experimental factorial 3^2 . De igual manera se realizaron ensayos de abrasión para cada material de estudio según la norma ASTM G65, evaluándose un total de 10 probetas para cada recubrimiento en intervalos de 5, 10 y 15 min.

La dureza y tenacidad de los bloques ensayados también fue determinada. Las superficies de desgaste para ambos recubrimientos fueron caracterizadas mediante microscopía electrónica de barrido. Mediante el ensayo de deslizamiento se determinó que el recubrimiento Cromo Duro tiene una resistencia al desgaste mayor que la del Stellite 21 ya que en la evaluación de las condiciones favorables el stellite 21 se desgasta hasta 17 veces más que el cromo duro, mientras que en la condición desfavorable el stellite se desgasta hasta 1,7 veces más que el Cromo duro, de igual manera mediante el ANONA se observó que la carga tiene una influencia mayor sobre el desgaste en el Stellite 21 ya que el valor estadístico que establece esta relación es menor en el Stellite 21 $P=0$ y para el Cromo duro es $P=0,02$

CAPITULO II
MARCO TEORICO

2.1. RECUBRIMIENTO DE CROMO DURO

El recubrimiento de cromo duro es producido por electrodeposición a partir de una solución que contiene de una solución de ácido crómico (Cr_2O_3) y un anión catalítico en proporciones adecuadas. El proceso es utilizado en aplicaciones donde se requiere una excelente resistencia al desgaste, en las reconstrucciones de piezas que han sido mal maquinadas, o desgastadas.

Al cromo duro también se le conoce como recubrimiento de cromo industrial, ingenieril o funcional y se diferencia de los recubrimientos de cromo decorativo en los siguientes aspectos:

- El recubrimiento de cromo duro está destinado a incrementar la vida útil de una parte funcional, al proveer una superficie con un bajo coeficiente de fricción que resiste la abrasión, el desgaste y la corrosión. El cromo decorativo, por otra parte, solo tiene aplicación estética en partes exteriores o visibles. Otro de los propósitos del recubrimiento de cromo duro es restaurar las dimensiones de piezas desgastadas o con dimensiones no adecuadas.
- El cromo duro es normalmente depositado a espesores en el orden de 1.2 y 500 μm y para ciertas aplicaciones, hasta espesores considerablemente mayores. El cromo duro decorativo pocas veces excede 1.3 μm de espesor.
- Con ciertas excepciones, el cromo duro es depositado directamente sobre el metal base: mientras que el cromo decorativo es aplicado sobre una capa de níquel o de cobre-níquel.

2.1.1. PRINCIPALES USOS DEL CROMO DURO .

2.1.1.1. Resistencia al desgaste y a la corrosión

Existe una amplia información sobre la efectividad del cromo duro en la reducción del desgaste de piezas en diversas aplicaciones. En la industria automotriz, el cromo duro es también aplicado a diversos vástagos para incrementar su resistencia al desgaste y a la corrosión. Los vástagos de válvulas se recubren con depósitos de 2.5µm para reducir el desgaste. También se utiliza el cromo duro en columnas hidráulicas para todo tipo de equipos con recubrimientos de 20 a 30 µm de espesor

2.1.1.2. Aplicaciones en herramientas

El cromo duro es utilizado en varias herramientas para minimizar el desgaste, reducir la fricción y/o prevenir o minimizar la corrosión. Los materiales para matrices en el moldeo de plásticos son usualmente recubiertos con cromo duro para prevenir la corrosión, generalmente moldes de acero y de cobre-berilio, especialmente cuando se moldean plásticos corrosivos como el vinil.

Los espesores de recubrimiento varían entre 2.5 y 125 µm para prevenir el desgaste en partes pegajosas en moldes para plásticos. El recubrimiento de cromo duro no se debe usar cuando se moldean plásticos que contienen cloruros retardantes del fuego. Herramientas de corte profundo frecuentemente son recubiertas con cromo duro, con espesores hasta de 100 µm para el mejoramiento del desempeño de la herramienta o para reconstruir partes desgastadas. El cromo duro también reduce la fuerza de fricción en punzonadores de equipos de embutición, facilitando la remoción de la pieza de trabajo. Los moldes de acero utilizados para estampar barras y tubos son frecuentemente

recubiertos con cromo duro con unos espesores relativamente altos, hasta de 250 μ m, para minimizar el desgaste y reducir la fricción.

El recubrimiento de cromo duro no es recomendable para herramientas de extrusión en frío para aplicaciones severas donde se producen presiones extremas, porque el recubrimiento se puede agrietar o descascarar y puede ser incompatible con lubricantes de fosfato.

2.1.1.3. Reconstrucción de piezas

Los recubrimientos de cromo son muy utilizados para la reconstrucción de piezas mal maquinadas o desgastadas. Un ejemplo de ello es la restauración de cigüeñales de motores de combustión. En esta aplicación, los espesores varían entre 125 y 1250 μ m, otorgando excelente resistencia al desgaste debido a su bajo coeficiente de fricción. Sin embargo, desde 1970, este proceso de reconstrucción utilizando cromo duro ha sido sustituido por el proceso de termo rociado, el cual, es de aplicación más fácil y rápida.

2.1.2. SELECCIÓN DE FACTORES PARA EL USO DEL CROMO DURO

La decisión del uso del cromo duro como recubrimiento sobre una pieza debería de tomar en cuenta los siguientes factores:

- La dureza inherente y resistencia al desgaste del cromo depositado.
- La forma, tamaño y construcción de la pieza o parte de la pieza a ser recubierta.
- El espesor del depósito requerido.
- Requerimientos superficiales
- Requerimientos dimensionales.

TABLA 2.1. Aplicaciones Típicas del Cromo Duro ^[1].

<i>Pieza</i>	<i>Metal Base</i>	<i>Espesor (μm)</i>	<i>Tiempo de recubrimiento aprox.</i>
Metal de impresión	Acero al carbono	25	60 min
Sellos	Aceros y cobre	75-180	10 h
Partes de motor de avión	Aleaciones base níquel, aceros alta resistencia	75-180	10 h
Moldes para plásticos	Aceros para herramientas	5-13	30 min
Guías textiles	Acero	5-100	20-240 min
Aros de pistones	Aceros o fundición	150-255	8h
Bolas para válvulas	Latón o acero	7,5-13	20 min
Micrómetros	Acero	7,5-13	20 min
Moldes de bolas de golf	Latón o acero	7,5- 25	20-60 min
Herramientas de corte	Acero para herramientas	1,3	5min
Matrices de conformado y estampado	Acero	25	60 min
Engranajes	Acero	125	150 min
Cañones de pistolas	Acero	25	40 min
Cilindros hidráulicos	Acero 1045	13	30 min
Pines de desgaste	Acero	13	40 min
Rodillos	Acero	13-255	20-300 min

2.1.2.1. Dureza

La dureza del cromo duro electro depositado es una función de la composición química utilizada en la solución de recubrimiento y de las condiciones de deposición. En, general, el recubrimiento de cromo brillante es el que presenta mayor dureza, éstos depósitos a partir de soluciones convencionales tienen valores de dureza de 850 a 950 HV, aquellos obtenidos a partir de soluciones de mezclas catalíticas tienen valores de dureza entre 900 y 1000 HV; aquellos obtenidos a partir de soluciones libres de fluoruros tienen valores de dureza entre 950 y 1100 HV o más.

2.1.2.2. Tamaño

Las piezas grandes pueden ser recubiertas en secciones o pueden ser rotadas, de tal manera que solo la parte a ser recubierta esté en contacto con la solución a un tiempo determinado. Se pueden recubrir grandes piezas entre 4 a 18 m, como también piezas pequeñas.

2.1.2.3. Metal base

La mayoría de los depósitos de cromo duro son aplicados sobre metales y aleaciones ferrosas. Sin embargo, numerosas aplicaciones en el área aeroespacial requieren los depósitos realizados sobre aluminio y aleaciones de base níquel.

Desde el punto de vista del proceso, el recubrimiento de cromo duro puede ser aplicado a los aceros independientemente de su dureza y su composición química, con tal que el metal base sea suficientemente fuerte para soportar la capa de cromo en servicio.

2.1.3. CARACTERÍSTICAS Y CONSIDERACIONES DEL CROMO DURO

2.1.3.1. Relación entre micro grietas, esfuerzos residuales y dureza

La mayoría de los depósitos de cromo electrolítico, como el cromo duro, presentan micro grietas. Estas micro grietas son relativamente muy delgadas, alrededor de 0,1 μm de ancho y de muy poca penetración en el recubrimiento, menor de 8 μm . Estas grietas no están vacías, sino llenas de cromo u óxido de cromo. Las micro grietas forman redes grietas o patrones visibles a varias magnificaciones de aumento. Estas micro grietas se forman durante la deposición cuando los esfuerzos internos de tracción, propios del proceso de electrodeposición del cromo, exceden la fuerza de cohesión de este. Por lo tanto, la formación de micro grietas es un mecanismo de liberación de tensiones internas durante la deposición del recubrimiento.

Las micro grietas disminuyen los esfuerzos residuales de tracción en la medida en que aumenta el espesor del depósito. Por tanto, los esfuerzos residuales de tracción son inversamente proporcionales al número de grietas

La densidad de micro grietas en los depósitos de cromo varían entre 0 y 1200 grietas/cm (densidad lineal), dependiendo de la composición química del baño, de la densidad de corriente y de la temperatura. El número de grietas se incrementa con la concentración del catalizador en el baño.

Los recubrimientos delgados pueden no formar micro grietas. Los depósitos con poca cantidad de grietas tienen micro grietas más profundas que aquellos con alta densidad de grietas. En la medida en que se va incrementando el espesor del depósito, los esfuerzos internos de tracción también incrementan, hasta que se forma la micro grieta, con lo que se libera gran parte de la tensión interna del depósito. A

espesores alrededor de 125 μm los esfuerzos internos alcanzan valores constantes.

Los depósitos con espesores de alrededor de 10 μ que se forman en procesos libres de grietas, tienden a formar macro grietas que se extienden través de todo el espesor desde el sustrato hasta el recubrimiento. Los depósitos libres de grietas no son tan duros como aquellos que presentan micro grietas. Se han encontrado que los depósitos de cromo libres de grietas presentan durezas entre 300 y 600 HK_{100} , mientras que los depósitos con micro grietas presentan durezas entre 850 y 1050 HK_{100} . Estos valores de dureza están relacionados en forma directamente proporcional con la resistencia al desgaste, en donde, los depósitos libres de grietas presentan una muy pobre resistencia al desgaste comparada con los depósitos de cromo con grietas.

Las grietas del recubrimiento influyen los valores de dureza, dependiendo del tipo de indentador utilizado y de la carga aplicada. En general, las cargas ligeras son más sensibles a las variaciones de dureza y esto resulta en valores más altos. Las grietas influyen más los valores obtenidos con cargas elevadas que los valores obtenidos con cargas ligeras. También, debido a que el indentador piramidal de diamante 136 $^{\circ}$ Vickers cubre menos área, los valores dureza determinados con este indentador están menos influenciados por las grietas que los valores obtenidos con el indentador Knoop

TABLA 2.2. Valores de dureza del Cromo Duro con distintos indentadores

Carga (g)	Indentador Vickers	Indentador Knoop
100	950-1100(1040 prom.)	940-1090(1025 prom.)
500	780-905 (850 prom.)	685-890 (830 prom.)

2.1.3.2. Efecto de la temperatura

El efecto de la temperatura sobre la dureza del cromo es un factor significativo en aplicaciones donde está involucrada la resistencia al desgaste. La dureza del recubrimiento empieza a decrecer cuando el mismo es expuesto a temperaturas por encima de los 205°C. La dureza decrece progresivamente con el incremento de la temperatura. Debido a que la dureza del cromo duro decrece, su resistencia al desgaste puede verse afectada en forma muy adversa. En general, los recubrimientos de cromo duro no deben ser utilizados en aplicaciones de resistencia al desgaste cuando la temperatura de servicio excede los 400°C.

2.1.3.3. Costos

Los depósitos de cromo duro son recubrimientos que tienen una relación costo-ganancia muy favorable para quienes lo producen, dando ganancias seguras y con una calidad reproducible como aquellos recubrimientos con una tecnología alternativa. Los factores más importantes en costo son el capital y los gastos operativos, seguido por la electricidad y los químicos, los cuales son relativamente económicos. Los costos químicos van en aumento a partir de la solución convencional, seguido de los catalizadores mezclados y luego las soluciones libres de fluoruro. Sin embargo, estos costos se ahorran en los costos eléctricos y en la calidad de los depósitos.

Los costos del recubrimiento se incrementan con la complejidad de la pieza a recubrir. Las partes que contienen entallas, cambios de sección y áreas a no ser recubiertas necesitan un manejo especial o requieren más trabajo desde el punto de vista operativo, desde la preparación hasta el acabado, ya que muchas de las operaciones en el recubrimiento se hacen manualmente.

También los ánodos deben ser conformados precisamente a la forma de las piezas a recubrir, para asegurar el control del espesor del recubrimiento. Por tanto, la forma de la pieza a recubrir así como la naturaleza, el espesor, las técnicas especiales de acabado como el granallado y el tratamiento térmico previo que requieran la pieza antes de ser recubiertas, son factores que incrementan los costos. Los recubrimientos de alta calidad en cuanto a la dureza, acabado y apariencia brillante son muy costosos ya que requieren de estrictos controles en su producción.

2.2. DESGASTE

2.2.1. Concepto Básico de la Adhesión (Cadenas H, Pedro, 2005)

El desgaste adhesivo, también conocido como desgaste de fricción ó desgaste deslizante, es una forma de deterioro que se presenta entre dos superficies en contacto deslizante.

Según la teoría adhesiva del desgaste deslizante, bajo la acción de las cargas normales aplicadas, los toques de las asperezas de las dos superficies sufren fluencia plástica y soldadura en frío. Al producirse el movimiento, las uniones soldadas se rompen por cizalladura, tomando lugar la separación en el cuerpo de menor dureza. De esta manera, la superficie más dura se cubre de una película transferida del material de la contracara, a la vez que se desprenden partículas en el proceso. Se cree que otros mecanismos, como abrasión y fatiga superficial son responsables por el desprendimiento de partículas de la película transferida.

Los términos de adhesión y cohesión se refieren a la habilidad de las estructuras atómicas de adherirse entre ellas y formar lazos superficiales, los cuales están íntimamente en contacto. La teoría de la adhesión (Bowden y Tabor, 1950, 1964 y 1973), en esencia, dice que el área real de contacto entre dos cuerpos es muy pequeña, y está formada por los puntos de las asperezas más altas que se encuentran en contacto. Es decir, las superficies, aun teniendo el mejor acabado superficial posible y siendo a escala microscópica en apariencia lisas, en realidad presentan una microtopografía irregular de asperezas en forma de crestas y valles (Tabor, 1973).

Debido a esto, cuando las dos superficies hacen contacto mutuamente, bajo la acción de una carga, el contacto solo se produce en las crestas de las asperezas y como consecuencia, el área real que soporta la carga es mucho más pequeña que el área aparente de contacto. Consecuentemente, el área real de contacto es independiente del área aparente de las superficies, pero es determinada por la carga aplicada (Archard, 1953). La presión en esos puntos de verdadero contacto es por lo tanto más alta que el valor correspondiente al valor nominal. Esto implica que los átomos más externos de una superficie se podrán acercar a aquellos de la contracara y eso es especialmente verdadero si las superficies son relativamente limpias y no contaminadas por extrañas capas superficiales. Sin embargo, en el caso que existan contaminantes superficiales tales como óxidos, la adhesión se vería disminuida, pero existiría de igual manera, a causa de las altas presiones que se generan debido al área tan pequeña que soporta la carga. Si deseamos separar suficiente superficie, la fuerza debe ser aplicada para sacar o deslizar esas partes. Esto se aplica según la naturaleza de los materiales aunque es particularmente significativo en el caso de metales dúctiles.

La carga normal aplicada F_n , está relacionada con el área real de contacto A_r por una propiedad del material la cual representa el punto de presión de la

superficie más blanda, esto será numéricamente muy cercano en valor a la dureza de indentación H , es decir: $F_n = A_r * H$

La fuerza de fricción total F_r , es el producto del área real de contacto A_r y el esfuerzo o tensión de corte específico T , que puede mostrar alguna unión.

Apartando los efectos de trabajo o esfuerzo por endurecimiento es imposible para una unión, exhibir un esfuerzo de corte más grande que el volumen del material más débil. Esto se puede expresar como:

$$F_r = A_r * T \quad \text{ec- 2.1}$$

Por lo que;

$$f = F_r / F_n = T / H \quad \text{ec. 2.2.}$$

Esta ecuación está de acuerdo con las leyes de fricción de Guillaume Admonton, ingeniero francés, quien en el año 1699 fue el primero en establecer mediante apreciaciones cuantitativas dichas leyes (Archard, 1953). En la ecuación, f es una constante independiente de la carga y además del argumento físico que conlleva esto, provee una explicación de por qué la fuerza friccional es independiente del área nominal, o área aparente de contacto entre los dos sólidos.

Además de esto, el coeficiente de fricción se encuentra asociado con la relación de dos propiedades al esfuerzo, del sólido más débil T el esfuerzo o tensión de corte específico y H su dureza de indentación o de fluencia. Si bien los valores absolutos de esas cantidades pueden variar de un material a otro, mediante la ecuación 2.2 vemos que la ecuación 2.1 satisface las dos leyes de Admonton, porque el área de contacto y la carga son eliminadas.

Para muchos esa relación es más o menos constante y generalmente se puede esperar para un material tipo, un valor en el coeficiente de fricción f entre 0,17 y 0,2 debido a que H vale aproximadamente 3σ (esfuerzo de fluencia) y T aproximadamente $0,5$ a $0,6\sigma$.

La teoría de la adhesión involucra la siguiente secuencia de eventos (Samuels, L.E.; Doyle, E.D.; y Turley, D.M. 1980):

a.- Aplastamiento de asperezas por deformación y desarrollo de una interface entre las dos superficies. Esta interface se halla sometida a un gran esfuerzo de corte.

b.- Fractura de uno de los materiales en una posición cercana a la interface, removiendo un fragmento de uno de los materiales y transfiriéndolo al otro.

c.- Desprendimiento del fragmento transferido

Esta teoría requiere de un enlace adhesivo muy fuerte. El contacto entre sólidos en aire es realizado por dos superficies que poseen capas de óxidos en ambas superficies, como consecuencia una adhesión verdadera no se llega a realizar.

Kayaba citado por Samuels, L.E.; Doyle, E.D.; y Turley, D.M. (1980), ha propuesto un mecanismo basado sobre observaciones del comportamiento de modelos de asperezas que envuelve el separamiento de una por la otra. Sólo interacciones mecánicas necesitan ser asumidas en este modelo, pero este mecanismo no predice la forma primaria de las partículas provenientes del desgaste. Él sugiere que una zona plástica se desarrolla primero por la interacción entre las dos asperezas, y que el desplazamiento por cizalladura ocurre a lo largo de ésta, formando una lengüeta. La zona plástica es así transferida a una capa más baja, y el proceso se repite generando un número de capas de lengüetas. Cuando la hendidura crece, ésta se corta, dando lugar a una partícula producto del desgaste.

2.3. GRÁFICAS TRIBOLÓGICAS

Los resultados obtenidos mediante ensayos tribológicos nos conducen a la obtención de ciertos datos muy representativos de la fricción y el desgaste, estos resultados revelan mayor importancia cuando son expresados en forma gráfica, diagramas de transición, mapas, etc. Según Cubillán y Liccioni (2002), dichos gráficos nos permiten obtener información concisa

del fenómeno de la fricción y el desgaste en función de ciertos parámetros como:

Parámetros operacionales, como la carga normal aplicada (F_n), velocidad (V), temperatura (T) o duración de la prueba o ensayo (t).

Parámetros de interacción, por ejemplo, esfuerzos de contacto, relación de espesor de película a rugosidad o forma de lubricación.

Parámetros estructurales, por ejemplo, el par tribológico, dureza, rugosidad, o microestructura de los materiales.

La caracterización de las condiciones críticas de los parámetros operacionales que separan los regímenes del comportamiento eficiente e ineficiente de un tribosistema determinado, se realiza por medio de los diagramas de transición. Sin embargo, existen otras formas de representar dichos datos, mediante el empleo de mapas, los cuales caracterizan las condiciones operacionales, que separan diferentes regímenes de los mecanismos de desgaste presente o diferentes arreglos de datos obtenidos mediante los ensayos tribológicos.

Se presenta en forma detallada los gráficos más relevantes que involucran el estudio de la fricción, y el desgaste en función de los parámetros estructurales, operacionales y se hace énfasis sobre la dependencia del tiempo.

2.3.1 Curva Maestra Fricción Vs tiempo

La curva representativa del comportamiento de la fricción en función del tiempo, está caracterizada por la presencia de cuatro estados de gran importancia, en los cuales se describe dicho comportamiento y su evolución en términos en términos del tiempo.

Un ejemplo típico para un sistema metal sobre metal se muestra en la figura 2 según Kennard, R.W (1978),

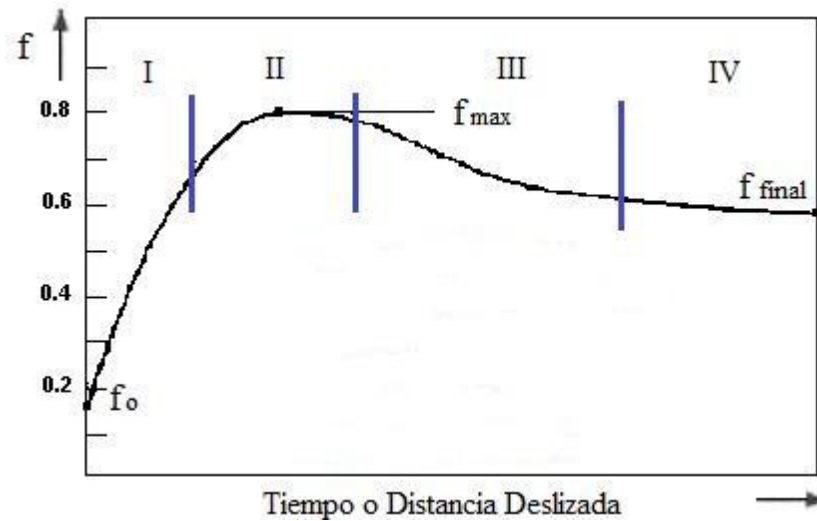


FIGURA 2.1 Curva maestra coeficiente de fricción-tiempo

El valor inicial del coeficiente de fricción del Estado I, el cual es usualmente cercano a $f_0 \cong 0,1$ es dependiente de cargas bajas F_n y de la resistencia al corte, no obstante es completamente independiente de las combinaciones de los materiales.

La superficie con material removido y un incremento en la adhesión debido al incremento de áreas interfaciales limpias así como también el incremento de las interacciones de las asperezas y posibles partículas de desgaste atrapadas, permiten que se incremente el coeficiente de fricción.

En el estado II, se produce el máximo valor del coeficiente de fricción ($f_{max} \cong 0,3$ a 1.0 mayormente entre metales). El cual se alcanza cuando ocurre la máxima adhesión interfacial, deformación de las asperezas y partículas de desgaste atrapadas.

En el estado III, decrece el coeficiente de fricción debido posiblemente a la formación de una capa superficial triboquímica protectora y un decrecimiento en el proceso de surcos y asperezas deformadas.

En el estado IV, está caracterizado por condiciones tribológicas interfaciales en estado estable. El coeficiente de fricción, eventualmente permanece más o menos constante.

El comportamiento a la fricción debería estar caracterizado por los siguientes datos adicionales; coeficiente de fricción inicial f_0 , Coeficiente de fricción máximo f_{\max} y coeficiente de fricción final de la prueba f_{final} .

2.3.2. Curva Maestra Desgaste Vs tiempo

Esta curva está caracterizada por tres estados de desgaste representados en la Fig.4, los cuales se describen a continuación:

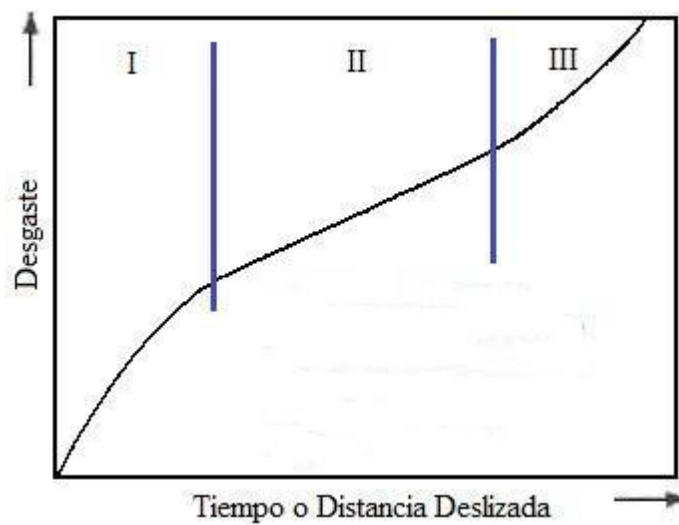


FIGURA 2.2 Curva maestra Desgaste-tiempo

Estado I: Está precedido por un periodo de incubación de no desgaste denominado periodo de rodaje inicial, en donde probabilidad de ocurrencia de los tipos de desgaste elementales decrecerá si al mismo tiempo la tasa de interacción de las asperezas con la superficie de desgaste decrece a través de los cambios de la topografía superficial.

En el caso más sencillo de esa auto-acomodación del tribosistema, la cantidad de volumen de desgaste viene expresado por una función raíz cuadrada del tiempo como se muestra a continuación:

$$\frac{dW}{dt} \cong \frac{1}{W} \rightarrow W(t) = constante * t^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ec.2.3}$$

Estado II: En este estado, el tribosistema describe un comportamiento relativamente lineal en función del tiempo pero estable bajo la acción del proceso tribológico. Sin embargo, en aplicaciones ingenieriles, el valor de la tasa de desgaste específica tolerable debería estar en el rango de T.D.E < 1E-06 mm³ / N * m.

En este estado, la cantidad de volumen de desgaste viene expresada por medio de la siguiente ecuación:

$$\frac{dW}{dt} \cong W \rightarrow W(t) = constante * 1 \quad \text{Ec.2.4}$$

Estado III: Se produce un incremento sustancial del desgaste debido a un proceso de acumulación de diversos tipos de desgaste, donde se hace evidente que un gran incremento del desgaste en un periodo de tiempo conlleva a un gran incremento del mismo en el periodo de tiempo sucesivo. Por ello, la ocurrencia de una auto-aceleración del proceso de desgaste conlleva a un daño catastrófico, falla y en consecuencia el sistema colapsa. En este estado, el volumen de desgaste viene expresado por medio de la siguiente ecuación:

$$\frac{dW}{dt} \cong W \rightarrow W(t) \cong e^{\text{constante} * t} \quad \text{Ec.2.5}$$

2.4. MECANISMOS DE DESGASTE

Se distinguen varios tipos de desgaste en los cuales, (Eyre, T.S.1978) hace una discriminación según la importancia relativa que tienen en la industria, en los siguientes términos (ver tabla 2.5):

TABLA 2.3. Clasificación del desgaste de acuerdo a su importancia para la industria. (Eyre, 1978)

TIPO DE DESGASTE	IMPORTANCIA EN LA INDUSTRIA
ABRASIÓN	50%
ADHESIÓN	15%
EROSIÓN	8%
MICROOSCILATORIO (FRETTING)	8%
QUÍMICO (CORROSIÓN)	5%

Además de estos, existen procesos en los cuales uno de estos tipos de desgaste se transforma en otro ó en los que dos o más de ellos actúan de forma combinada en sistemas tribológicos, así como también diferentes tribomateriales y morfologías resultantes de la exposición de la superficie. Entre los tipos de desgaste básicos, se incluyen: adhesivo, abrasivo, erosivo, por fatiga y por corrosión.

2.4.1. Desgaste Adhesivo

Se produce desgaste adhesivo de dos cuerpos que se hallan en movimiento relativo entre las estructuras atómicas, debido al contacto íntimo al que llegan las dos piezas por las altas presiones específicas en la zona de contacto real, dependiendo a su vez de la estructura de ambos materiales.

En función a que dos superficies de un mismo material, con un alto grado de acabado superficial, es decir, con menores rugosidades, se adhieren

perfectamente con solo ponerlas en contacto, por ser mayor la superficie adherida, como consecuencia de la mayor fuerza por adhesión, el material con menor límite elástico, en el punto de contacto real, debe deformarse plásticamente por las altas cargas específicas a la que está sometido, por lo que se crea un contacto íntimo entre los dos materiales.

Debido a la influencia de la contaminación superficial producida por el medio ambiente, el endurecimiento de la superficie por efecto del trabajado mecánico y la creación de óxidos sobre la superficie, producen cambios de propiedades o formas de lubricación sólida que modifica todo el proceso, por lo que no se produce una adhesión como la descrita anteriormente.

2.4.2. Desgaste Abrasivo

Es producido por partículas duras que penetran en una superficie, ocasionando deformación plástica con arranque de viruta. Se origina en el deslizamiento relativo, entre una superficie dura sobre otra blanda. Se presentan dos formas de desgaste tipo abrasivo:

- a) Desgaste entre dos agentes, el más duro desprende material del más blando
- b) Desgaste entre tres agentes, donde el tercer elemento son usualmente partículas duras, sueltas, que se ubican entre las dos superficies deslizantes, incrustándose en una y desprendiendo material en la otra.

El desgaste abrasivo de tres agentes es de 2 a 10 veces menos intenso que el de dos cuerpos, debido a que solamente una pequeña porción de las partículas abrasivas entre las superficies causa el desgaste y debido a las variaciones en el ángulo de ataque de las partículas libres.

El factor más importante a considerar para este mecanismo de desgaste, es la dureza de las superficies en contacto, también lo es el que se interponga una partícula de mayor dureza entre ellas. A su vez, en este tipo de desgaste no sólo hay material removido sino que hay una gran cantidad de material deformado plásticamente. Las partículas abrasivas pueden ser inclusiones de una superficie o bien partículas sueltas.

Este tipo de desgaste, se presenta en equipos de perforación de suelos, trituradoras, molinos de bolas, en algunos casos en cuerpos en contacto deslizante, etc. En los metales la resistencia a la abrasión aumenta con la dureza; observándose que para los aceros este parámetro resulta ser menor que para metales puros de la misma dureza.

Es de recalcar que esta propiedad en el material desgastado es más indicativa de la resistencia a la abrasión que la dureza original.

2.4.2.1. Tipos de abrasión

2.4.2.1.1. Abrasión pura o de bajo esfuerzo

Las partículas se deslizan libremente sobre la superficie a un ángulo de incidencia pequeño.

2.4.2.1.2. Abrasión de alto esfuerzo

Este tipo de abrasión se presenta en el fenómeno de esmerilado producto del contacto de altas presiones del abrasivo sobre la superficie.

Es frecuente encontrar este tipo de abrasión presente en superficies que se deslizan entre sí en medio de partículas que ejercen elevadísimas presiones sobre dichas superficies.

2.4.2.1.3. Abrasión por desgarramiento

Este tipo de abrasión se caracteriza por la presencia de abrasivos de mayor tamaño, lo que someten a la superficie a un grado de impacto y a altos esfuerzos de compresión. El ángulo de incidencia es generalmente mayor que en el caso del mecanismo de abrasión de bajo esfuerzo. La remoción del material en abrasión por desgarramiento se debe a la deformación plástica, subsiguiente endurecimiento y desgarre de las partículas metálicas.

2.4.3. Desgaste por erosión

Se considera que la erosión es una forma de abrasión producida por esfuerzos de contacto relativamente bajo, debido al impacto de partículas sobre una superficie.

Dichas partículas son impulsadas por un fluido en el que están en suspensión. Las partículas van deformando plásticamente la superficie impactada, produciendo sobre ella una apariencia granular fina, similar a la de las fracturas frágiles. La velocidad de desgaste por erosión aumenta con la velocidad de las partículas y si los ángulos de impacto son pequeños predomina el corte abrasivo; siendo la dureza superficial un factor importante.

2.4.4. Desgaste por fatiga

Este tipo de desgaste se produce por la aplicación reiterada de cargas que producen tensiones sobre las capas superficiales, creando fisuras sobre las mismas; cuando estas se propagan, se desprende el material.

2.4.5. Desgaste por Corrosión

Este tipo de desgaste es una reacción superficial de muchos metales con el medio ambiente, creándose películas superficiales, como por ejemplo óxidos. Usualmente estas películas son muy duras y crean una protección sobre el material; luego, el espesor de las mismas crece excesivamente, volviéndose frágiles y propensas a ser removidas, una vez que se desprenden, dejan expuesto al material y el proceso vuelve a comenzar.

2.4.6. Desgaste micro-oscilatorio o fretting corrosivo

Esta forma de desgaste se caracteriza por la pérdida de material de superficies en contacto, bajo la acción de una carga y de movimiento deslizante de amplitud muy pequeña (por ejemplo 130 μ m). El término corrosivo está ligado al color rojizo que tienen las partículas desprendida de las superficies. En general el fretting corrosivo es una combinación de adhesión, abrasión, corrosión y en algunos casos con un agregado de fatiga.

2.5. CLASIFICACION DEL DESGASTE

La clasificación más simple de interacciones entre superficies que envuelven una u otra es: el desgaste suave y el desgaste severo. Esta clasificación está basada sobre las observaciones generales que para algunos pares de materiales se hacen, por ejemplo al incrementar severamente la carga normal y/ o velocidad de deslizamiento o rango de temperatura, conducen en alguna fase a saltos repentinos comparativamente en la tasa de desgaste. Las diferencias observadas más generales entre los dos régimen es de desgaste suave y desgaste severo entre una gran variedad de sistemas metálicos de deslizamiento son resumidas en la tabla 2.6.

DESGASTE SUAVE	DESGASTE SEVERO
Resultan superficies muy lisas	Resultan superficies muy rugosas Marcas de superficie profundas, más rugosas que la original
Debris (escombros) muy pequeños, generalmente solo 0,01mm de diámetro	Debris (escombros) metálicos más largos, típicamente por encima de 0,01 mm de diámetro
Resistencia eléctrica de contacto alta, contacto metalico real pequeño	Resistencia eléctrica de contacto baja Se forman juntas metálicas

TABLA 2.4. Diferencia entre desgaste suave y desgaste severo (Eyre, 1978)

Es importante recalcar que esta clasificación de desgaste suave y el desgaste severo no se hace de acuerdo a los mecanismos físicos que realmente ocurren en cada régimen. El desgaste puede ser causado por adhesión, por abrasión, por delaminación, por oxidación, o por algún otro fenómeno. El punto de partida en la investigación de cada campo complejo es hasta ahora la ecuación de desgaste de Archard, la cual afirma que la tasa de desgaste T.D., es directamente proporcional a la carga normal, F_n en el contacto e inversamente proporcional a la dureza de la superficie, D del material menos duro, es decir que; $T.D. \propto \frac{F_n}{D}$, Esto es:

$$T.D. = K * \frac{F_n}{(3*D)} \quad \text{Ec. 2.5}$$

La constante K es adimensional y se conoce como el coeficiente de desgaste y conocer su valor es obviamente vital en cualquier intento para la aplicación de la ecuación anterior de manera predictiva. En situaciones prácticas de ingeniería la dureza D del estrato superior del material en el contacto no se conoce con cierta certeza, y por lo tanto más usual de cuantificar solo el valor de K , es conocer el valor de la relación K / D . Esta

relación se conoce como coeficiente específico de desgaste k , y es generalmente contabilizada en unidades de $\text{mm}^3 \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$. Esto representa el volumen de desgaste en mm^3 por unidad de distancia deslizada en metros por unidad de carga normal en Newton.

La tasa de desgaste en la práctica puede anticiparse a la Tabla 2.7 (Archard, J.F y Hirst, W. 1956), la cual provee una indicación de los valores observados del coeficiente de desgaste K para un número de pares tribológicos con deslizamiento en seco. Varias observaciones pueden anticiparse en esta tabla.

MATERIAL	K
Acero (sobre acero)	7.0 E-03
Latón	6.0 E-04
PTFE	2.5 E -05
Aleación Cobre-Berilio	3.7 E-05
Acero endurecido para herramientas	1.3 E-04
Acero perlítico inoxidable	1.7 E-05
Polietileno	1.3 E-07

TABLA 2.5. Valores típicos de coeficientes de desgaste, K con deslizamiento en seco. Se utilizó acero para herramientas como material para desgastar sin lubricación con ensayo de tipo esfera sobre disco (pin-on-disk) en aire. En todas las pruebas los coeficientes de fricción están en el rango $0.18 < f < 0.8$ (Archard y Hirst.1956) * PTFE Politetrafluoretileno

Primero, el valor numérico del coeficiente de desgaste, K es siempre menor que la unidad. Segundo, el rango de los valores para los coeficientes

de fricción es de 0.18 y 0.8, y el rango de los valores en los coeficientes de desgaste es mucho más grande, es decir, $1.3 \text{ E-}07$ y $7.0 \text{ E-}03$.

Los coeficientes de desgaste en seco pueden variar un tanto como 4 a 5 órdenes de magnitud, mientras que el coeficiente de fricción en contacto deslizante seco es menor que uno. No obstante en forma cualitativa, es razonable esperar situaciones en las cuales hay fuerzas friccionales muy altas para que involucre un desgaste relativamente más alto.

2.6 TEORÍAS SOBRE EL DESGASTE

Las siguientes teorías se describen en forma detallada tomando como referencia lo descrito por Cubillán y Liccionis (2002):

2.6.1 Teoría de Adhesión

La teoría adhesiva de la fricción establecida por Tabor (1973), dio origen a una teoría general del desgaste por adhesión. En ella se establece que las superficies en contacto, aun cuando pueden presentar el mejor acabado superficial y de apariencia lisas en escala macroscópica, en realidad manifiestan una topografía irregular con presencia de asperezas en forma de crestas y valles. Por ello, cuando ambas superficies entran en contacto bajo la acción de una carga externa, dicho contacto se presenta solo en las crestas de las asperezas, por tanto, el área de contacto entre las superficies que soporta la carga es mucho menor en comparación con el área aparente de contacto. Del mismo modo, si las minúsculas regiones de la superficie donde se produce el contacto efectivo están limpias y/o libres de impurezas, los átomos de las superficies en contacto se atraen mutuamente dando como resultado una fuerte adhesión entre las mismas. De existir contaminantes superficiales como óxidos, el proceso de adhesión se vería disminuido pero el mismo existiría solo que en menor grado; debido a las altas presiones que se generan como resultado del área tan pequeña que soporta la carga,

dichas presiones rompen las capas contaminantes y permiten el contacto directo entre ambas superficies.

En el caso de metales, estos enlaces atómicos son llamados “uniones soldadas en frío”. De producirse deslizamiento, estas uniones se rompen; siendo la fuerza necesaria para su destrucción la principal causa de la fricción. Si además una de las superficies es más dura que la otra, las asperezas de la primera producen surcos en la segunda; considerándose la fuerza necesaria para producir los surcos, como un segundo componente de la fricción.

Según la teoría adhesiva del desgaste, Wright, K. (1973), establece que la formación de enlaces interatómicos entre las superficies en contacto es solo la primera etapa de un mecanismo de deterioro y no produce directamente pérdidas de material. De acuerdo a su postulante, las minúsculas áreas de contacto, sufren fluencia y alcanzan un cierto grado de deformación plástica.

Al producirse el deslizamiento esas zonas pueden ser sometidas a endurecimiento por deformación y el corte puede ocurrir en el material de menor dureza. Esto ocasionaría que se transfieran fragmentos de material de una superficie a la otra; pudiendo estos permanecer por un tiempo relativamente largo en la nueva superficie o viajar repetidamente entre ambas.

Otros mecanismos, como la fatiga y/o la abrasión, serían los responsables del desprendimiento de los fragmentos y de su salida del sistema. Sin embargo, hay que tener en cuenta que en la mayoría de los sistemas las partículas desprendidas no son inmediatamente removidas y debido a que generalmente son endurecidas, ejercen una acción abrasiva mientras que no salen de la zona de contacto.

Un mecanismo alterno fue propuesto por Archard, J.F. (1953), conocido como Teoría Adhesiva del Desgaste. Este mecanismo se basa en la probabilidad de que en cada encuentro entre las asperezas se produzca una partícula de desgaste. Estas partículas serían de forma hemisférica y de radio igual al de la región de contacto, la cual asumió circular. La teoría establece que:

$$V.D = \frac{K*Fn*d}{3*D} \quad \text{Ec.2.6}$$

Donde V.D. es el volumen de desgaste, k una constante de proporcionalidad, Fn la carga aplicada, d la distancia deslizada y D la dureza del material más blando.

Esta ecuación predice que el desgaste es proporcional a la distancia deslizada y a la carga aplicada, e independiente del área aparente de contacto. En este contexto, la constante *k* es una medida de la probabilidad de que en un encuentro localizado se produzca una partícula de desgaste y se puede esperar que esté relacionada con las condiciones superficiales. Las transiciones de desgaste suave a severo y viceversa serían consideradas por cambios en el valor de *k*, Hirst, W. (1957-1958). Según investigaciones posteriores, las transiciones podrían ser atribuidas a cambios en la dureza del material más blando, Welsh, N.C (1965).

2.6.2 Teoría de la Delaminación

Esta teoría es denominada Teoría de la delaminación para velocidades bajas. Fue postulada por Suh, N (1973) y en ella se trata de explicar la forma laminar que presentan las partículas de desgaste detectadas bajo esas condiciones.

Esta teoría postula que en el contacto entre dos superficies se transmiten fuerzas normales y tangenciales a través de los puntos de contacto, en

donde las asperezas de la superficie menos dura son fácilmente deformadas y fracturadas por los repetidos ciclos de carga, mientras que las asperezas de la otra superficie también son fracturadas, pero a velocidades menores. Como resultado de este proceso se genera inicialmente una superficie relativamente lisa, en la cual la fuerza tangencial ejercida en los puntos de contacto induce deformaciones plásticas superficiales y sub-superficiales.

Estas deformaciones aumentan con cada ciclo de carga y se van acumulando progresivamente. A medida que la deformación sub-superficial progresa se van nucleando grietas a cierta distancia por debajo de la superficie. Una vez que se nuclean las grietas las deformaciones subsecuentes causan su propagación y la unión de grietas vecinas. El crecimiento de las grietas tiende a ser paralelo a la superficie, a profundidades que estarían en función de las propiedades del material y del estado de esfuerzos a que está sometido en esa región. Cuando las grietas alcanzan la superficie se produce el desprendimiento del material, en forma de láminas largas y delgadas.

En referencia a esta teoría, Samuels, L.E.; Doyle y Turley (1981) mencionan experimentos en el interior de un microscopio electrónico de barrido, que demuestran que las partículas laminares pueden ser generadas por mecanismos completamente diferentes al postulado por la teoría de la delaminación. También hace referencia a otros experimentos donde se determinó que la delaminación del tipo general observado por Suh, puede ocurrir durante un solo paso de una aspereza y concluyen que aunque la existencia de la delaminación está bien establecida, la formación de las partículas laminares está todavía abierta a interpretación. La teoría de la delaminación involucra los siguientes pasos ilustrados en la figura 4.

a.- Fuerzas normales y tangenciales son primeramente transmitidas a través de los contactos de las asperezas, las cuales se deforman alisando la superficie.

b.- Ocurre deformación plástica en las capas superficiales.

c.- Se forman grietas paralelas bajo las capas superficiales.

d.- Estas grietas crecen hasta alcanzar una longitud crítica y el material entre la superficie y la grieta se corta en la parte más débil, para producir una partícula de desgaste, Suh, N.P. (1973).

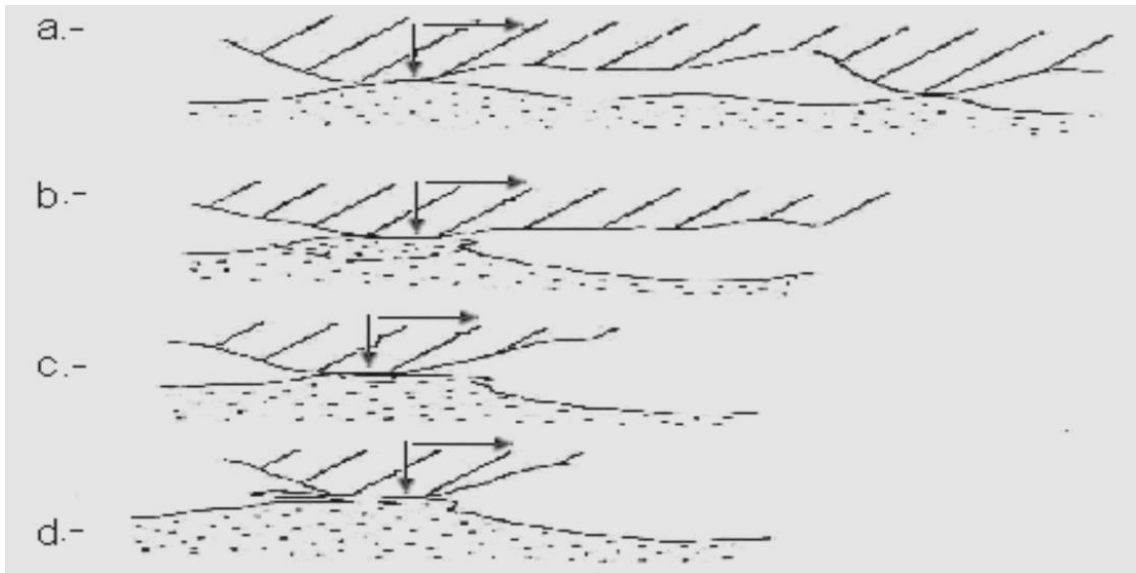


FIGURA 2.3 Representación esquemática para la formación de una partícula de desgaste por delaminación.

2.6.3 Teorías relacionadas con fatiga

El investigador Kragelskii, I y su grupo de colaboradores en 1981, resaltan tres periodos en los procesos de desgaste: la etapa de rodaje, la de estado estable y el desgaste severo.

En la primera de ellas se producen altas temperaturas, desgaste rápido de las asperezas más expuestas al contacto y deformaciones intensivas de las restantes asperezas. Estos procesos inducen la conformación de un nuevo patrón de rugosidad, que se reproduce en el tiempo y que no está relacionado con el original. Además, el endurecimiento debido a las deformaciones promueve las condiciones para que se establezcan contactos de tipo elástico; a su juicio, condición esencial para obtener desgaste mínimo y fuerzas de roce estables.

El período de estado estable se presentaría bajo estas condiciones y el desprendimiento de partículas se produciría como resultado de numerosos ciclos de carga. Estos ciclos de carga son explicados basándose en un modelo de interacción entre una aspereza dura en movimiento, contra una superficie más blanda. En la zona por delante de la aspereza, el material blando que todavía no ha sido alcanzado por aquella, es sometido a un esfuerzo de compresión. Por el contrario, el material que va siendo dejado atrás está sujeto a tracción.

De esta manera, cada porción del material blando es sometida a deformaciones repetidas de signo contrario; ocasionando cambios físicos y químicos en él, e induciendo el desprendimiento de partículas por un mecanismo de fatiga. Se considera así al desgaste como un proceso acumulativo, lo cual sería la única explicación posible al hecho que materiales duros puedan ser desgastados por materiales blandos (caso de pérdida de filo en herramientas).

2.6.4 Teoría del desgaste oxidativo

Otros trabajos importantes se deben a Quinn, T. et al (1980-1985), quienes explican el régimen de desgaste suave en términos de eventos relacionados con la oxidación de las superficies. El régimen citado sería consecuencia de un balance entre la remoción de las películas superficiales

oxidadas y la generación de nuevas capas de óxido, debido a la difusión de oxígeno y/o iones metálicos, a las altas temperaturas que normalmente se alcanzan en las áreas reales de contacto. El desgaste suave siempre sería precedido por un periodo inicial de desgaste severo, conocido como “rodaje”, el cual es un proceso transitorio, probablemente con altas deformaciones plásticas en las áreas reales de contacto. El desgaste oxidativo o corrosivo comenzaría una vez que la capa de óxidos alcance un espesor crítico, más allá del cual se hace mecánicamente inestable. Según ellos, las tasas de desgaste son proporcionales a la carga mientras el tipo de óxido no cambie.

Los cambios bruscos de temperatura superficial, por otra parte, irían acompañados de variaciones súbitas de la tasa de desgaste. Además en esta teoría, la dependencia con la carga, de la temperatura a la cual ocurre la oxidación en las áreas reales de contacto, tiende a seguir el mismo patrón que la variación de la temperatura superficial. Esto explicaría el incremento lineal de la Tasa de Desgaste con la carga antes o después de las transiciones, pues un incremento en la primera aumentaría la velocidad de oxidación, de manera que se alcanzaría el espesor crítico más rápidamente.

Por otra parte, los regímenes de desgaste suave y severo son relacionados por Quinn, T y sus asociados (1980-85), con los conceptos de desgaste oxidativo y desgaste por delaminación, respectivamente. Es de hacer notar, en este punto, que otros autores sugieren que el desgaste suave es debido a delaminación según Rosenfield, A. (1981); que bajo condiciones de lubricación el desgaste suave es debido a la fatiga y el severo a mecanismos de adhesión, Iwai, Y. y Kichiro, E. (1982); que el desgaste suave está relacionado con contactos elásticos y el severo con contactos plásticos, Kragelskii, I.V. (1981) o que por el contrario el desgaste severo se debe a delaminación y que a bajas velocidades no se producen contactos de tipo adhesivo, Abrahamson, E.P. (1974).

2.6.5 Teoría del deterioro cíclico

Este mecanismo de desgaste propuesto por Blau, P.J. (1981), sugiere un proceso de deterioro cíclico superficial, el cual contempla cuatro etapas para la formación de partículas de desgaste. Este proceso conjuntamente con otros tres: transferencias de material de una superficie a otra, formación-remoción de películas de óxido y generación de partículas de desgaste que permanecen en la zona de contacto, es considerado entre los causantes de transiciones en el desgaste deslizante de metales en ausencia de lubricantes. El modelo de deterioro superficial mencionado considera cuatro etapas en cada ciclo:

Inicialmente, es decir, en la primera etapa se produce deformación plástica, lo cual origina una capa altamente deformada.

La segunda etapa consiste en la generación de partículas laminares, por inicio y crecimiento de grietas en dicha capa, en forma similar a la propuesta por Suh, N (1973).

En tercer lugar se produce el desprendimiento de las partículas, dejando zonas en bajo relieve y mesetas sensiblemente planas. Estas mesetas son las que soportan la carga y a medida que se van generando las partículas de desgaste, la carga sobre aquellas aumenta. Las mesetas son eventualmente desplazadas sobre su superficie de fractura, produciendo surcos profundos por debajo del nivel de las mesetas no desplazadas.

El cuarto evento es el desprendimiento de las restantes mesetas. Las últimas de las cuales son rápidamente desplazadas. La superficie de la contra-cara entra entonces en contacto con la superficie que se encontraba previamente en bajo relieve; produciendo su alisamiento y la repetición del ciclo.

Estos eventos son consistentes con topografías observadas en huellas de desgaste y según Blau, parecen explicar el origen de ciertos rasgos superficiales y de microestructura subsuperficial, observados en metales severamente desgastados.

2.7. FACTORES QUE INFLUYEN SIGNIFICATIVAMENTE EN EL DESGASTE

2.7.1. Carga Normal

En líneas generales, se observa que el desgaste va en aumento con la carga normal, pero existen excepciones a este comportamiento. El coeficiente de roce no depende de la carga, entonces un aumento de la carga conlleva a un aumento en la energía friccional que se produce en el sistema. Esta energía tiene que ser disipada como calor o absorbida en la deformación y fractura de las capas superficiales, y si se mantiene la relación entre esas dos porciones de la energía, tendremos entonces que ha mayor energía friccional habrá mayor desgaste. La teoría de Archard, J.F. (1953) predice que el desgaste aumenta en proporción directa al aumento de la carga. Posteriormente Welsh, N.C. (1965) ha demostrado que pequeños aumentos de la carga provocan las llamadas transiciones T1, T2, T3; las cuales manifiestan como cambios bruscos en la Tasa de Desgaste. Welsh encontró que generalmente existe una dependencia lineal entre la Tasa de Desgaste y la carga, siempre que no haya cambios bruscos de régimen de desgaste.

2.7.2. Distancia recorrida

Tabor (1977), afirma que en todos los casos el desgaste aumenta con el tiempo o lo que es lo mismo con la distancia recorrida. Sin embargo, en ocasiones se transfieren fragmentos de material de una superficie a otra sin pérdida de peso neta. En otros casos puede ocurrir apilamiento del material desgastado, ocasionando la separación de las superficies (Hirst, 1967). En

estas circunstancias, si el desgaste es medido en base al desplazamiento relativo de los cuerpos, puede detectarse un desgaste aparentemente negativo.

Lipson (1967) realizó una referencia más precisa sobre el funcionamiento de la distancia deslizada en donde se ha reportado una relación lineal entre el volumen desgastado y el logaritmo de la distancia deslizada para los períodos iniciales; tomándose luego en una relación exponencial a medida que avanza el proceso. La mayoría de los investigadores que han publicado los gráficos de desgaste-tiempo para aceros en contacto deslizando contra una serie de materiales metálicos, se observó un comportamiento lineal.

Archard (1953), por otra parte había observado una relación lineal del volumen desgastado con respecto al tiempo y Welsh (1957) encontró un comportamiento lineal desgaste- tiempo, donde se diferencian dos patrones característicos. En el desgaste severo, la tasa del desgaste comienza siendo alta y permanece constante a lo largo del ensayo. En el régimen suave, la tasa de desgaste también es elevada en el período inicial y luego disminuye rápidamente, después de un corto intervalo y se mantiene estable durante un tiempo prácticamente indefinido.

Varios investigadores Archard(1953) y (Hirst, et al 1957) han demostrado que la tasa de desgaste, en términos de volumen desgastado por unidad de tiempo, es constante una vez que se estabilizan las condiciones. Sin embargo, muchos de los experimentos se realizan normalmente con probetas, de una geometría tal que, el área aparente de contacto aumenta a lo largo del ensayo. Bajo estas circunstancias, el desgaste es independiente de esta variable y en consecuencia de la presión de contacto. Esto es una desventaja, debido a que la presión de contacto es un parámetro muy usado en el diseño de elementos de máquinas.

2.7.3. Velocidad de Deslizamiento

Esta variable es de gran importancia y no puede ser modificada en el diseño cuando el tipo de movimiento es de traslación rectilínea; en cambio cuando el movimiento es rotacional, aumentos o disminuciones del diámetro, implican mayores o menores velocidades de deslizamiento. Por ende, a diferencia de la carga normal, la velocidad puede ser variada dentro de ciertos límites. Hay que tener en cuenta que los cambios de diámetro conllevan a variaciones del área y presiones de contacto.

En los estudios realizados por Kragelskii y Alisin (1981) el efecto de la velocidad está relacionado con la tenacidad de los materiales sometidos a desgaste, ya que esa variable determina el tiempo de existencia de un enlace friccional y en consecuencia, la tasa de deformación del material.

Welsh (1965), cita una investigación publicada por Kehl y Siebel en 1939, donde se reporta una transición de desgaste severo a suave con el aumento de la velocidad, particularmente en aceros de 0,64% de carbono a bajas durezas. También refiere los resultados de Kragelskii y Alisin (1981), quienes observaron un fenómeno similar en aceros de 0,8% de carbono a baja dureza y lo explicaron en términos de ablandamiento térmico.

Una transición del mismo tipo, observada por Welsh (1957), ocurría con períodos iniciales de desgaste severo más cortos, a velocidades mayores y que esto es debido a un proceso inducido de temple evidenciado por las altas durezas medidas en la huella.

2.7.4. Ambiente

En los procesos de desgaste es obvio que los cambios de temperatura afectan tanto las propiedades de los materiales en contacto, como las interacciones químicas entre las superficies. También la humedad relativa tiene un efecto significativo sobre las interacciones químicas. Bentley y

Duquette(1981) señalaron que la fricción y el desgaste aumentan con la temperatura, como resultado de aumentos de ductilidad de las asperezas y del crecimiento resultante de las juntas metálicas. Sin embargo, se ha encontrado temperaturas de transición, por encima de las cuales se producen notables reducciones de la fricción y el desgaste. En general este fenómeno se ha asociado la formación de óxidos con muy buenas propiedades lubricantes.

2.8 DISEÑO EXPERIMENTAL FACTORIAL

Los diseños factoriales son metodologías experimentales que se utilizan cuando se estudian diversas variables y se desea conocer el efecto de la interacción entre ellas. Fueron creados para generar procesos de calidad, lo que los convierte en métodos más prácticos que estadísticos, teniendo en cuenta el ahorro de costos y optimización de procesos. Genichi Taguchi desde 1950 los desarrolló como una aproximación al diseño de experimentos con el objetivo de reducir los costos y tiempos emanados de la experimentación.

Este tipo de diseño se usa en estudios en los cuales la cantidad de factores a estudiar es igual o mayor a dos, es decir, en experimentos en los que intervienen diversos factores que, en conjunto o asociados, influyen en la respuesta del sistema. Un estudio realizado bajo este diseño logra que sean evaluadas todas las combinaciones de factores posibles, para así apreciar los efectos de dichas combinaciones en la respuesta o salidas del sistema. Los factores se pueden definir como variables independientes, los cuales influyen en la salida del sistema. Mientras que las variables que indican la respuesta del sistema o salidas del proceso, se denominan variables dependientes. En el diseño experimental factorial cada combinación de factores es conocido como tratamientos.

En el modelo básico de un diseño experimental factorial (X^Y), la base (X) es un número entero ≥ 2 que representa los niveles o valores que toman las variables, y el exponente (Y) es un número entero o fraccionario, en algunos casos, también ≥ 2 que significa el número de variables a evaluar. Cada ensayo involucra un mínimo de tres replicas para garantizar significancia estadística. Así, un diseño 2^3 involucra 3 variables en 2 niveles cada una, lo que equivale a 12 ensayos y 4 condiciones de prueba. Un diseño 3^2 , por su parte, es el equivalente a 2 variables con 3 niveles de prueba cada una, lo que serían 27 ensayos y 9 condiciones de prueba. Los diseños más comunes son los que involucran menos corridas ó ensayos, como 2^3 , 2^2 y 3^2 e incluso 3^3 . Para un mayor número de variables y niveles de prueba, el número de corridas hace que el estudio sea significativamente prohibitivo en términos de tiempo y costos.

CAPÍTULO III
METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.1. INVESTIGACIÓN

Búsqueda de información y conocimientos para la elaboración de este trabajo investigativo el cual se puede dividir en los siguientes tipos:

3.1.1. Investigación Documental

Se define como el estudio de problemas con el fin de ampliar el conocimiento y profundizar en su naturaleza, apoyándose en trabajos relacionados anteriormente, información y datos divulgados por medios impresos, medios audiovisuales o material electrónico.

Este tipo de investigación tiene como objetivo “el desarrollo de las capacidades reflexivas y críticas a través del análisis, interpretación y confrontación de la información regida. Entre los posibles propósitos de este tipo de investigación se encuentran: describir, mostrar, probar, persuadir o recomendar. La investigación debe llevar a resultados originales y de interés para el grupo social de la investigación”. (Vélez, S. 2001)

3.1.2. Investigación Experimental

Se identifican las variables y condiciones las cuales han sido estudiadas en tesis anteriores y los resultados que éstas arrojaron como base para el estudio de factores anteriores y propiedades del material que se usó como recubrimiento.

La investigación experimental constó de los siguientes pasos:

1. Definición y establecimiento de la investigación, para lo cual se delimitaron los objetivos de la investigación o problema.
2. Desarrollo de un diseño experimental, realizando los ensayos necesarios para cumplir los objetivos de la investigación.
3. Elaboración de gráficos y el cálculo de variables utilizando los resultados obtenidos en los ensayos.

4. Análisis de los resultados.

3.2. PROCEDIMIENTOS Y ACTIVIDADES

1. Realización a través de libros, documentos, manuales, publicaciones en internet, la revisión bibliográfica de todo lo referente a recubrimiento por electrodeposición de Cromo Duro, Ensayo de Desgaste en arreglo Bloque sobre Anillo, Ensayo de Abrasión, y diferentes tipos de desgaste, obteniendo de esta manera el fundamento teórico de las actividades realizadas.
2. Determinación del número de probetas a ensayar partiendo de la combinación de parámetros establecidos con la ayuda de un diseño factorial 4^2 para los ensayos de desgaste por deslizamiento sin lubricación y 3^2 para los ensayos de abrasión para luego realizar la matriz para cada proceso con la combinación de los diferentes parámetros.
3. Compra del material, para las probetas y la arena para el ensayo de abrasión.
4. Fabricación de las probetas para el ensayo de desgaste por deslizamiento, desgaste por abrasión, todo esto siguiendo las normas respectivas para cada ensayo.
5. Vulcanizado de los discos de acero pertenecientes a la máquina de ensayos de abrasión.
6. Deposición del recubrimiento de Cromo Duro para los bloques y para las platinas que se utilizaran en el ensayo de abrasión.
7. Determinación de la densidad del recubrimiento por el método de inmersión.
8. Determinación de las condiciones de ensayo (carga y velocidad) para los ensayos de desgaste por deslizamiento.
9. Realización de los ensayos de desgaste por deslizamiento (arreglo bloque sobre anillo).

10. Acondicionamiento de la máquina de Abrasión: boquilla, alineación del fluido de arena, flujo de la arena en concordancia con los parámetros de la norma correspondiente.
11. Determinación de las condiciones de ensayo (carga y tiempo) para la realización de los ensayos de abrasión.
12. Realización de los ensayos de abrasión.
13. Realización de los ensayos de dureza.
14. Determinación de los mecanismos de desgaste y evaluación de la microestructura a las diferentes probetas mediante Microscopía Electrónica de Barrido.
15. Análisis e interpretación de los resultados obtenidos en los diferentes ensayos realizados.
16. En función de los análisis obtenidos redactar las conclusiones correspondientes.

3.3. MATERIAL

Para la fabricación de los bloques se utilizó como material de substrato un acero AISI 1020. La composición química se muestra en la Tabla 3.1

TABLA 3.1. Composición Química del acero AISI 1020

%C	%Mn	%P	%S	%Si	%Cu	%Al	%Mo	%Ni	%Cr
0.26	9.99	0.04	0.05	0.4	0.2	0.999	0.005	0.15	0.15

Para la fabricación de los anillos se utilizó como material un acero aleado AISI D-2 (Tabla 3.2) de gran tenacidad para máxima resistencia al desgaste y a la abrasión. Esto según características suministradas por el fabricante (SAESA, S.A.)

TABLA 3.2. Composición Química del acero AISI D-2

%C	%Cr	%Mn	% Si	%Mo	%V	Densidad(gr/cm³)	Dureza HB
1.50	12.00	0.30	0.30	0.80	0.85	7.65	240

3.3.1. Deposición por electrolisis de recubrimiento de Cromo Duro.

La deposición del recubrimiento se realizó en la Empresa Turbo Cromo, C.A. a cargo del Ingeniero Jorge Nieves quien nos suministró los parámetros operacionales del baño:

Las películas de cromo duro en procesos de recuperación de superficies, se aplican en espesores muy bajos cuyo promedio para fines de equipos de desplazamiento axial como equipos hidráulicos oscila en los 0,20 mm.

El tiempo de inmersión de las pletinas fue de 2:00 horas, tiempo estimado para obtener una película uniforme en toda la superficie.

Las pletinas fueron conectadas a barras de cobre y sumergidas en el baño, en dicho baño se da un proceso de electro deposición en la presencia de ánodos y cátodos, en este caso las pletinas vendrían siendo los cátodos, se hace circular la corriente a través de la solución para que se deposite la película de cromo duro sobre el acero base.

3.4. FABRICACIÓN DE LAS PROBETAS

Se utilizaron dos tipos de probetas, bloques para los ensayos de desgaste por deslizamiento y para el ensayo de abrasión respectivamente y anillos como contraparte en el ensayo de desgaste por deslizamiento.

Para la fabricación de los bloques para el ensayo de desgaste por deslizamiento se usó una pletina de acero AISI 1020 la cual fue cortada partiendo de las dimensiones originales de la pletina de longitud hasta llevarlas a las dimensiones indicadas en la norma ASTM G77-98 (6,35x15,75x10,16mm) ver Figura 5.

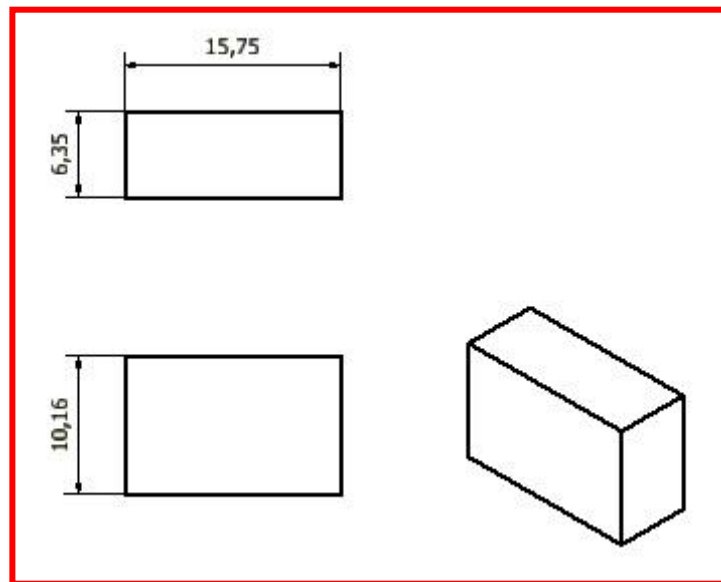


FIGURA 3.1 Diseño y dimensiones del bloque para el ensayo bloque sobre anillo. (Duarte y Farfán, 2011)

En cuanto a los anillos se partió de un cilindro macizo (tocho) de acero AISI 1020 de 31,75mm de diámetro por 600 mm de longitud, El cilindro macizo se perforó en un torno con brocas de 10, 22 y 25 mm a todo lo largo de las barras de 15 cm. Se procedió a mecanizar el cono interno del anillo en un torno y finalmente realizar los cortes con el disco abrasivo. Ver Figura 6

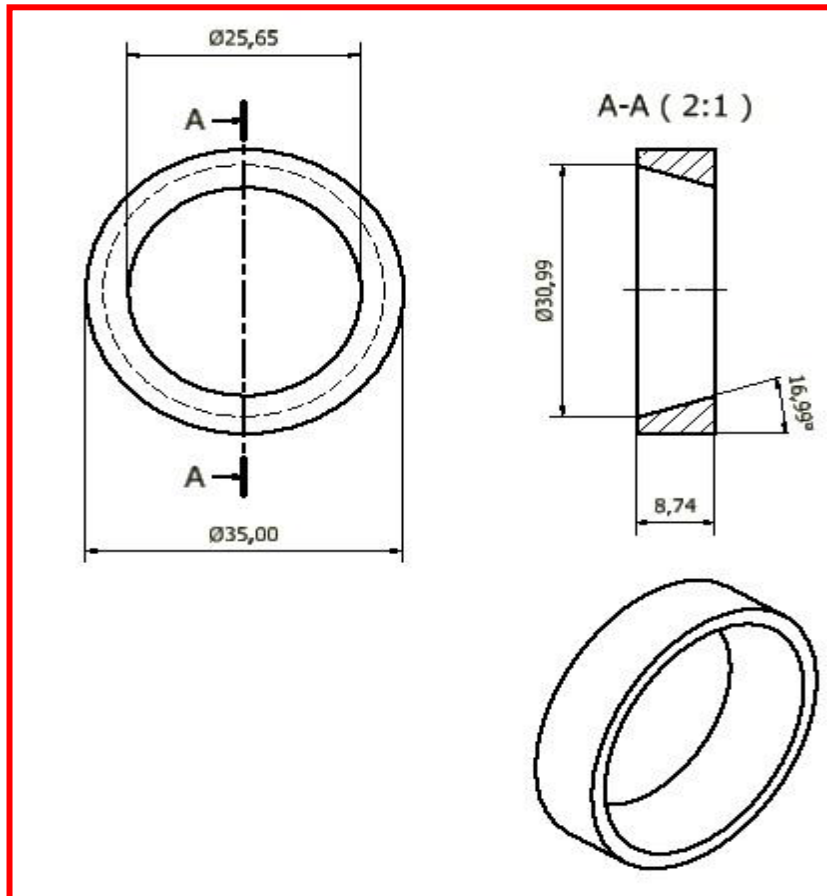


FIGURA 3.2 Diseño y dimensiones del anillo para el ensayo de bloque sobre anillo. (Duarte y Farfán, 2011)

Para los bloques del ensayo de abrasión se usó una lámina de acero AISI 1020 la cual fue cortada según específica la norma G65-00 para que pueda ajustarse a las exigencias de la máquina para este tipo de ensayos.

3.5. DISTRIBUCIÓN DE LAS PROBETAS

Para la realización de esta investigación se fabricaron en total 84 bloques recubiertos con Cromo Duro y 61 anillos de acero aleado D-2 para los ensayos de desgaste por deslizamiento y 56 platinas para el ensayo de abrasión. En el ensayo de desgaste sin deslizamiento de bloque sobre anillo

se requirió de 3 probetas por cada una de las 16 condiciones, obteniendo de esta manera 48 probetas a ensayar. Para el ensayo de abrasión la distribución era de 3 probetas por cada una de las 9 condiciones requiriéndose en total 27 probetas.

TIPO DE ENSAYOS	Numero de probetas
Desgaste por deslizamiento	48
Abrasión	27

TABLA 3.3. Distribución de las probetas según el tipo de ensayo.

3.6. PROCEDIMIENTO PARA LOS ENSAYOS DE DESGASTE

3.6.1. Limpieza de las probetas

Para proteger del óxido y mantener las probetas libres de impurezas las piezas a ser ensayadas, se procede a sumergirlas en thinner para eliminar la grasa proveniente del corte de las probetas, por aproximadamente 5 minutos luego son limpiadas con un paño seco y colocadas en un limpiador por ultrasonido donde son sumergidas en alcohol absoluto al 90% por un tiempo de 380 segundos, posteriormente son colocadas sobre papel absorbente y son secadas con un secador manual por un lapso de 1 minuto, esto garantiza que se eliminan todos los restos de grasa y aceite protector y al mismo tiempo asegurarse, que tanto los bloques como los anillos estén exentos de cualquier sustancia contaminante y lubricante.

Luego las probetas son guardadas adecuadamente en bolsas plásticas identificadas y enumeradas, para proceder al pesaje en una balanza electrónica digital marca Ainsworth AA-160 con 0.0001g de precisión.

Debido a la cantidad de piezas a ensayar estas son almacenadas en un envase con desecadores para protegerlas de los cambios de temperatura y humedad del medio ambiente y así evitar la oxidación. Este proceso de limpieza está especificado en la norma ASTM D2714-88 de calibración y operación de la máquina para el estudio de fricción y desgaste.

Una vez finalizado el proceso anterior se procede a la limpieza de la cámara de ensayo (J), identificada en la Figura 7, procediendo posteriormente a la calibración de la máquina para una carga determinada.

3.6.2. Descripción del Equipo

Los ensayos se realizan en un tribómetro para simulación de desgaste, en la configuración bloque sobre anillo, La interacción bloque-anillo se lleva a cabo en ausencia de lubricante, en aire. A continuación se indica el procedimiento para la Calibración de la Máquina Falex Alfa LFW-1, como se ve esquematizada en la Figura 7

Componentes de la máquina de ensayo:

- (A) Interruptor.
- (B) Contador mecánico de tiempo de funcionamiento (horas).
- (C) Selector de velocidad de rotación del eje.
- (D) Contador digital de ciclos.
- (E) Controlador e indicador de la temperatura del baño de aceite.
- (F) Indicador digital de las r.p.m.
- (G) Indicador digitales de la temperatura ($^{\circ}$ C).
- (H) Interruptor automáticos de la fuerza de roce.
- (I) Indicador digital de la fuerza de roce (libras).
- (J) Cámara de ensayo.
- (K) Dial indicador de la penetración (pulgadas* 10^{-4}).
- (L) Cavidad para el alojamiento de los bloques.
- (M) Eje cónicos para el alojamiento del anillo.

(N) Soporte para alojar las pesas.

(O) Brazo palanca.

(P) Llave de drenaje para la limpieza de la cámara.

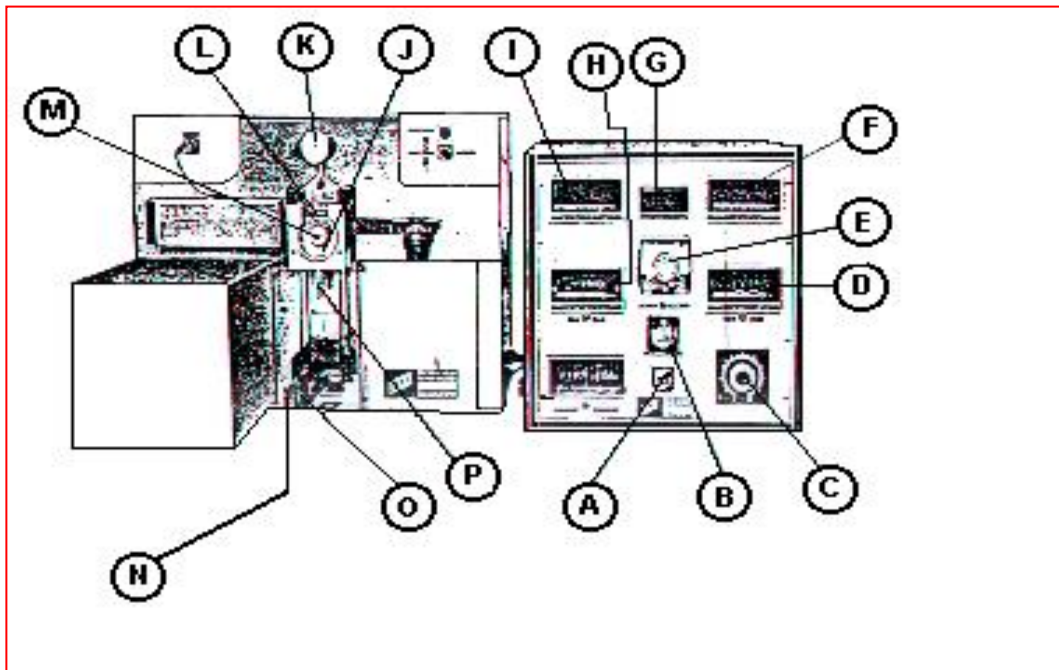


FIGURA 3.3 Dibujo esquematizado de la maquina FALEX alfa LFW-1

Calibración del medidor de fuerza de roce:

- 1) Accionar el interruptor(A). Espere durante 15 minutos para estabilización del instrumento.
- 2) Una vez hecho esto, quite la tapa plástica del indicador digital de la fuerza de roce (I). Ajuste el cero con el tornillo de la derecha de los tres de la esquina inferior derecha. Accione el interruptor 7 hacia la derecha y debe aparecer el número de calibración eléctrica indicado en la parte interior de la tapa. Si no es así, ajuste el tornillo central (ganancia) de los tres colocados en la esquina inferior derecha del medidor. El tornillo de la derecha es el cero (el instrumento mide 1 vez/seg.). Deje el interruptor 7 hacia la izquierda, ajuste el cero y vuelva a ajustar el número de calibración.
- 3) Coloque el porta- pesa de calibración y compense a “CERO” su efecto (- 0,3lbf). Coloque pesas en el soporte y ajuste el tornillo central de ganancia para la lectura correcta.
- 4) Retire el porta-pesas de calibración, ajuste el instrumento a “CERO” y accione el interruptor número 7 para obtener una lectura de calibración en el instrumento que pueda diferir del número de calibración inicial de fábrica, debido a cualquier cambio en el sistema de fricción. Anote el nuevo número de calibración. Accione el interruptor número 7 en cualquier momento para controlar la calibración eléctrica del instrumento(o sea el nuevo número de calibración).
- 5) Instale el anillo en el eje cónico de la máquina (M) con la arandela de seguridad y la tuerca. Apriete manualmente, de tal manera que una de las seis esquinas de la tuerca apunte hacia arriba, apretando con la arandela. (Para lograr esto: coloque el anillo cuidadosamente en el eje hasta que “calce”. Inserte la arandela y apriete la tuerca suavemente hasta

simplemente apoyarla contra la arandela, sin ejercer “ningún tipo de presión”. Haga girar cuidadosamente la arandela, sin tocar la tuerca ni el anillo con los dos dedos, en el sentido horario, hasta que sienta que está lo más apretado posible. Si ninguna de las esquinas de la tuerca apunta hacia arriba (90°) haga girar el eje con la llave Allen grande. Coloque la llave especial (Placa rectangular con agujero hexagonal y una pequeña proyección perpendicular en uno de sus vértices) en la tuerca y permita que la oreja a la derecha de la llave se apoye lateralmente en el soporte del espécimen empujándolo hacia la izquierda. Use la llave Allen grande y apriete en sentido anti horario hasta que el medidor de la fuerza de roce (I) indique 50 a 60 lbf.

- 6) Instale el bloque de manera que se apoye sobre el anillo (L), alcanzando su posición más posterior. El agujero para el termopar debe quedar hacia afuera con una pequeña carga en la palanca o una carga de 5 lbf (1/2Lb-pesa). Apriete ligeramente el tornillo de la derecha del soporte, para asegurar el bloque en su lugar. Quite la pesa (este peso depende de la carga a aplicar en el ensayo, se recomienda 1/3 de las pesas a aplicar).
- 7) Al tener el bloque y el anillo montados, se coloca un papel en la parte inferior de la cámara (J), que es donde van a caer los residuos del desgaste.
- 8) Ajuste el contador digital de ciclos (D) y el reóstato o selector de velocidad de rotación del eje (C) a la velocidad prevista para el ensayo, manteniendo el brazo palanca(O) levantado, esto con el fin de no aplicar todavía la carga.
- 9) Se colocan las pesas en el soporte (N), teniendo en cuenta que, debido a la longitud del brazo palanca (O), éstas deben ser 1/10 de la carga que se desea aplicar al bloque.

- 10) Aplique la carga bajando cuidadosamente el brazo palanca(O), para evitar choques.
- 11) Durante el ensayo se toman lecturas de temperatura en el centro del bloque mediante el indicador digital de temperatura (G), y de fuerza de roce mediante el indicador digital de fuerza de roce (I). La lectura de penetración no se tomó, ya que el dial indicador de la penetración (K), se encontraba dañado.
- 12) En los ensayos definitivos, posterior a los ensayos previos, se tomaron lecturas tanto de temperatura como de fuerza de fricción cada 10 ciclos hasta alcanzar una distancia de 550 ciclos.
- 13) Al finalizar el ensayo, se retira el bloque y el anillo y cuidadosamente mediante una escobilla especial, se retiran restos de las partículas de desgaste en ambas piezas, para luego ser guardadas en sus respectivos envoltorios. Posteriormente son nuevamente pesadas en la balanza electrónica y finalmente depositadas en sus envoltorios, mientras se les realiza el análisis de microscopía electrónica.

3.7. PARAMETROS DEL ENSAYO

Para la realización del presente trabajo de investigación, se tomaron como rango de valores para cada una de las variables, a saber carga normal F_n (N), velocidad de desplazamiento V (m/s) y distancia recorrida d (m) , tomando como referencia el trabajo realizado por Pedro Cadenas (2005), lo siguiente:

- a) Carga normal: 89, 178 y 267 N
- b) Velocidad de desplazamiento: 0.1, 0.2, 0.4 y 0.5 m/s
- c) Distancia recorrida: 550m (5000 ciclos)
- d) Atmósfera: aire temperatura ambiente: 20°C, Humedad relativa: 60%

Estos valores combinados uno a uno, de carga normal, velocidad de desplazamiento, manteniendo constante la distancia recorrida da como resultado nueve ensayos, realizando tres replicas son en total 27 ensayos a realizar. Se realizó el primer ensayo a carga de 267 N con velocidad de desplazamiento de 0,5 m/s y el bloque se le desgastó todo el recubrimiento, se realizó un segundo ensayo a carga de 89 N con velocidad de desplazamiento de 0,5 m/s igualmente el bloque perdió el recubrimiento en su totalidad llegando al substrato sin aún cumplir con la distancia recorrida sólo se ensayó hasta los 1879 ciclos (206,69 m). Se procedió a definir los valores que soportaran con los parámetros de distancia recorrida de manera de producirse un desgaste en el recubrimiento, pero sin llegar al substrato del bloque, considerándose los nuevos valores de carga normal y de velocidad de deslizamiento, dejándose fijo el valor de distancia recorrida a 550m los siguientes:

- a) Cuatro valores de carga: 11.1, 22.3, 33.4, y 44.5 N
- b) Cuatro valores de velocidad: 0.1, 0.2, 0.4 y 0.5 m/s

La combinación de los valores de carga y velocidad manteniendo constante la distancia recorrida, da como resultados 48 ensayos a realizar en total, los cuales corresponden al diseño experimental de cuatro niveles de dos variables con tres replicas por ensayo.

3.8 ENSAYOS DE DUREZA ABSOLUTA

Para la realización del ensayo de dureza se prepararon previamente las probetas las cuales fueron cortadas y preparadas metalográficamente hasta obtener una superficie especular. Se realizó el ensayo de microindentación Vickers aplicando distintas cargas desde durante un tiempo de 15 segundos, con el objeto de determinar la dureza absoluta de este recubrimiento, aplicando el modelo de Thomas (1987), el cual consiste en graficar la microdureza Vickers en función del inverso de la medida de la

diagonal (L) del empronta de la huella en el respectivo ensayo y obtener el punto de corte con el eje de la ordenada, el cual representa el valor de la dureza absoluta. Se tomaron un número de 10 indentaciones por probeta realizando un barrido desde el recubrimiento hasta el sustrato.

El equipo utilizado fue un microdurómetro marca BUEHLER LAKE BLUFF modelo N° 1105 ubicado en el Laboratorio de Metalografía de la Escuela de Ingeniería Mecánica (Figura 8).



Figura 3.4 - Microdurómetro

3.9. ENSAYO DE ABRASIÓN

Para la realización del ensayo de abrasión se usó un equipo ubicado en el Laboratorio de Ensayos mecánicos de la Escuela de Ingeniería Mecánica, este equipo fue construido en 1999 por los estudiantes Pinto Nicola y Rangel Aldrin bajo la Norma ASTM G 65-00 (Fig. 9). La máquina consiste en una rueda de goma que gira bajo carga a 200 ± 40 rpm, la cual es impulsada por

un motor reductor DC de 1HP, mientras un flujo de arena abrasiva de partículas de cuarzo, cuyo tamaño es de 50 – 70 micras, en concordancia con lo establecido en la norma AFS, se hace pasar entre la rueda y la platina que se encuentra sujeta en un porta muestra paralela a la rueda y sobre cual se le aplica una carga de manera mantenerla en esa posición mientras se le suministra el flujo de arena.

La arena de cuarzo debe poseer según American Foundry Sand N° AFS 50-70. La misma debe poseer según la norma un contenido de humedad que no debe de exceder el 0,5% del porcentaje de su peso.

Para la realización del ensayo de abrasión será requerido que la rata de flujo de arena se de 300 a 400gr/min., esto es especificado por la norma.



FIGURA 3.5 Máquina de ensayos de abrasión de la Escuela de Ingeniería Mecánica. UCV

La rueda está compuesta con un disco de acero AISI 1040 como base, en su periferia se encuentra moldeada la rueda de caucho de Clorobutilo con 0,5 in de espesor (12,7 mm.). Esta rueda fue reencauchada en la empresa GOMAINCA situada en Barquisimeto Edo. Lara. La composición de la rueda está indicada en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4. Composición del Recubrimiento de Goma (Pinto, Rangel.1999)

MATERIALES	PROPORCIÓN POR PESO
Chlorobutyl N° HT 10-66	100
Agerite Staylite – S	1
HAF Black	60
Circolight oil	5
Stearic acid	1
Zinc oxide	5
Ledate	2

En la Tabla 3.5 se encuentran los diferentes parámetros para cada uno de los procedimientos de la prueba de Abrasión según la norma ASTM G-65. Para poder determinar el procedimiento a utilizar, se hizo una prueba con tres tiempos 5, 10 y 15 min, a cargas variables de 4,45N, 2,25N y 1,12N, luego se determinó la cantidad de material removido.

Tabla 3.5. Parámetros de Ensayo según la Norma G65-00

Procedimiento	Fuerza aplicada contra la Probeta N(Lb)	Revoluciones de la Rueda (rpm)	Abrasión Lineal (m)
A	130 (30)	6000	4309
B	130 (30)	2000	1436
C	130 (30)	100	71.8
D	45 (10.1)	6000	4309
E	130 (30)	1000	718

3.9.1. Procedimiento a utilizar para ensayar en la máquina de Abrasión

- 1- Se le realizó una limpieza a las probetas con alcohol al 90% en un limpiador ultrasónico, con el fin de remover todas aquellas impurezas que se encontraban en la superficie y luego se secaron.
- 2- Se pesaron las probetas en la balanza.
- 3- Se verificó que el disco estuviera girando a 200 r.p.m con ayuda de un Tacómetro.
- 4- Se colocó el temporizador en el tiempo requerido.
- 5- Se revisó que la rata de flujo de arena a través de la tobera estuviera entre 300 gr/min. (0,66 lb/min.) y 400 gr/min. (0,88 lb/min.).
- 6- Se colocó la probeta cuidadosamente en el soporte y se añadieron los pesos apropiados a la palanca para así desarrollar la fuerza apropiada presionando la probeta contra la rueda. Se hizo uso de un gancho a manera de anzuelo sobre la palanca para que la probeta se mantuviera lejos de la rueda antes de que se iniciara el ensayo.

- 7- Se comenzó la rotación de la rueda e inmediatamente después se bajo la palanca para poder permitir el contacto entre la probeta y la rueda.
- 8- Al finalizar el tiempo del ensayo se separó la probeta de la rueda, se detuvo el flujo de arena y la rotación de la rueda.
- 9- Luego se desmontó la probeta, se volvió a limpiar para luego pesarla nuevamente.

El tiempo de descanso entre las pruebas fue el necesario para que la rueda de goma vuelva a temperatura ambiente.

3.9.2. Método para el Cálculo de la densidad de los recubrimientos

La densidad es una medida utilizada por la física y la química para determinar la cantidad de masa contenida en un determinado volumen. Definimos la densidad absoluta o real que mide la masa por unidad de volumen,

$$d = \frac{m}{v}$$

Por lo tanto se debe conocer la masa y el volumen del recubrimiento a estudio, por lo que se procede a utilizar el método de Arquímedes, el cual se basa en calcular la densidad de los recubrimientos a partir del desprendimiento de pequeñas conchas de recubrimiento ,se seleccionaron dos probetas, estas conchas fueron pesadas en una balanza analítica y posteriormente se sumergieron en una jeringa de uso médico (Jeringa de Insulina) llena de alcohol Isopropílico, al restar el volumen inicial de alcohol y el volumen final luego de introducir los trozos de recubrimientos se determinó el volumen de la muestra.

$$Vmuestra = Voagua - Vfagua$$

Al dividir la masa de la muestra entre su volumen se pudo obtener su densidad correspondiente. Para la realización de este método se utilizó una jeringa médica, dicho instrumento posee una apreciación de 0,1 ml. Este recubrimiento tienen la característica de presentar extensas zonas de porosidad como demostraremos más adelante mediante MEB, en este caso el recubrimiento del Cromo Duro existen zonas muy irregulares donde se encuentran grietas que afectan los resultados obtenidos, sin embargo tomaremos estos valores como referencia (tabla 9) para el cálculo de la tasa de desgaste.

Tabla 3.6 Valores de densidad de los recubrimientos

Muestra	g/cm ³
Cromo Duro	9,81

3.9.3. Pérdida Volumétrica

Los resultados del ensayo de abrasión deben estar expresados en pérdida de volumen en mm³ de acuerdo con los procedimientos utilizados en la prueba.

Para el cálculo de la pérdida de volumen la norma establece las siguientes ecuaciones:

Cálculo de la pérdida de masa en la probeta:

$$\text{Ec. 3.1} \quad \Delta m_{corr} [gr] = \frac{\Delta m [gr] \times \phi_{rueda} [mm]}{D_{Frueada} [mm]}$$

Donde;

$\Delta m_{corr} [mm]$: Pérdida de masa corregida debido al ensayo de abrasión.

$\Delta m = (masa_{inicial} - masa_{final}) [mm]$: Pérdida de masa medida en la muestra.

$\phi_{rueda} = 228,16 [mm]$: Representa el diámetro inicial de la rueda de caucho.

$D_{Frueada} [mm]$: Diámetro de la rueda de caucho al final de la prueba de abrasión.

Cálculo de la pérdida de volumen

$$\text{Ec. 3.2} \quad \Delta V_{corr} [mm^3] = \frac{\Delta m_{corr} [gr]}{\rho \left[\frac{gr}{mm^3} \right]}$$

Donde;

$\Delta V_{corr} [mm^3]$: Corresponde a la pérdida de volumen.

$\rho \left[\frac{gr}{mm^3} \right]$: Densidad del recubrimiento.

Estas correcciones para la pérdida de masa y volumen se realizaran para obtener resultados con un mismo criterio, es decir, sin que se vean afectadas por la variación del diámetro del disco de caucho, el cual, se va reduciendo debido al desgaste en cada uno de los ensayos.

3.10 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (MEB)

La microestructura, superficie de desgaste y composición del recubrimiento fueron evaluadas mediante un microscopio electrónico de barrido marca Philips Ubicado en el IUT Dr. Federico Rivero Palacio en la Ciudad de Caracas, Venezuela.

El microscopio utilizado fue un Philips modelo XL 30 con un voltaje de aceleración de 20KV, con capacidad para ampliaciones de hasta 30000X y acoplado a un equipo de espectroscopia por dispersión de energía de rayos X, para cada muestra se tomaron imágenes a diferentes magnificaciones sobre una superficie previamente preparada mecanográficamente, para el desbaste la superficie fue preparada utilizando papel abrasivo de SiC de granulometrías desde 80 hasta 1200 y para el pulido se utilizaron paños de lona y de fieltro, con polvo abrasivo de alúmina (Al_2O_3) de granulometrías de 1 y 0,3 μm hasta quedar una superficie especular.

Las muestras seleccionadas para la realización de la microscopia electrónica de barrido fueron las que presenten las mejores y peores condiciones para el ensayo

CAPITULO IV
PRESENTACION Y ANALISIS DE RESULTADOS

4.1. Resultados Obtenidos

4.1.1. Resultados Experimentales.

Los resultados obtenidos de forma experimental en base a la norma **ASTM D 2714 88**, se muestran en las tabla 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.7 y 4.8, para cada una de las combinaciones de variables operacionales, carga normal y velocidad de deslizamiento con tres replicas para cada uno de los ensayos, donde

Fn Carga normal aplicada [N]

V Velocidad de deslizamiento [m/s]

Fmed Fuerza de roce promedio para cada replica [N]

fmed Coeficiente de fricción medio del ensayo

fmax Coeficiente de fricción máximo del ensayo

mb1 Masa del bloque antes del ensayo [gr]

mb2 Masa del bloque después del ensayo [gr]

ma1 Masa del anillo antes del ensayo [gr]

ma2 Masa del anillo después del ensayo [gr]

Tmed Temperatura promedio medida en el centro del bloque para cada ensayo [°C]

mB R1 Masa desgastada del bloque replica N° 1 [gr]

mB R2 Masa desgastada del bloque replica N° 2 [gr]

mB R3 Masa desgastada del bloque replica N° 3 [gr]

mB prom Masa desgastada promedio del bloque [gr]

mA R1 Masa desgastada del anillo replica N° 1 [gr]

mA R2 Masa desgastada del anillo replica N° 2 [gr]

mA R3 Masa desgastada del anillo replica N° 3 [gr]

mA prom Masa desgastada promedio del anillo [gr]

VD Volumen desgastado [mm^3]

TD Tasa de desgaste [mm^3/m]

K Coeficiente específico de desgaste [$\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$]

F1, v1, r1 Fuerza N° 1 a la velocidad N°1 replica N°1

$$\mathbf{F1} = 11.1 \text{ N}$$

$$\mathbf{F2} = 22.3 \text{ N}$$

$$\mathbf{F3} = 33.4 \text{ N}$$

$$\mathbf{F4} = 44.5 \text{ N}$$

$$\mathbf{V1} = 0.1 \text{ m/s}$$

$$\mathbf{V2} = 0.2 \text{ m/s}$$

$$\mathbf{V3} = 0.4 \text{ m/s}$$

$$\mathbf{V4} = 0.5 \text{ m/s}$$

En las siguientes tablas se presentan los valores de la masa promedio de los bloques y los anillos antes y después del ensayo

Tabla 4.1 RESULTADOS OBTENIDOS EXPERIMENTALMENTE

CARGA = 11,1 N

Nombre del Ensayo	Fn [N]	V [m/s]	mb1 [gr]	mb2 [gr]	ma1 [gr]	ma2 [gr]
F1, v1,r1	11,1	0,1	7,5384	7,5379	20,6387667	20,6359
F1, v1,r2	11,1	0,1	7,31896667	7,3186667	21,1613667	21,1562333
F1, v1,r3	11,1	0,1	7,54583333	7,5454	21,7036333	21,6927667
F1,v2,r1	11,1	0,2	7,36023333	7,3598	20,5183333	20,5049667
F1,v2,r2	11,1	0,2	7,56856667	7,5681266	20,4795667	20,4725667
F1,v2,r3	11,1	0,2	7,55783333	7,5574999	22,0710333	22,0635667
F1,v3,r1	11,1	0,4	7,43333333	7,4331667	19,6560333	19,6483667
F1,v3,r2	11,1	0,4	7,50523333	7,5045	20,8959333	20,8864
F1,v3,r3	11,1	0,4	7,5542	7,5534	21,8976333	21,8843667
F1,v4,r1	11,1	0,5	7,3606	7,3589333	20,2211	20,2081
F1,v4,r2	11,1	0,5	7,3276	7,3265333	20,3232667	20,3116333
F1,v4,r3	11,1	0,5	7,52686667	7,5265333	21,6824333	21,6746

Tabla 4.2 RESULTADOS OBTENIDOS EXPERIMENTALMENTE

CARGA = 22,3 N

Nombre del Ensayo	Fn [N]	V [m/s]	mb1 [gr]	mb2 [gr]	ma1 [gr]	ma2 [gr]
F2,v1,r1	22,3	0,1	7,3909333	7,3897	20,3419	20,330867
F2,v1,r2	22,3	0,1	7,5039333	7,5029	20,8468	20,832767
F2,v1,r3	22,3	0,1	7,5503333	7,5501333	21,6545	21,640433
F2,v2,r1	22,3	0,2	7,3901667	7,3895	20,9895	20,9774
F2,v2,r2	22,3	0,2	7,3655	7,3645667	20,222333	20,212933
F2,v2,r3	22,3	0,2	7,6089	7,6088333	21,6267	21,601967
F2,v3,r1	22,3	0,4	7,4333	7,4322	21,869567	21,857133
F2,v3,r2	22,3	0,4	7,4201	7,4190333	19,595133	19,5832
F2,v3,r3	22,3	0,4	7,3007	7,2999	20,268767	20,2389
F2,v4,r1	22,3	0,5	7,3813	7,3806	20,586033	20,5593
F2,v4,r2	22,3	0,5	7,3821333	7,3812	20,4514	20,4215
F2,v4,r3	22,3	0,5	7,591	7,5899333	19,984967	19,959467

Tabla 4.3 RESULTADOS OBTENIDOS EXPERIMENTALMENTE

CARGA = 33,4 N

Nombre del Ensayo	Fn [N]	V [m/s]	mb1 [gr]	mb2 [gr]	ma1 [gr]	ma2 [gr]
F3,v1,r1	33,4	0,1	7,4306333	7,4298667	20,4843	20,469403
F3,v1,r2	33,4	0,1	7,2238667	7,2229	20,576967	20,5586
F3,v1,r3	33,4	0,1	7,5887333	7,5882	21,9786	21,963033
F3,v2,r1	33,4	0,2	7,541	7,5398333	20,703967	20,691567
F3,v2,r2	33,4	0,2	7,5412	7,5401333	20,945533	20,935967
F3,v2,r3	33,4	0,2	7,4509667	7,4499	20,43	20,415267
F3,v3,r1	33,4	0,4	7,5625667	7,5617333	20,2651	20,252
F3,v3,r2	33,4	0,4	7,4275333	7,4254667	21,129	21,094967
F3,v3,r3	33,4	0,4	7,5439	7,5429667	22,044633	22,023933
F3,v4,r1	33,4	0,5	7,4436667	7,4419667	19,581967	19,549667
F3,v4,r2	33,4	0,5	7,3533333	7,3520333	20,3411	20,314733
F3,v4,r3	33,4	0,5	7,4606667	7,4597	21,739567	21,711267

Tabla 4.4 RESULTADOS OBTENIDOS EXPERIMENTALMENTE

CARGA = 44,5 N

Nombre del Ensayo	Fn [N]	V [m/s]	mb1 [gr]	mb2 [gr]	ma1 [gr]	ma2 [gr]
F4,v1,r1	44,5	0,1	7,4254333	7,4248333	20,3667	20,353733
F4,v1,r2	44,5	0,1	7,4413	7,4395367	20,5211	20,4989
F4,v1,r3	44,5	0,1	7,6510333	7,6503333	21,7954	21,776433
F4,v2,r1	44,5	0,2	7,3544667	7,3536667	20,8893333	20,876167
F4,v2,r2	44,5	0,2	7,3692	7,3674667	19,5851333	19,5708
F4,v2,r3	44,5	0,2	7,5628333	7,5615333	20,83	20,813733
F4,v3,r1	44,5	0,4	7,4688333	7,4673	20,3726667	20,342433
F4,v3,r2	44,5	0,4	7,3537	7,352	20,4423667	20,404967
F4,v3,r3	44,5	0,4	7,5387	7,5369333	20,6366	20,6057
F4,v4,r1	44,5	0,5	7,2848	7,2836667	20,6728	20,630167
F4,v4,r2	44,5	0,5	7,4245333	7,4229667	20,4071667	20,360167
F4,v4,r3	44,5	0,5	7,6113667	7,6088	20,5965	20,546833

Tabla 4.5 RESULTADOS OBTENIDOS EXPERIMENTALMENTE

VELOCIDAD = 0,1 m/s

Nombre del Ensayo	V [m/s]	Fn [N]	mb1 [gr]	mb2 [gr]	ma1 [gr]	ma2 [gr]
F1, v1,r1	0,1	11,1	7,5384	7,5379	20,638767	20,6359
F1, v1,r2	0,1	11,1	7,3189667	7,3186667	21,161367	21,156233
F1, v1,r3	0,1	11,1	7,5458333	7,5454	21,703633	21,692767
F2,v1,r1	0,1	22,3	7,3909333	7,3897	20,3419	20,330867
F2,v1,r2	0,1	22,3	7,5039333	7,5029	20,8468	20,832767
F2,v1,r3	0,1	22,3	7,5503333	7,5501333	21,6545	21,640433
F3,v1,r1	0,1	33,4	7,4306333	7,4298667	20,4843	20,469403
F3,v1,r2	0,1	33,4	7,2238667	7,2229	20,576967	20,5586
F3,v1,r3	0,1	33,4	7,5887333	7,5882	21,9786	21,963033
F4,v1,r1	0,1	44,5	7,4254333	7,4248333	20,3667	20,353733
F4,v1,r2	0,1	44,5	7,4413	7,4395367	20,5211	20,4989
F4,v1,r3	0,1	44,5	7,6510333	7,6503333	21,7954	21,776433

Tabla 4.6 RESULTADOS OBTENIDOS EXPERIMENTALMENTE

VELOCIDAD = 0,2 m/s

Nombre del Ensayo	V [m/s]	Fn [N]	mb1 [gr]	mb2 [gr]	ma1 [gr]	ma2 [gr]
F1,v2,r1	0,2	11,1	7,3602333	7,3598	20,5183333	20,504967
F1,v2,r2	0,2	11,1	7,5685667	7,5681266	20,4795667	20,472567
F1,v2,r3	0,2	11,1	7,5578333	7,5574999	22,0710333	22,063567
F2,v2,r1	0,2	22,3	7,3901667	7,3895	20,9895	20,9774
F2,v2,r2	0,2	22,3	7,3655	7,3645667	20,2223333	20,212933
F2,v2,r3	0,2	22,3	7,6089	7,6088333	21,6267	21,601967
F3,v2,r1	0,2	33,4	7,541	7,5398333	20,7039667	20,691567
F3,v2,r2	0,2	33,4	7,5412	7,5401333	20,9455333	20,935967
F3,v2,r3	0,2	33,4	7,4509667	7,4499	20,43	20,415267
F4,v2,r1	0,2	44,5	7,3544667	7,3536667	20,8893333	20,876167
F4,v2,r2	0,2	44,5	7,3692	7,3674667	19,5851333	19,5708
F4,v2,r3	0,2	44,5	7,5628333	7,5615333	20,83	20,813733

Tabla 4.7 RESULTADOS OBTENIDOS EXPERIMENTALMENTE

VELOCIDAD = 0,4 m/s

Nombre del Ensayo	V [m/s]	Fn [N]	mb1 [gr]	mb2 [gr]	ma1 [gr]	ma2 [gr]
F1,v3,r1	0,4	11,1	7,4333333	7,4331667	19,6560333	19,648367
F1,v3,r2	0,4	11,1	7,5052333	7,5045	20,8959333	20,8864
F1,v3,r3	0,4	11,1	7,5542	7,5534	21,8976333	21,884367
F2,v3,r1	0,4	22,3	7,4333	7,4322	21,8695667	21,857133
F2,v3,r2	0,4	22,3	7,4201	7,4190333	19,5951333	19,5832
F2,v3,r3	0,4	22,3	7,3007	7,2999	20,2687667	20,2389
F3,v3,r1	0,4	33,4	7,5625667	7,5617333	20,2651	20,252
F3,v3,r2	0,4	33,4	7,4275333	7,4254667	21,129	21,094967
F3,v3,r3	0,4	33,4	7,5439	7,5429667	22,0446333	22,023933
F4,v3,r1	0,4	44,5	7,4688333	7,4673	20,3726667	20,342433
F4,v3,r2	0,4	44,5	7,3537	7,352	20,4423667	20,404967
F4,v3,r3	0,4	44,5	7,5387	7,5369333	20,6366	20,6057

Tabla 4.8. RESULTADOS OBTENIDOS EXPERIMENTALMENTE

VELOCIDAD = 0,5 m/s

Nombre del Ensayo	V [m/s]	Fn [N]	mb1 [gr]	mb2 [gr]	ma1 [gr]	ma2 [gr]
F1,v4,r1	0,5	11,1	7,3606	7,3589333	20,2211	20,2081
F1,v4,r2	0,5	11,1	7,3276	7,3265333	20,3232667	20,311633
F1,v4,r3	0,5	11,1	7,5268667	7,5265333	21,6824333	21,6746
F2,v4,r1	0,5	22,3	7,3813	7,3806	20,5860333	20,5593
F2,v4,r2	0,5	22,3	7,3821333	7,3812	20,4514	20,4215
F2,v4,r3	0,5	22,3	7,591	7,5899333	19,9849667	19,959467
F3,v4,r1	0,5	33,4	7,4436667	7,4419667	19,5819667	19,549667
F3,v4,r2	0,5	33,4	7,3533333	7,3520333	20,3411	20,314733
F3,v4,r3	0,5	33,4	7,4606667	7,4597	21,7395667	21,711267
F4,v4,r1	0,5	44,5	7,2848	7,2836667	20,6728	20,630167
F4,v4,r2	0,5	44,5	7,4245333	7,4229667	20,4071667	20,360167
F4,v4,r3	0,5	44,5	7,6113667	7,6088	20,5965	20,546833

4.1.2. Resultados calculados

Los resultados calculados se muestran en las tablas 4.9, 4.10, 4.11, 4.12 para bloques y anillos respectivamente

Tabla 4.9 Resultados calculados para los bloques recubiertos con cromo duro rango de carga normal constante $F_n = 11.1, 22.3, 33.4$ y 44.5 N

F_n [N]	V [m/s]	Nombre del	mB R1 [gr]	mB R2 [gr]	mB R3 [gr]	mB prom [gr]	VD [mm³]	TD [mm³/m]	k [mm³/N*m]
11,13	0,1	F1V1	0,0005	0,0003	0,000433	0,000411	0,0570988	7,561E-05	6,79648E-06
11,13	0,2	F1V2	0,000289	0,000269	0,000333	0,000297	0,0412785	7,399E-05	6,65093E-06
11,13	0,4	F1V3	0,000167	0,000733	0,0008	0,000567	0,0787037	0,0001042	9,36812E-06
11,13	0,5	F1V4	0,001667	0,001067	0,000333	0,001022	0,1419753	0,000188	1,68993E-05
22,25	0,1	F2V1	0,001233	0,001033	0,0002	0,000822	0,1141975	0,0001512	6,79648E-06
22,25	0,2	F2V2	0,000667	0,000933	6,67E-05	0,000556	0,0771605	0,0001022	4,59221E-06
22,25	0,4	F2V3	0,0011	0,001067	0,0008	0,000989	0,1373457	0,0001819	8,17414E-06
22,25	0,5	F2V4	0,0007	0,000933	0,001067	0,0009	0,125	0,0001655	7,43939E-06
33,38	0,1	F3V1	0,000767	0,000967	0,000533	0,000756	0,1049383	0,000139	4,16361E-06
33,38	0,2	F3V2	0,001167	0,001067	0,001067	0,0011	0,1527778	0,0002023	6,06172E-06
33,38	0,4	F3V3	0,000833	0,002067	0,000933	0,001278	0,1774691	0,000235	7,0414E-06
33,38	0,5	F3V4	0,0017	0,0013	0,000967	0,001322	0,183642	0,0002432	7,28631E-06
44,5	0,1	F4V1	0,000767	0,001763	0,0007	0,001077	0,149537	0,000198	4,44986E-06
44,5	0,2	F4V2	0,0008	0,001733	0,0013	0,001278	0,1774691	0,000235	5,28105E-06
44,5	0,4	F4V3	0,001533	0,0017	0,001767	0,001667	0,2314815	0,0003065	6,88832E-06
44,5	0,5	F4V4	0,001133	0,001567	0,002567	0,001756	0,2438272	0,0003229	7,2557E-06

Tabla 4.10 Resultados calculados para los anillos de AISI D 2 desgastados por los bloques recubiertos con cromo duro, rango de carga normal constante $F_n = 11.1, 22.3, 33.4$ y 44.5

V [m/s]	F_n [N]	Nombre del Ensayo	mA R1 [gr]	mA R2 [gr]	mA R3 [gr]	mA prom [gr]	VD [mm ³]	TD [mm ³ /m]	k [mm ³ /N*m]
0,1	11,13	F1V1	0,002867	0,005133	0,0108667	0,006289	0,8734568	0,0015823	0,000142234
0,1	22,25	F2V1	0,011033	0,014033	0,0140667	0,013044	1,8117284	0,0032821	0,000147511
0,1	33,38	F3V1	0,014897	0,018367	0,0155667	0,016277	2,2606482	0,0040954	0,000122708
0,1	44,5	F4V1	0,012967	0,0222	0,0189667	0,018044	2,5061728	0,0045402	0,000102026
0,2	11,13	F1V2	0,013367	0,007	0,0074667	0,009278	1,2885802	0,0023344	0,000209832
0,2	22,25	F2V2	0,0121	0,0094	0,0247333	0,015411	2,1404321	0,0038776	0,000174274
0,2	33,38	F3V2	0,0124	0,009567	0,0147333	0,012233	1,6990741	0,003078	9,22257E-05
0,2	44,5	F4V2	0,013167	0,014333	0,0162667	0,014589	2,0262346	0,0036707	8,2488E-05
0,4	11,13	F1V3	0,007667	0,009533	0,0132667	0,010156	1,4104938	0,0025552	0,000229685
0,4	22,25	F2V3	0,012433	0,011933	0,0298667	0,018078	2,5108025	0,0045486	0,000204429
0,4	33,38	F3V3	0,0131	0,034033	0,0207	0,022611	3,1404321	0,0056892	0,000170463
0,4	44,5	F4V3	0,030233	0,0374	0,0309	0,032844	4,5617284	0,008264	0,000185708
0,5	11,13	F1V4	0,013	0,011633	0,0078333	0,010822	1,5030864	0,002723	0,000244762
0,5	22,25	F2V4	0,026733	0,0299	0,0255	0,027378	3,8024691	0,0068885	0,000309597
0,5	33,38	F3V4	0,0323	0,026367	0,0283	0,028989	4,0262346	0,0072939	0,000218544
0,5	44,5	F4V4	0,042633	0,047	0,0496667	0,046433	6,4490741	0,0116831	0,000262542

Tabla 4.11 Resultados calculados para los bloques recubiertos con cromo duro rango de velocidades constantes V = 0.1, 0.2, 0.4 y 0.5 m/s

V [m/s]	Fn [N]	Nombre del	mB R1 [gr]	mB R2 [gr]	mB R3 [gr]	mB prom [gr]	VD [mm ³]	TD [mm ³ /m]	k [mm ³ /N*m]
0,1	11,1	F1V1	0,0005	0,0003	0,0004333	0,0004111	0,0570988	7,561E-05	6,79648E-06
0,1	22,3	F2V1	0,001233	0,0010333	0,0002	0,0008222	0,1141975	0,0001512	6,79648E-06
0,1	33,4	F3V1	0,000767	0,0009667	0,0005333	0,0007556	0,1049383	0,000139	4,16361E-06
0,1	44,5	F4V1	0,000767	0,0017633	0,0007	0,0010767	0,149537	0,000198	4,44986E-06
0,2	11,1	F1V2	0,000289	0,0002688	0,0003335	0,0002972	0,0412785	7,399E-05	6,65093E-06
0,2	22,3	F2V2	0,000667	0,0009333	6,667E-05	0,0005556	0,0771605	0,0001022	4,59221E-06
0,2	33,4	F3V2	0,001167	0,0010667	0,0010667	0,0011	0,1527778	0,0002023	6,06172E-06
0,2	44,5	F4V2	0,0008	0,0017333	0,0013	0,0012778	0,1774691	0,000235	5,28105E-06
0,4	11,1	F1V3	0,000167	0,0007333	0,0008	0,0005667	0,0787037	0,0001042	9,36812E-06
0,4	22,3	F2V3	0,0011	0,0010667	0,0008	0,0009889	0,1373457	0,0001819	8,17414E-06
0,4	33,4	F3V3	0,000833	0,0020667	0,0009333	0,0012778	0,1774691	0,000235	7,0414E-06
0,4	44,5	F4V3	0,001533	0,0017	0,0017667	0,0016667	0,2314815	0,0003065	6,88832E-06
0,5	11,1	F1V4	0,001667	0,0010667	0,0003333	0,0010222	0,1419753	0,000188	1,68993E-05
0,5	22,3	F2V4	0,0007	0,0009333	0,0010667	0,0009	0,125	0,0001655	7,43939E-06
0,5	33,4	F3V4	0,0017	0,0013	0,0009667	0,0013222	0,183642	0,0002432	7,28631E-06
0,5	44,5	F4V4	0,001133	0,0015667	0,0025667	0,0017556	0,2438272	0,0003229	7,2557E-06

Tabla 4.12 Resultados calculados para los anillos de AISI D 2 desgastados por los bloques recubiertos con cromo duro, rango de carga normal constante $F_n = 11.1, 22.3, 33.4$ y 44.5 N

V [m/s]	F_n [N]	Nombre del Ensayo	mA R1 [gr]	mA R2 [gr]	mA R3 [gr]	mA prom [gr]	VD [mm ³]	TD [mm ³ /m]	k [mm ³ /N*m]
0,1	11,13	F1V1	0,00286667	0,0051333	0,0108667	0,0062889	0,87345679	0,00158235	0,000142234
0,1	22,25	F2V1	0,01103333	0,0140333	0,0140667	0,0130444	1,8117284	0,00328212	0,000147511
0,1	33,38	F3V1	0,01489667	0,0183667	0,0155667	0,0162767	2,26064816	0,00409538	0,000122708
0,1	44,5	F4V1	0,01296667	0,0222	0,0189667	0,0180444	2,50617284	0,00454017	0,000102026
0,2	11,13	F1V2	0,01336667	0,007	0,0074667	0,0092778	1,28858025	0,00233438	0,000209832
0,2	22,25	F2V2	0,0121	0,0094	0,0247333	0,0154111	2,1404321	0,00387759	0,000174274
0,2	33,38	F3V2	0,0124	0,0095667	0,0147333	0,0122333	1,69907407	0,00307803	9,22257E-05
0,2	44,5	F4V2	0,01316667	0,0143333	0,0162667	0,0145889	2,02623457	0,00367071	8,2488E-05
0,4	11,13	F1V3	0,00766667	0,0095333	0,0132667	0,0101556	1,41049383	0,00255524	0,000229685
0,4	22,25	F2V3	0,01243333	0,0119333	0,0298667	0,0180778	2,51080247	0,00454856	0,000204429
0,4	33,38	F3V3	0,0131	0,0340333	0,0207	0,0226111	3,1404321	0,00568919	0,000170463
0,4	44,5	F4V3	0,03023333	0,0374	0,0309	0,0328444	4,5617284	0,008264	0,000185708
0,5	11,13	F1V4	0,013	0,0116333	0,0078333	0,0108222	1,50308642	0,00272298	0,000244762
0,5	22,25	F2V4	0,02673333	0,0299	0,0255	0,0273778	3,80246914	0,00688853	0,000309597
0,5	33,38	F3V4	0,0323	0,0263667	0,0283	0,0289889	4,02623457	0,0072939	0,000218544
0,5	44,5	F4V4	0,04263333	0,047	0,0496667	0,0464333	6,44907407	0,01168311	0,000262542

4.2 ANALISIS DE RESULTADOS

4.2.1. Efecto de la velocidad de deslizamiento sobre el coeficiente de fricción

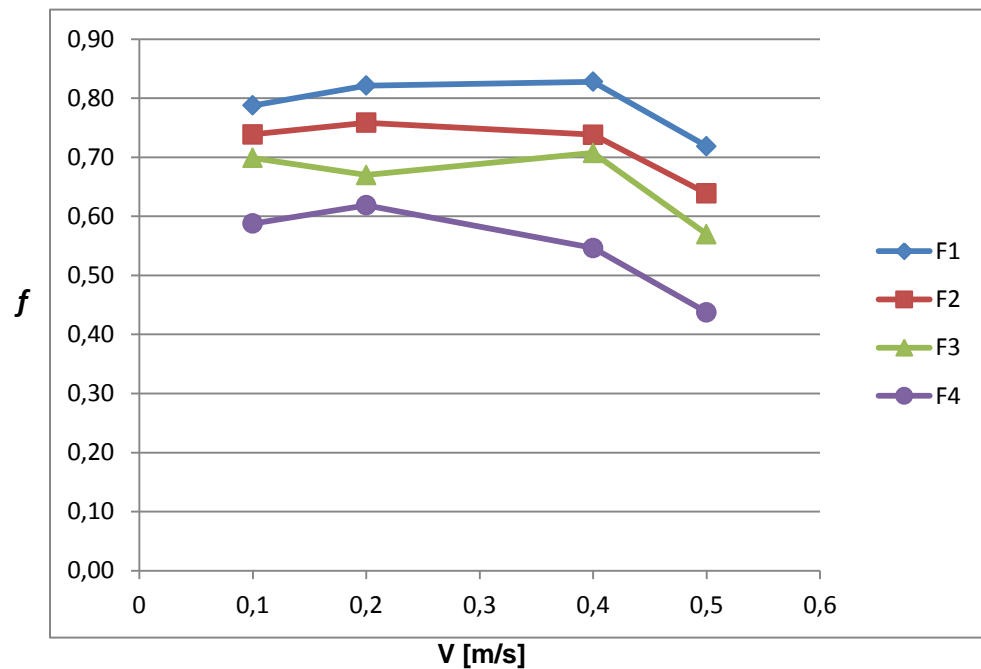


Figura 4.1 Grafica de coeficiente de fricción promedio f contra velocidad de deslizamiento V

En la figura 4.1 se puede observar el efecto que tiene la velocidad de deslizamiento sobre el coeficiente de fricción promedio para las diferentes categorías de carga aplicadas, donde se tiene que para la carga más baja de 11.1N y la velocidad más baja de 0.1 m/s, se obtiene el valor más grande de 0.7877 en el coeficiente de fricción promedio f , mientras que el valor más bajo del coeficiente de fricción promedio de 0.4375 se obtiene para la condición más extrema, es decir, para la carga más alta de 44.5 N y la velocidad más alta de 0.5 m/s. No se observa una tendencia clara para todo el rango de velocidades para cada categoría de carga constante, es decir, no se observa un aumento o disminución continuos en el coeficiente de fricción promedio para ninguna categoría de carga constante al variar la velocidad de

deslizamiento. Para el primer tramo de la gráfica que corresponde a las velocidades de 0.1 m/s a 0.2 m/s se observa un aumento en el coeficiente de fricción promedio para las cargas de 11.1 N, 22.3 N y 44.5 N, no así para la carga de 33.4 N donde más bien hay una disminución en el coeficiente de fricción promedio.

Para la carga más alta de 44.5 N el coeficiente de fricción promedio se incrementa desde un valor de 0.5878 para la velocidad de 0.1 m/s hasta 0.6186 para la velocidad de 0.2 m/s representando un aumento del 5.24% en el coeficiente de fricción promedio respecto al valor inicial. Para la carga de 22.3 N el coeficiente de fricción crece desde 0.7387 para la velocidad de 0.1 m/s hasta 0.7585 para la velocidad de 0.2 m/s representando un aumento del 2,68% respecto al valor inicial. Para la carga de 11.1 N el coeficiente de fricción crece desde 0.7877 para la velocidad de 0.1 m/s hasta 0.8212 para la velocidad de 0.2 m/s representando un aumento del 4.25% en el coeficiente de fricción promedio, mientras que para la carga de 33.4N se obtuvo una disminución para el coeficiente de fricción promedio desde 0.6987 para la velocidad de 0.1 m/s hasta 0.67 para la velocidad de 0.2 m/s representando una disminución del 4.11%.

Para el siguiente tramo que va desde la velocidad de 0.2 m/s hasta 0.4 m/s se observa que la única categoría de carga que mantiene la misma tendencia que en el tramo anterior es la carga menor de 11.1 N mientras que el resto de las categorías de cargas cambian su tendencia para el tramo de velocidades da 0.2 m/s a 0.4 m/s en comparación al tramo anterior de velocidades. En el caso de la carga de 11.1 N la tendencia es a seguir aumentando desde 0.8212 para la velocidad de 0.2 m/s hasta 0,8277 para la velocidad de 0.4 m/s aunque en esta ocasión el aumento es solo del 0.79%, es decir, que se mantuvo casi constante con un pequeño incremento. Otra categoría de carga que también sufrió un incremento en el coeficiente de fricción promedio es la carga de 33.4 N y para esta carga el incremento del

coeficiente de fricción fue mayor que para la carga de 11.1 N. La carga de 33.4 N incremento el valor del coeficiente de fricción desde 0.67 hasta 0.7073 representando un incremento del 5.57%. Por su parte las cargas de 22.3 N y 44.5 N sufrieron una disminución en el coeficiente de fricción promedio desde un valor de 0.7585 a 0.7380 para la carga de 22.3 N y desde 0.6186 hasta 0.5464 para la carga de 44.5 N.

Para el último tramo comprendido por las velocidades de 0.4 m/s a 0.5 m/s es notable el comportamiento similar para todas las categorías de cargas de disminuir el valor del coeficiente de fricción promedio, para las categorías de carga constantes de 11.1 N, 22.3 N, 33.4 N y 44.5 N la disminución del coeficiente de fricción promedio van desde 0.8277 hasta 0.7185, desde 0.7381 hasta 0.6387, desde 0.7073 hasta 0.5697 y desde 0.5464 hasta 0.4375 respectivamente. Este comportamiento se explica de la siguiente manera, a velocidades más altas se incrementa la formación de óxido entre las superficies en contacto y al incrementarse la temperatura producto del incremento de la velocidad, se forma una película de óxido que actúa como un lubricante haciendo que disminuya el coeficiente de fricción (Bisson, E.E. et al 1955).

4.2.2. Efecto de la carga aplicada sobre el coeficiente de fricción

En la figura 4.2 se observa el efecto de la carga aplicada sobre el coeficiente de fricción promedio para los distintos valores de velocidad de deslizamiento, en dicha grafica se observa claramente como decrece el coeficiente de fricción al aumentar la carga para todas las categorías de velocidad de deslizamiento constantes con tendencias lineales en algunos casos. Para la carga más baja de 11.1 N se presentan los coeficientes de fricción promedio más altos para cada una de las categorías de velocidad constantes, siendo sus valores de 0.7877, 0.8212, 0.8277 y 0.7185 para las velocidades de 0.1 m/s, 0.2 m/s, 0.4 m/s y 0.5 m/s respectivamente,

disminuyendo paulatinamente estos valores conforme aumenta la carga hasta los valores más bajos de 0.5878, 0.6186, 0.5464 y 0.4375 para las velocidades de 0.1 m/s, 0.2 m/s, 0.4 m/s y 0.5 m/s respectivamente para la carga más alta de 44.5 N.

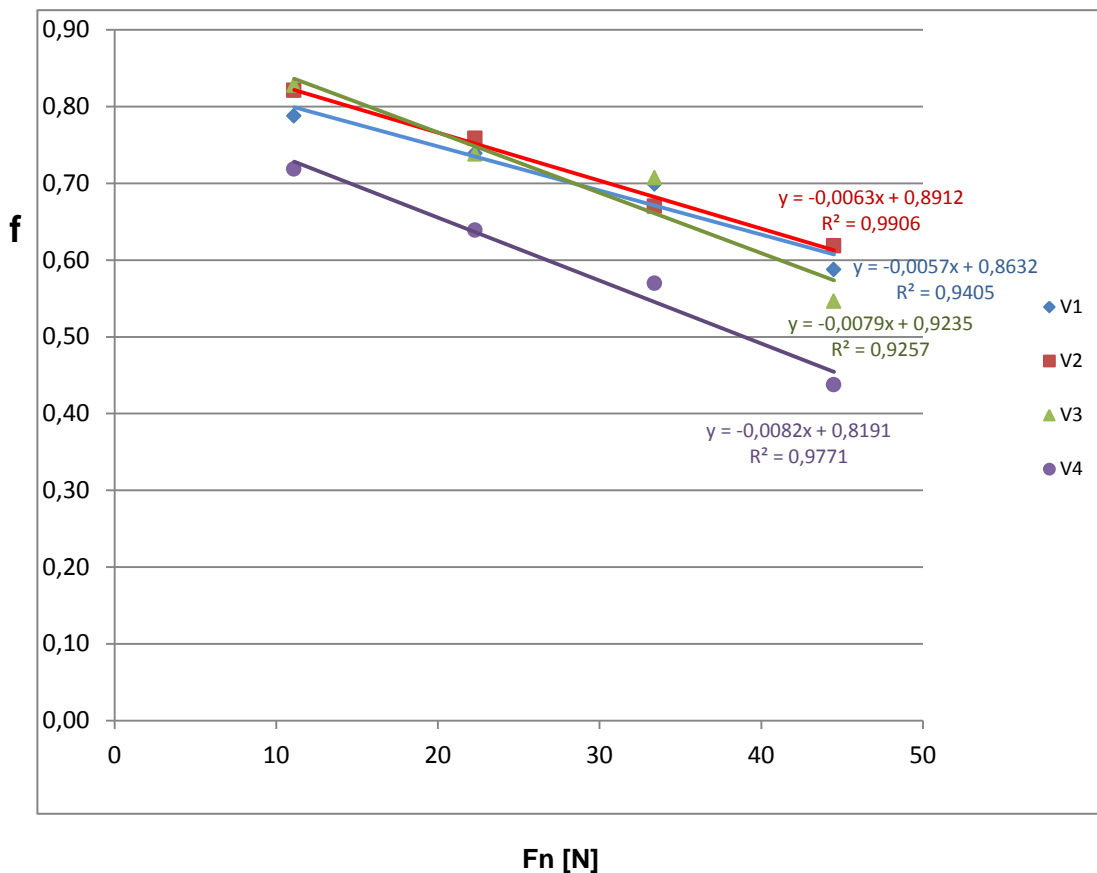
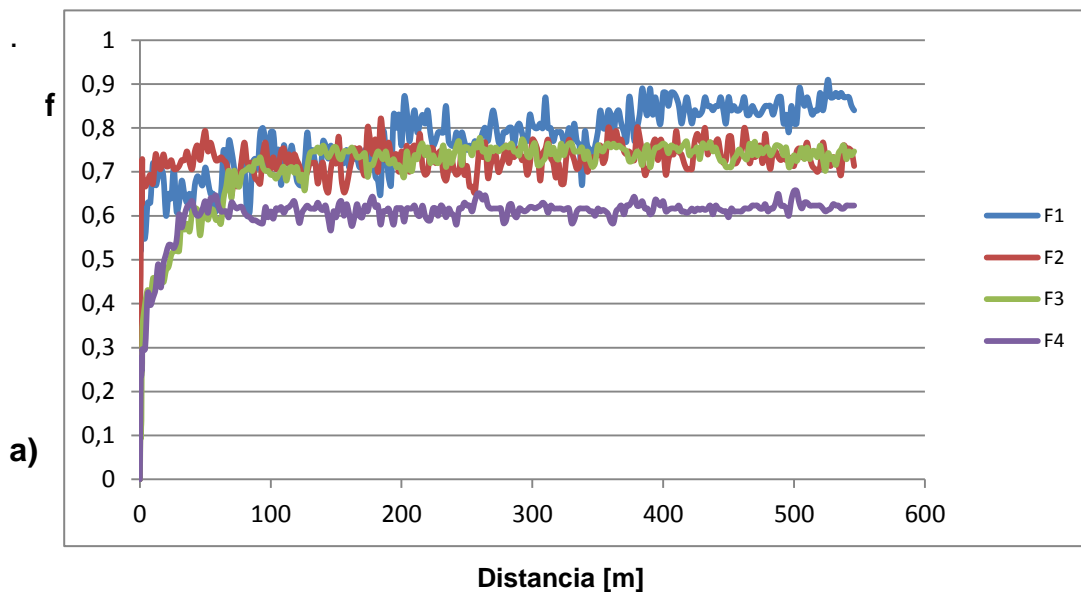


Figura 4.2 Coeficiente de fricción promedio f contra carga normal aplicada Fn

Todos los valores de coeficiente de fricción promedio para la mayor velocidad constante de 0.5 m/s a las diferentes categorías de cargas aplicadas son los valores obtenidos más bajos para todos los ensayos, debido posiblemente que al aumentar la velocidad de deslizamiento, aumenta la temperatura en la superficie la cual reduce la resistencia al corte del material, lo cual facilita la ruptura de las uniones adhesivas entre las superficies Kennard (1978).

En la figura 4.3 a) se observa el desarrollo del coeficiente de fricción respecto a la distancia recorrida para la velocidad de 0,1 m/s y las diferentes categorías de carga aplicada donde se evidencia que a la mayor carga se obtiene los menores valores de coeficiente de fricción para toda la distancia recorrida, mientras que a la menor carga (condición favorable) la gráfica de fricción está por encima del resto de las categorías de carga, este comportamiento, como ya se dijo anteriormente, se debe a que al aumentar la carga, la temperatura aumenta como se puede observar en la gráfica de la figura 4.4 b) de la temperatura contra la distancia. Dicho aumento de temperatura disminuye el esfuerzo cortante del material, facilitando la ruptura de las uniones adhesivas como lo establece Kennard (1978) favoreciendo además la formación de óxido el cual actúa como lubricante disminuyendo el coeficiente de fricción.



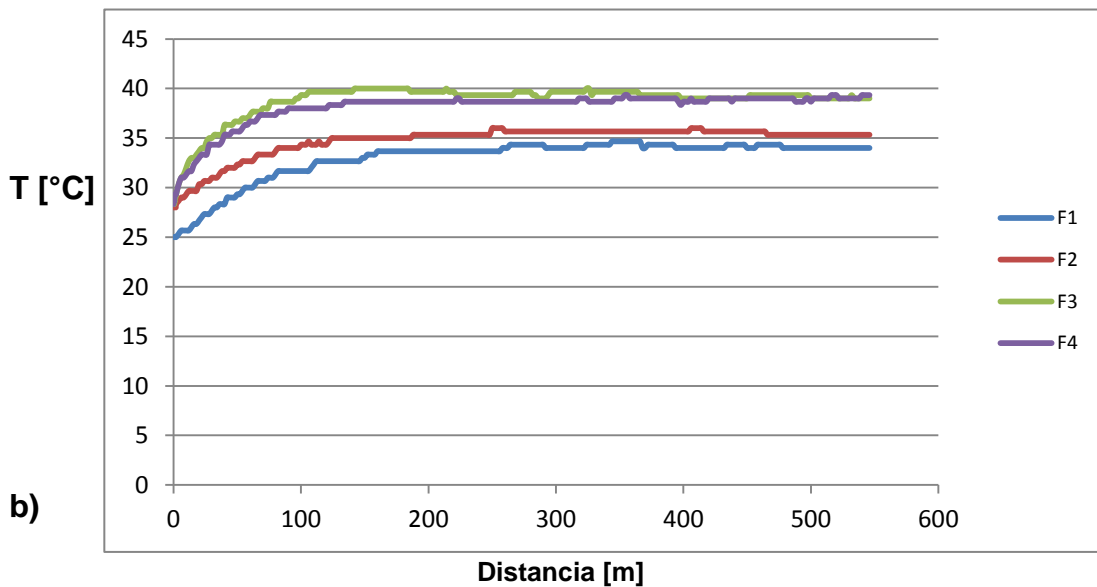


Figura 4.3: a) Coeficiente de fricción promedio contra distancia deslizada para la categoría de 0.1 m/s de velocidad de deslizamiento. b) Temperatura promedio contra distancia deslizada para la categoría de 0.1 m/s de velocidad de deslizamiento.

La formación de una película de óxido se debe a que los ensayos se realizan al aire libre donde hay presencia de oxígeno, de hierro proveniente del material del anillo el cual es un acero AISI D-2 y de la generación de calor la cual se evidencia en un aumento de la temperatura.

Para la figura 4.4 de coeficiente de fricción y temperatura contra la distancia deslizada para la máxima categoría de velocidad de 0.5 m/s se observa nuevamente el mismo comportamiento que a la mayor carga (condición desfavorable) se obtiene los menores valores de coeficiente de fricción para toda la distancia recorrida, mientras que a la menor carga la gráfica de fricción está por encima del resto de las categorías de carga. También se observa al comparar las gráficas de la temperatura contra la distancia de las figuras 4.4 y 4.5 que las temperaturas para la categoría de velocidad más baja de 0.1 m/s la temperatura tiende a estabilizarse a partir de los 150 m de distancia deslizada a partir de la cual se obtiene poco o

ningún aumento en la temperatura, contrario a lo que ocurre a la máxima velocidad de 0.5 m/s para la cual la temperatura siempre aumenta con la distancia deslizada para cada categoría de carga aplicada verificándose el efecto de la velocidad sobre el aumento de la temperatura.

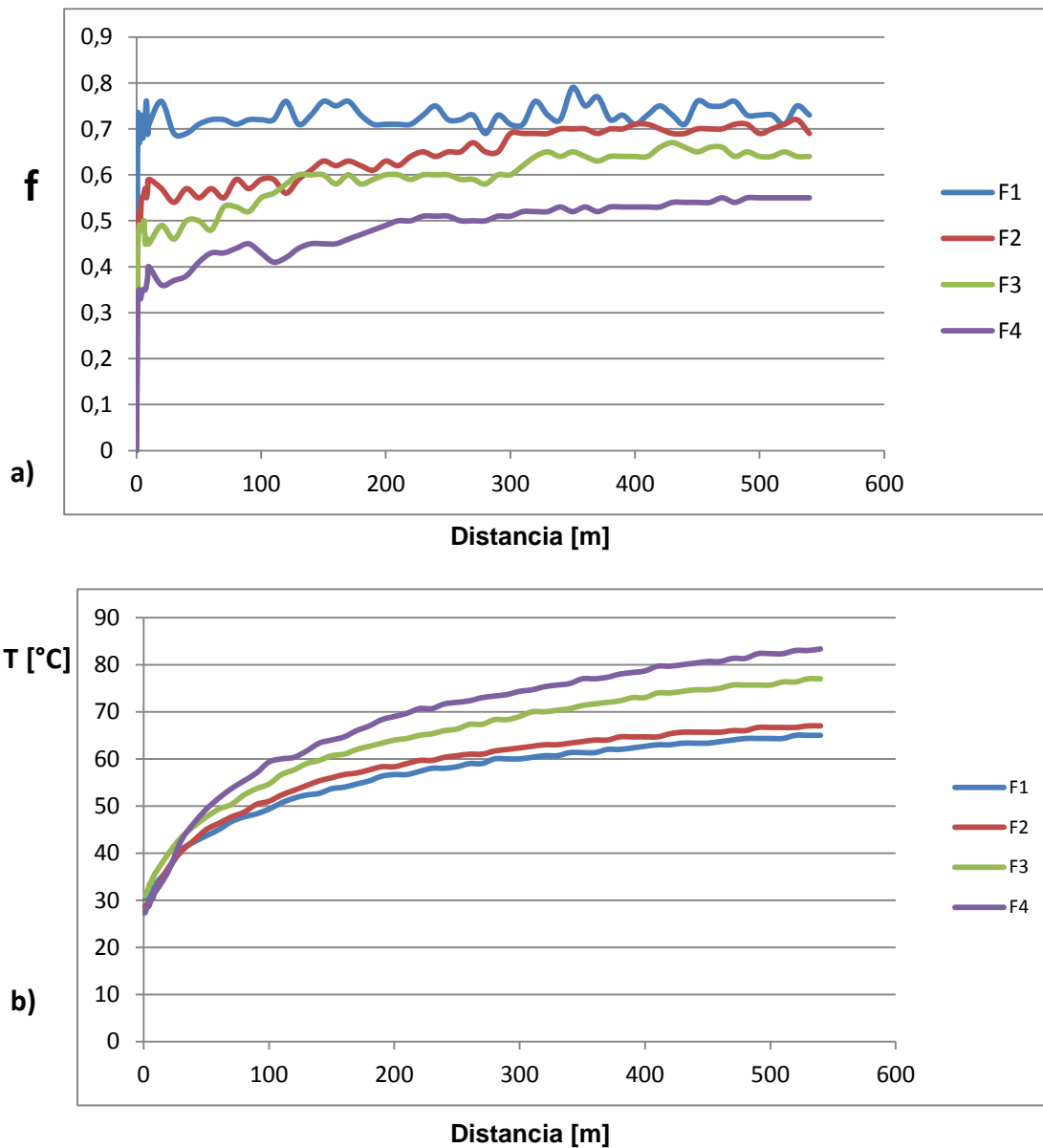
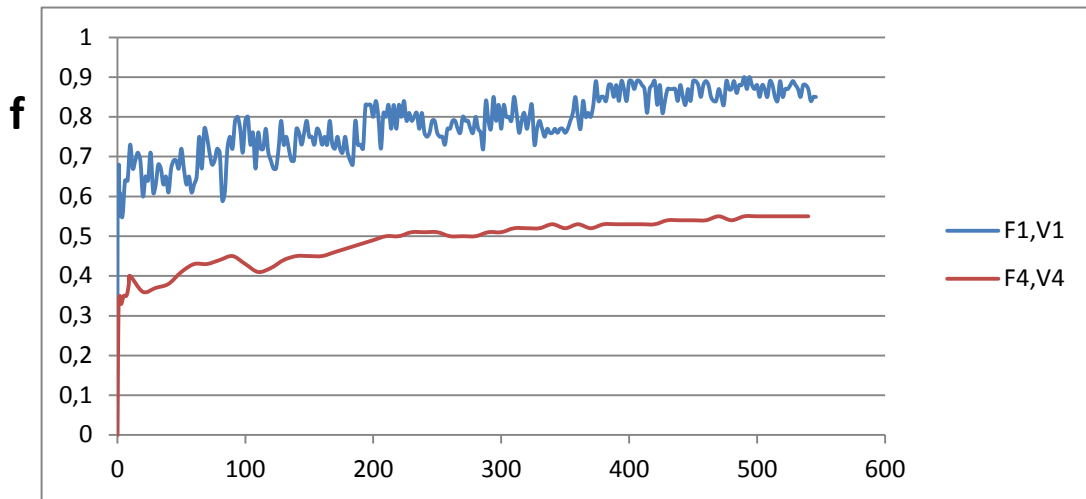


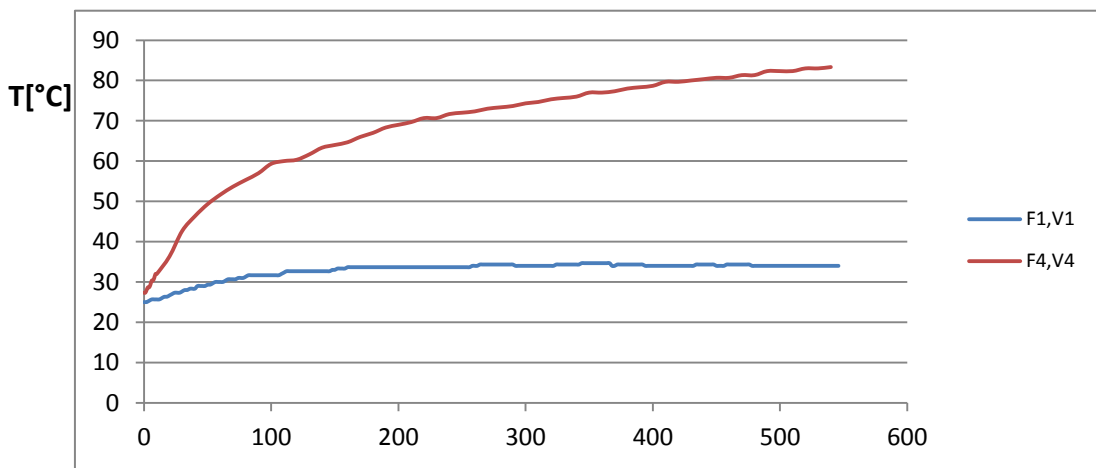
Figura 4.4: a) Coeficiente de fricción promedio contra distancia deslizada para la categoría de 0.5 m/s de velocidad de deslizamiento
 b) Temperatura promedio contra distancia deslizada para la categoría de 0.5 m/s de velocidad de deslizamiento.

Adicionalmente se puede observar de la comparación de las gráficas de coeficiente de fricción de la figura 4.4 y 4.5 que para la categoría de velocidad más baja de 0.1 m/s el coeficiente de fricción fluctúa mucho a lo largo de la distancia deslizada en contraste con la categoría de velocidad más alta de 0.5 m/s donde dicha fluctuación es mucho menor, estas fluctuaciones del coeficiente de fricción a la velocidad de 0.1 m/s pueden ser producidas por partículas de desgaste atrapadas entre las superficies deslizando y a su vez estas partículas contribuyen a un mayor coeficiente de fricción.

En la figura 4.5 se tiene la comparación del coeficiente de fricción y la temperatura contra la distancia deslizada para la condición favorable de carga de 11.1 N y velocidad de 0.1 m/s (F1,V1) y la condición desfavorable de carga de 44.5 N y velocidad de 0.5 m/s (F4,V4) en la cual podemos apreciar la gran discrepancia en el comportamiento tanto del coeficiente de fricción como de la temperatura para las dos condiciones más extremas y se puede ver claramente el efecto de la temperatura sobre el comportamiento del coeficiente de fricción a lo largo de toda la distancia deslizada. Aquí vemos claramente que un aumento de la temperatura debido al aumento de la velocidad y la carga propicia la estabilización del coeficiente de fricción al generarse una capa de óxido protectora que actúa como lubricante produciendo además un menor coeficiente de fricción como se explicó anteriormente. La presencia de dicha capa de óxido se verifica en la microscopia como más adelante se estudiara. La alta temperatura actúa como un catalizador para una gran variedad de mecanismos de oxidación. A medida que se eleva la temperatura, la reacción química del oxígeno con el metal aumenta.



a) Distancia [m]



b) Distancia [m]

Figura 4.5 a) Coeficiente de fricción promedio contra distancia deslizada para la condición favorable de carga de 11.1 N y velocidad de 0.1 m/s (F1,V1)

b) Temperatura promedio contra distancia deslizada para la condición desfavorable de carga de 44.5 N y velocidad de 0.5 m/s (F4,V4).

Puesto que el crecimiento del espesor de la película está limitado por el desgaste y la ruptura, cabría esperar que el coeficiente de fricción alcance un valor estable conforme se estabilice el espesor de película como se evidencia en la gráfica de fricción contra distancia de la figura 4.6 a) para la mayor carga aplicada Cubillan y Liccionis (2002). La inclinación de la pendiente en la curva de coeficiente de fricción contra distancia de deslizamiento f vs d puede ser mayor, sí las partículas de desgaste

formadas por deformación de las asperezas y la fractura, son atrapadas entre las superficies deslizantes y los surcos formados.

Un detalle de la variación del coeficiente de fricción al inicio del ensayo para las condiciones también se puede observar en la figura 4.6 a). Estas fluctuaciones tan dispersas del coeficiente de fricción en los primeros 100 m metros de recorrido (ver figura 4.6), se debe a que en la etapa inicial las superficies hacen contacto en los picos y valles, deformándolos y produciendo un aumento en el área de contacto entre ellas lo cual es conocido como “running” o estado transitorio el cual se caracteriza por cambios muy significativos del coeficiente de fricción. Este comportamiento fue explicado por Tabor (1977) quien desarrolló la teoría de adhesión la cual establece que cuando dos superficies metálicas libres de lubricantes entran en contacto tienden a adherirse entre sí. (Duarte. C & Farfán. R, 2011).

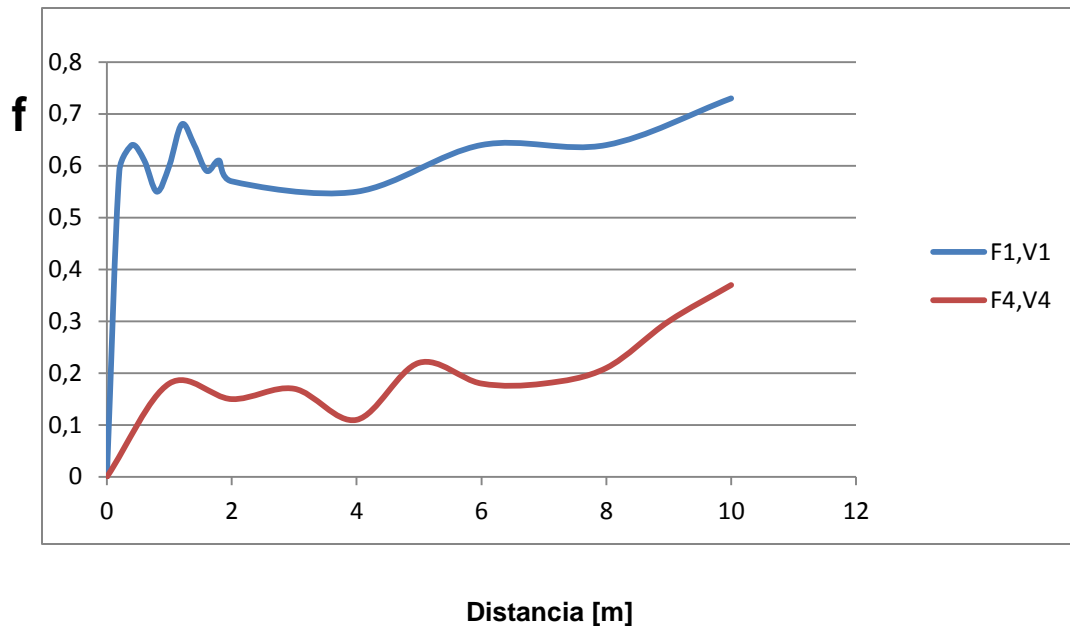


Figura 4.6: Coeficiente de fricción contra distancia deslizada para los 10 primeros metros de distancia deslizada para las condición favorable y desfavorable

En la figura 4.6 se observa el comportamiento del coeficiente de fricción para las condiciones extremas durante los primeros instantes del ensayo de desgaste por deslizamiento. Durante los primeros 10 metros se observa un aumento brusco del coeficiente de fricción, primeramente hasta un valor máximo de 0.68 en el coeficiente de fricción para la condición favorable y hasta un valor máximo de 0.18 en el coeficiente de fricción para la condición desfavorable durante los primeros 2 metros de distancia, esto tiene su explicación en la teoría de adhesión propuesta por Tabor (1973) en la cual dos superficies metálicas en contacto tienden a adherirse en las minúsculas regiones donde los dos cuerpos se unen íntimamente, si las dos superficies están limpias, los átomos de ambas se atraen mutuamente y se produce una fuerte adhesión. Luego de los 2 metros hay una disminución en ambas graficas de coeficiente de fricción hasta un valor de 0.55 para la condición favorable y hasta 0.11 ambos valores obtenidos a los 4 metros de distancia deslizada para luego empezar a incrementarse esos valores.

4.2.3. Efecto de la carga sobre la temperatura

Temperatura promedio vs carga aplicada

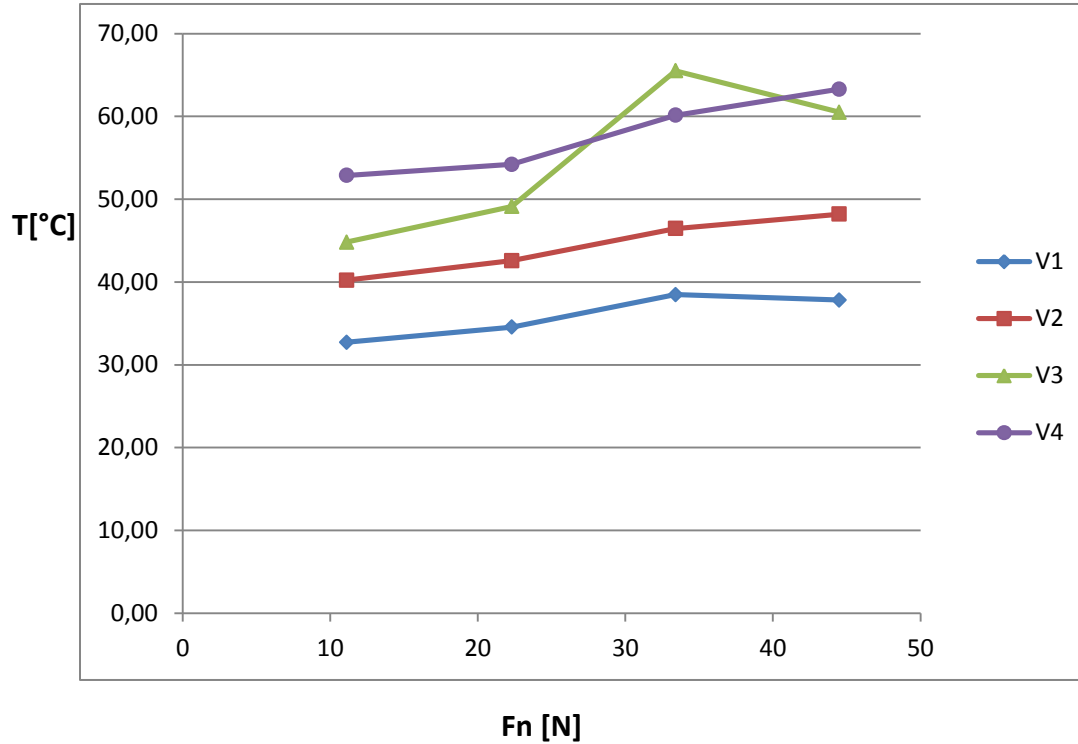


Figura 4.7: Grafica de temperatura promedio T contra carga aplicada Fn

En la figura 4.7 se puede apreciar el efecto de la carga sobre la temperatura de los bloques recubierto por cromo duro en el ensayo con el tribómetro máquina falex, donde se observa como los valores de temperatura promedio aumentan conforme aumenta la carga aplicada con excelente tendencia lineal para la velocidad de 0.2 m/s con un $R^2 = 0.9805$ y para la velocidad de 0.5 m/s con un $R^2 = 0.9505$, para la categoría de velocidad más baja de 0.1 m/s también se presenta un incremento de la temperatura al aumentar la carga. También se aprecia como al aumentar la carga, la temperatura para cada velocidad es mayor en orden creciente de velocidades, la única excepción se encuentra para la velocidad de 0.4 m/s a la carga de 33.4 N donde se obtiene el valor más alto de 65.5021°C para luego decrecer hasta un valor de 60.5021°C.

Los valores más bajos de temperatura promedio se presentaron a la menor carga de 11.1 N para las diferentes categorías de velocidad siendo esos valores de 32.707 °C, 40.2207 °C, 44.8059 °C y 52.8697 °C para las velocidades de 0.1 m/s, 0.2 m/s, 0.4 m/s y 0.5 m/s respectivamente, los cuales aumentan con tendencia lineal como ya se dijo anteriormente hasta sus valores máximos para cada velocidad a la máxima carga de 44.5 N siendo estos valores de 37.8150 °C, 48.1914 °C, 63.2864 °C para las velocidades de 0.1 m/s, 0.2 m/s y 0.5 m/s, a excepción de la velocidad de 0.4 m/s que como ya se dijo antes, alcanza su valor más grande de 65.5021 °C para la carga de 33.4 N

En general se establece que al aumentar la carga aumenta la temperatura promedio para cada categoría de velocidad de deslizamiento constante esto se debe a que un aumento de la carga se convertiría en una mayor energía friccional que se introduce al sistema. Esta energía tiene que ser disipada como calor o absorbida en la deformación y fractura de las capas superficiales; y si se mantiene la relación entre esas dos porciones de la energía se tendrá que a mayor energía friccional habrá mayor desgaste entre las superficies en contacto (Duarte. C & Farfán. R, 2011).

4.2.4. Efecto de la velocidad sobre la temperatura

Al aumentar la velocidad, aumenta la temperatura para todos los ensayos, como se puede observar en la gráfica de la temperatura promedio T contra velocidad de deslizamiento de la figura 4.8. También se aprecia que en todo el rango de velocidades los menores valores de temperatura promedio se obtienen para la menor carga de 11.1 N. Para el rango de velocidades entre 0.2 m/s y 0.4 m/s la carga de 33.4 N presenta su mayor incremento desde un valor de 46.4482 °C a la velocidad de 0.2 m/s hasta un valor de 65.5021°C para la velocidad de 0.4 m/s, para luego decrecer hasta 60.13°C para la carga de 44.5 N.

Del análisis se obtiene que la temperatura no solo aumenta con la carga sino que también aumenta con el incremento de la velocidad de deslizamiento, esto nos indica, como lo establecen Cubillan y Liccionis (2002) que no solo el desgaste ocurre por la acción de la fuerza aplicada sino también por la acción del calor de fricción, es decir, con la acción combinada de ambos.

Comparando el efecto que tienen sobre la temperatura la carga y la velocidad de deslizamiento en las gráficas de las figuras 4.8 y 4.9 se observa que el incremento de la temperatura es más sensible al aumento de la velocidad de operación que al aumento de la carga aplicada, por ejemplo, un incremento de la velocidad desde 0.1 m/s hasta 0.2 m/s para la carga de 11.1 N representa un aumento de la temperatura promedio desde 32.71°C hasta 40.22°C, mientras que un aumento de la carga desde 11.1 N hasta 22.3 N para la velocidad de 0.1 m/s representa un incremento de la temperatura promedio desde 32.7078°C hasta 34,55°C .

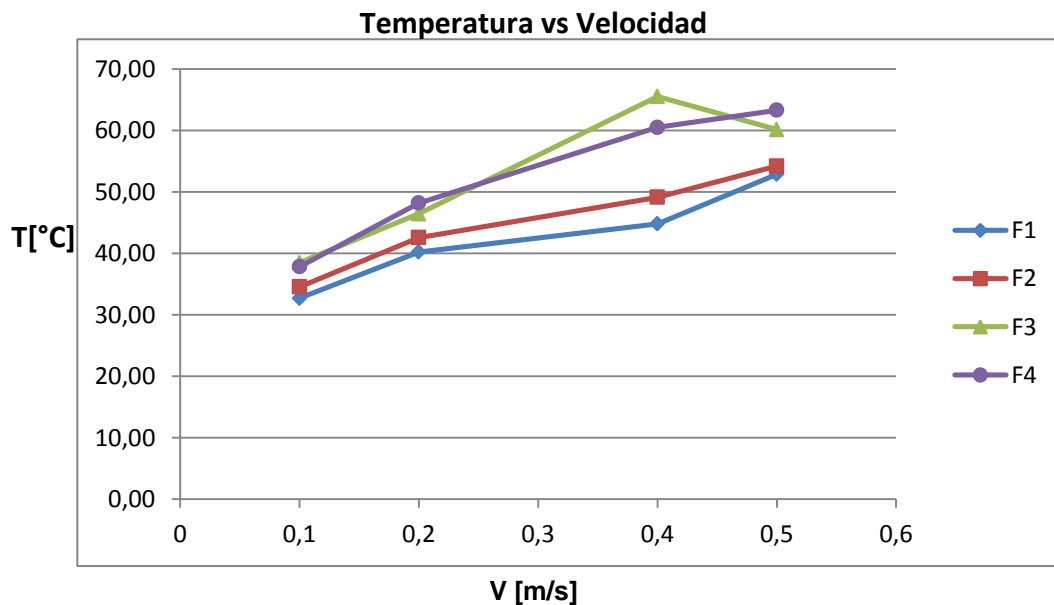


Figura 4.8: Grafica de temperatura promedio T del bloque contra velocidad de deslizamiento V

En general se observa que considerando las tendencias lineales de las figuras 4.7 y 4.8 se tienen que las variaciones de temperatura son mayores para el incremento de velocidad que para el incremento de carga, es decir, como observamos en dichas figuras, las pendientes de las rectas de tendencia de la figura 4.8 de temperatura promedio vs velocidad de deslizamiento son mucho mayores que las pendientes de las rectas de tendencia para la figura 4.7 de temperatura promedio vs carga aplicada

Como se mencionó en el análisis anterior; en el movimiento y el contacto se produce una cierta cantidad de calor que es preciso eliminar, y que no se reparte de igual forma entre los dos cuerpos en contacto, con el aumento de velocidad se llega a alcanzar con mayor rapidez el punto de fusión de uno de los metales en contacto, lo cual origina las micro soldaduras, sin embargo la misma disposición de las piezas en lo que respecta a su forma y el material contribuye a que el efecto de mayor velocidad contribuya con la mayor eliminación del calor Cubillan y Liccionis (2002).

4.2.5. Efecto de la carga sobre la tasa de desgaste del bloque

En la figura 4.9 se presenta la gráfica de barras de la tasa de desgaste promedio contra la carga aplicada, donde se observa la variación de la tasa de desgaste al variar la velocidad de deslizamiento para cada categoría de carga constante de los bloques recubiertos con cromo duro. Se puede apreciar como la tasa de desgaste se incrementa al aumentar la velocidad de deslizamiento, manteniendo la carga constante para todas las categorías de carga a excepción de la carga de 22.3 N en la cual para la menor velocidad de 0.1 m/s a dicha carga se sufre una mayor tasa de desgaste que a la siguiente velocidad de 0.2 m/s y de forma similar se obtiene un mayor tasa de desgaste para la velocidad de 0.4 m/s que para la mayor velocidad de 0.5 m/s para la carga de 22.3 N.

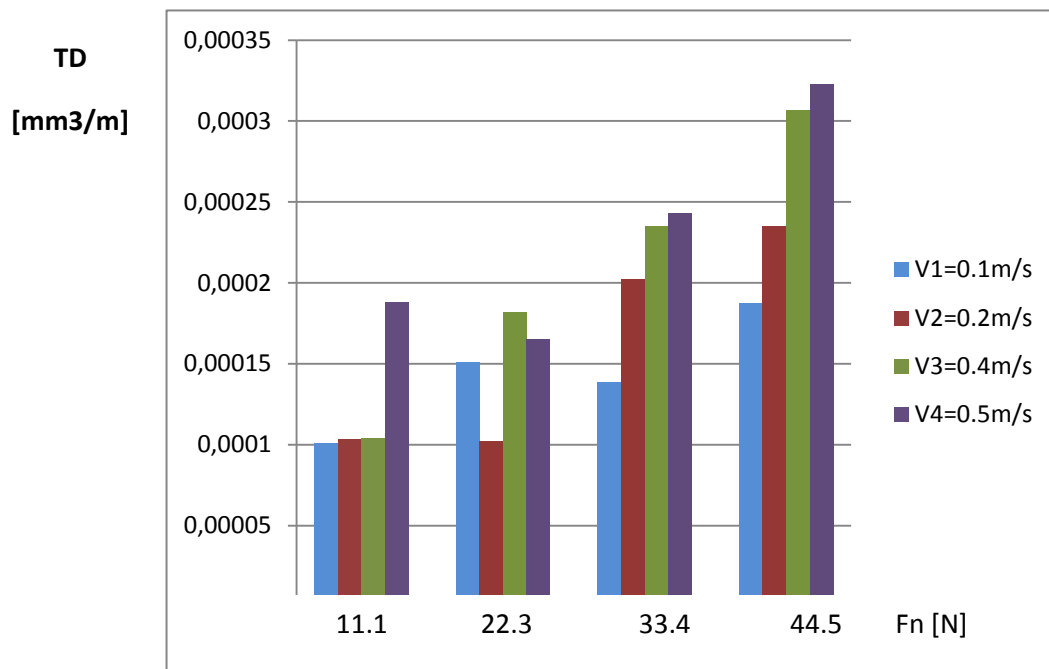


Figura 4.9: Tasa de desgaste de los bloques recubiertos con cromo duro contra carga aplicada.

De la figura 4.9 se observa que la condición que obtuvo menor tasa de desgaste, es decir, nuestra condición más favorable, fue para la menor carga de 11.1 N a la menor velocidad de 0.1 m/s dando un valor de $7.40E-05 \text{ mm}^3/\text{m}$ y la condición con mayor tasa de desgaste, es decir, nuestra condición más desfavorable, se obtuvo a la condición más extrema de máxima carga de 44.5 N y máxima velocidad de 0.5 m/s dando un valor de tasa de desgaste de $3.23E-04 \text{ mm}^3/\text{m}$

De la figura 4.9 también se observa que para la menor carga de 11.1 N la tasa de desgaste menor de $7.40E-05 \text{ mm}^3/\text{m}$ se obtiene a la menor velocidad de 0.1 m/s mientras la mayor tasa de desgaste para dicha categoría de carga es de $1.88E-04 \text{ mm}^3/\text{m}$ para la mayor velocidad de 0.5 m/s. Para la siguiente categoría de carga de 22.3 N la menor tasa de desgaste de $1.02E-04 \text{ mm}^3/\text{m}$ se obtiene para la velocidad de 0.2 m/s y la

mayor tasa de $1.82\text{E-}04 \text{ mm}^3/\text{m}$ para la velocidad de 0.4 m/s , para la categoría de carga constante de 33.4 N se evidencia un incremento paulatino de la tasa de desgaste promedio al aumentar la velocidad de deslizamiento desde un valor de $1.40\text{E-}04 \text{ mm}^3/\text{m}$ para la velocidad de 0.1 m/s hasta un valor de $2.43\text{E-}04 \text{ mm}^3/\text{m}$ para la velocidad de 0.5 m/s y para la categoría de carga mayor de 44.5 N también se evidencia un incremento paulatino de la tasa del desgaste con el aumento de la velocidad, este incremento se da desde una tasa de desgaste de $1.98\text{E-}04 \text{ mm}^3/\text{m}$ para la velocidad de 0.1 m/s hasta una tasa de $3.23\text{E-}04 \text{ mm}^3/\text{m}$ para la velocidad de 0.5 m/s

En la figura 4.10 se observa la tendencia lineal de la tasa de desgaste al aumentar la carga para cada una de las categorías de velocidad constante de deslizamiento a excepción de la categoría de velocidad más alta de 0.5 m/s en la cual la tasa de desgaste también tiende a aumentar conforme aumenta la carga.

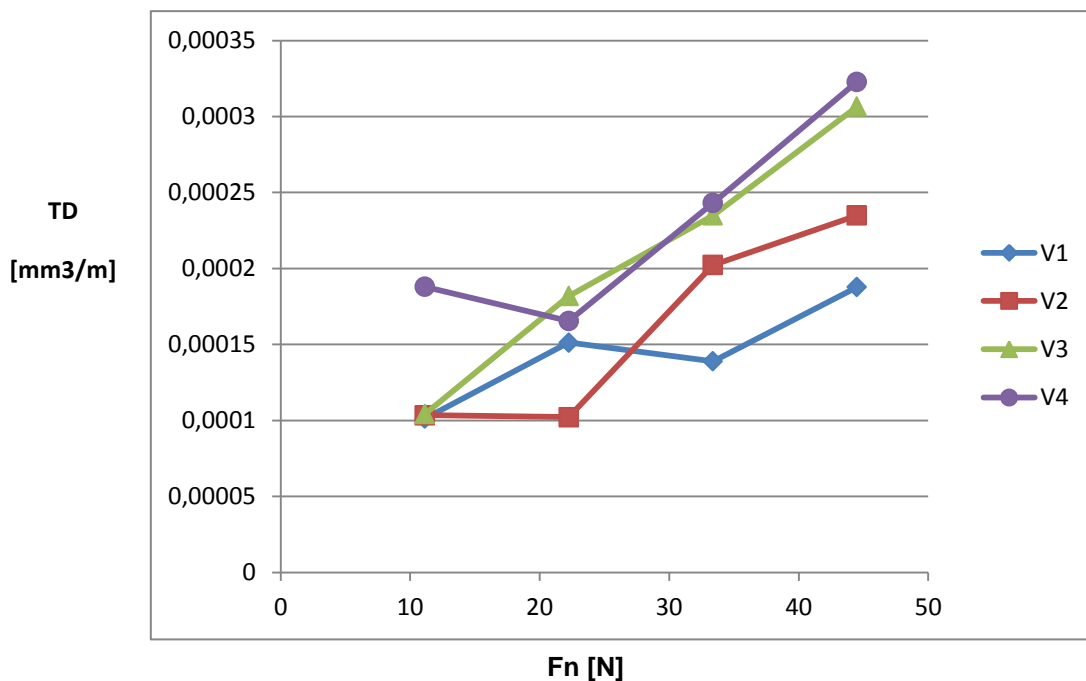


Figura 4.10: Tasa de desgaste del recubrimiento de cromo duro en función de la carga normal

También se observa en la figura 4.10 como el incremento de la tasa de desgaste con la carga aplicada es más pronunciado (mayor pendiente en las líneas de tendencia) para las dos velocidades intermedias de 0.2 m/s y 0.4 m/s respecto a las condiciones de velocidad más extremas de 0.1 m/s y 0.5 m/s. Para todos los intervalos de carga la tendencia es a aumentar cada vez más la tasa de desgaste al incrementarse la carga para todas las categorías de velocidad, a excepción de la máxima velocidad de 0.5 m/s la cual tiene una disminución de la tasa de desgaste desde un valor de $1.88E-04 \text{ mm}^3/\text{m}$ para la carga de 11.1 N hasta un valor de $1.65E-04 \text{ mm}^3/\text{m}$ para la carga de 22.3 N y a partir de ahí, la tendencia es a aumentar la tasa de desgaste conforme aumenta la carga aplicada para la velocidad de 0.5 m/s.

4.2.6. Efecto de la velocidad sobre la tasa de desgaste del bloque

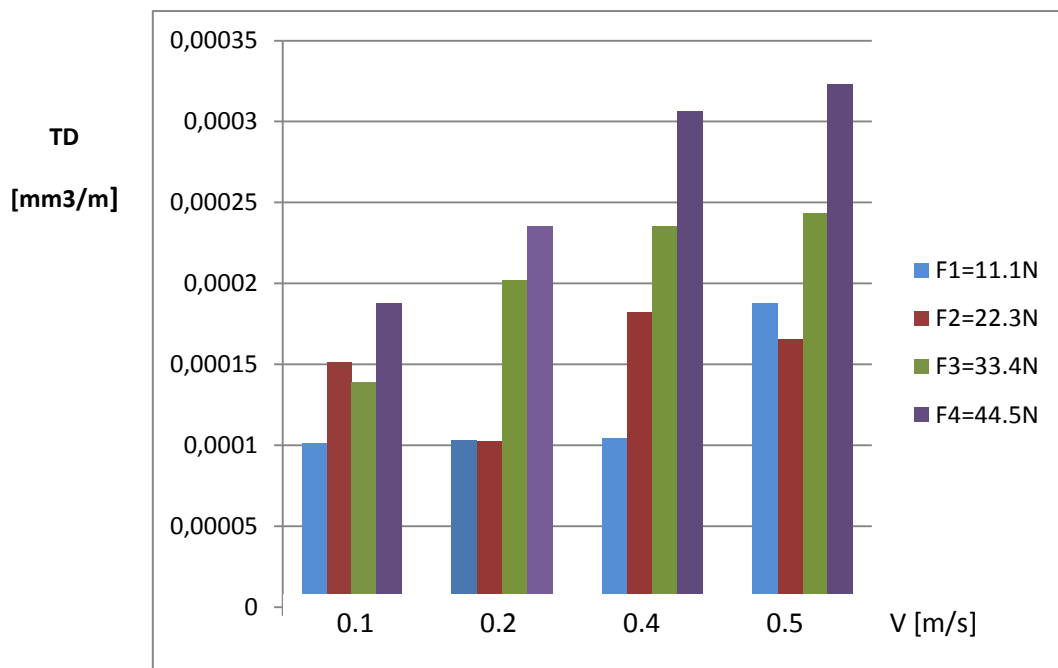


Figura 4.11: Tasa de desgaste del recubrimiento de cromo duro en función de la velocidad de deslizamiento

Para la carga de 44.5 N, el mismo En la figura 4.11 se presenta la tasa de desgaste promedio contra la velocidad de deslizamiento, donde se observa la variación de la tasa de desgaste al variar la carga para cada categoría de velocidad constante de los bloques recubiertos con cromo duro. Se puede apreciar como la tasa de desgaste se incrementa al aumentar la carga manteniendo la velocidad constante para todas las categorías de velocidad a excepción de la velocidades de 0.1 m/s y 0.4 m/s donde la tasa de desgaste promedio debería ser menor para la carga de 22.3 N que para la carga de 33.3 N para la velocidad de operación de 0.1 m/s y donde la tasa de desgaste debería ser mayor para la carga de 22.3 N que para la carga de 11.1 N para la máxima velocidad de operación de 0.5 m/s.

De la figura 4.11 también se observa que para la menor velocidad de 0.1 m/s la tasa de desgaste menor de $1.01E-04 \text{ mm}^3/\text{m}$ se obtiene a la menor carga de 11.1 N mientras la mayor tasa de desgaste para dicha categoría de velocidad es de $1.98E-04 \text{ mm}^3/\text{m}$ para la mayor carga de 44.5 N. Para la siguiente categoría de velocidad de 0.2 m/s la menor tasa de desgaste de $1.03E-04 \text{ mm}^3/\text{m}$ se obtiene para la carga de 22.3 N y la mayor tasa de $2.35E-04 \text{ mm}^3/\text{m}$ para la patrón lo vemos en la categoría de velocidad de 0.4 m/s aunque en esta ocasión la tasa de desgaste aumenta de forma lineal con un excelente factor de correlación de $R^2 = 0.9954$ al aumentar la carga en la que nuevamente la menor tasa de desgaste de $1.04E-04 \text{ mm}^3/\text{m}$ para la menor carga de 11.1 N y la mayor tasa de desgaste de $3.06E-04 \text{ mm}^3/\text{m}$ se obtiene para la carga más alta de 44.5 N. A diferencia de las tendencias anteriores de obtener la menor tasa de desgaste a la menor carga de 11.1 N para cada categoría de velocidad constante, para la velocidad más alta de 0.5 m/s se obtiene que la tasa de desgaste menor de $1.65E-04 \text{ mm}^3/\text{m}$ para la carga de 22.3 N, pero nuevamente la mayor tasa de desgaste de $3.23E-04 \text{ mm}^3/\text{m}$ se obtiene a la mayor carga de 44.5 N, la cual a su vez, como se dijo

anteriormente, es la mayor tasa de desgaste encontrada (condición desfavorable).

En la figura 4.12 se observa la tendencia a aumentar la tasa de desgaste promedio al aumentar la velocidad de operación a excepción de la categoría de carga de 22.3 N en la cual hay una disminución de la tasa de desgaste promedio desde un valor de $1.51\text{E-}04 \text{ mm}^3/\text{m}$ para la velocidad de 0.1 m/s hasta un valor de $1.02\text{E-}04 \text{ mm}^3/\text{m}$ para la velocidad de 0.2 m/s para luego aumentar hasta un valor de $1.82\text{E-}04 \text{ mm}^3/\text{m}$ a la velocidad de 0.4 m/s y posteriormente volver a disminuir hasta un valor de $1.65\text{E-}04 \text{ mm}^3/\text{m}$ para la máxima velocidad de 0.5 m/s el cual es el valor más pequeño de tasa de desgaste promedio para dicha velocidad. Si bien la tasa de desgaste aumenta al incrementar la velocidad de deslizamiento a excepción de la categoría de carga de 22.3 N en la cual no se obtiene un aumento significativo de la tasa de desgaste para la condición más alta de velocidad respecto a la velocidad más baja, siendo este aumento del solo un 9.5% en contraste con las demás categorías de carga constante en las que se obtuvo un incremento en la tasa de desgaste para la condición más alta de velocidad respecto a la más baja desde $7.40\text{E-}05 \text{ mm}^3/\text{m}$ hasta $1.88\text{E-}04 \text{ mm}^3/\text{m}$ representando un aumento en la tasa de desgaste de un 154.1% para la carga de 11.1 N, desde $1.39\text{E-}04 \text{ mm}^3/\text{m}$ hasta $2.43\text{E-}04 \text{ mm}^3/\text{m}$ representando un aumento del 75% para la carga de 33.4 N y desde $2.57\text{E-}04 \text{ mm}^3/\text{m}$ hasta $4.42 \text{ mm}^3/\text{m}$ representando un aumento del 71.9% para la máxima carga de 44.5 N.

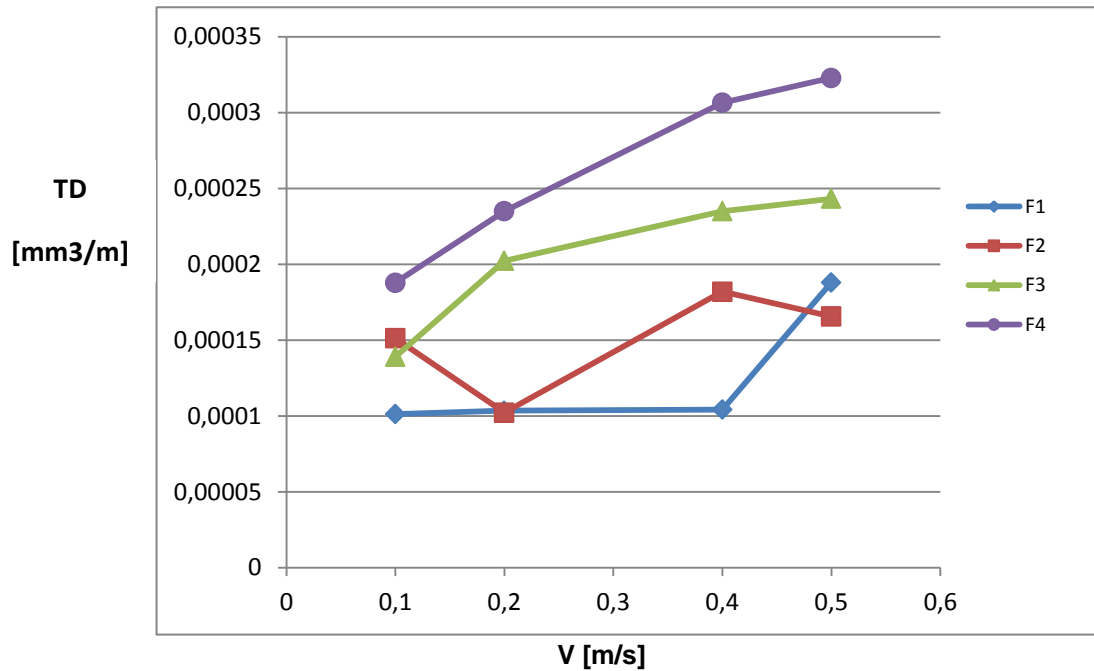
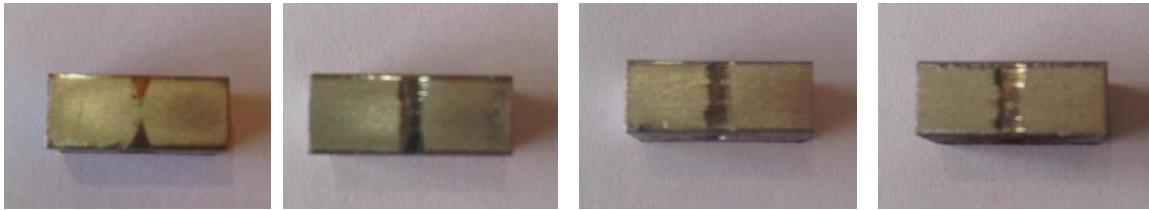


Figura 4.12: Tasa de desgaste contra velocidad de deslizamiento

En este mismo orden de ideas y haciendo el mismo análisis para la gráfica de la figura 4.10 se tiene un incremento de la tasa de desgaste de la condición de carga más pequeña de 11.1 N hasta la carga de 44.5 N desde $7.40E-05 \text{ mm}^3/\text{m}$ $2.35E-04 \text{ mm}^3/\text{m}$ representando un incremento del 153.8% para la velocidad de 0.1 m/s, desde $7.56E-05 \text{ mm}^3/\text{m}$ hasta $2.35E-04 \text{ mm}^3/\text{m}$ representando un incremento del 210.8% para la velocidad de 0.2 m/s, desde $1.04E-04 \text{ mm}^3/\text{m}$ hasta $3.06E-04 \text{ mm}^3/\text{m}$ para un aumento del 194.1% para la velocidad de 0.4 m/s y desde $1.88E-04 \text{ mm}^3/\text{m}$ hasta $3.23E-04 \text{ mm}^3/\text{m}$ para un incremento del 71.7% para la máxima velocidad. Las tendencias de crecimiento de la tasa de desgaste tienen mejor ajuste lineal para el incremento de carga que para el incremento de velocidad, evidenciando más aún que el incremento de la tasa de desgaste es más sensible al incrementar la carga que al incremento de velocidad, aunque este último parámetro también es influyente sobre la tasa de desgaste.

V1 = 0,1 m/s



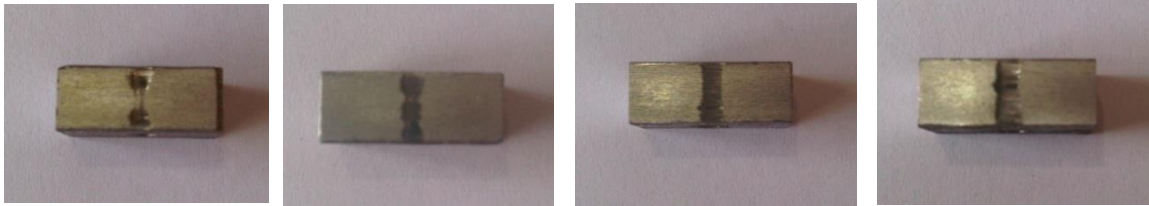
a) F1 = 11.1N

b) F2 = 22.3N

c) F3 = 33.4N

d) F4 = 44.5N

V2 = 0,2 m/s



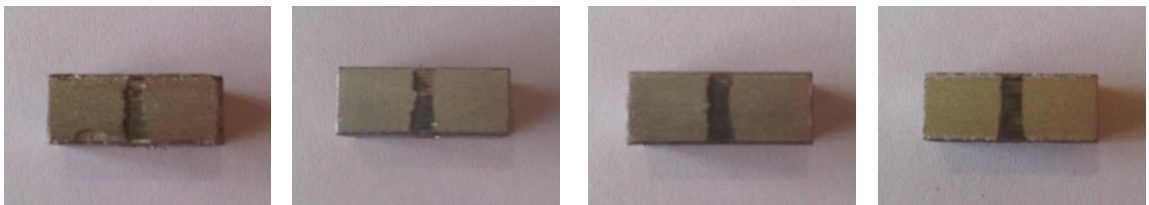
e) F1 = 11.1N

f) F2 = 22.3N

g) F3 = 33.4N

h) F4 = 44.5N

V3 = 0,4 m/s



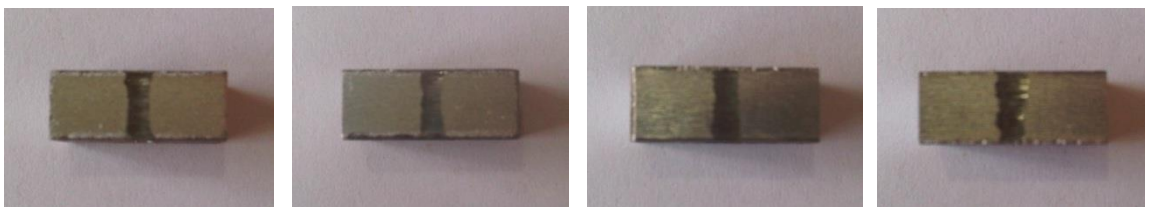
i) F1 = 11.1N

j) F2 = 22.3N

k) F3 = 33.4N

l) F4 = 44.5N

V4 = 0,5 m/s



m) F1 = 11.1N

n) F2 = 22.3N

ñ) F3 = 33.4N

o) F4 = 44.5N

Fig 4.13: Fotografías de la superficie desgastada de los bloques recubiertos con cromo duro para todas las categorías de carga y velocidad

Con la finalidad de visualizar el efecto de la carga normal en la resistencia al desgaste, se tomaron fotografías de la superficie de los bloques ensayados desde el nivel de carga menor (F1=11.1N) hasta la

mayor ($F_4=44.5\text{N}$) (Ver figura 4.13), manteniendo el valor constante de velocidad de deslizamiento ($V_1=0.1\text{m/s}$) en la primera fila de fotografías [a), b), c) y d)] donde se puede observar claramente el efecto del incremento de la carga sobre el espesor de la huella lo que indica una mayor tasa de desgaste a medida que se incrementa dicha carga. En la primera foto se muestra la huella del bloque que registró la menor tasa de desgaste de todos los ensayos para la carga de 11.1 N y velocidad de 0.1 m/s donde se evidencia que el tamaño de la misma el cual es el menor de todas las fotografías y siendo la huella más grande la correspondiente a la condición más extrema de carga y velocidad de 44.5 N y 0.5 m/s respectivamente, que a su vez corresponde con la tasa de desgaste más alta.

En todas las demás categorías de velocidad constante se tiene que la huella más pequeña es ocasionada por la carga menor a excepción de la categoría de velocidad constante más alta de 0.5 m/s donde la huella menor ocurre a la categoría de carga de 22.3 N, y tiende dicha huella a ser cada vez mayor al incrementar la carga, siendo en todos los casos la huella más grande la que corresponde con la carga más alta para cada categoría de velocidad. Para la categoría de velocidad constante de 0.2 m/s se observa anchos de huella muy similares para las cargas aplicadas de 11.1 N y 22.3 N como se verifica en los gráficos de barras de tasa de desgaste contra velocidad constante para las categorías de carga aplicada.

Para observar el efecto que tiene el aumento de velocidad de deslizamiento para la misma carga aplicada sobre los bloques recubiertos con cromo duro se analizan las columnas de fotos, así por ejemplo, para analizar el efecto del aumento de la velocidad de deslizamiento sobre el ancho de huella de desgaste para la categoría de carga constante de 11.1 N, se tiene la columna de fotos [a), e), j) y m)] en las cuales vemos que a medida que aumenta la velocidad lo hace también el ancho de la huella, coincidiendo con un aumento paulatino en la tasa de desgaste para dicho

aumento de velocidad para la categoría de carga ya mencionada. Para cada categoría de carga constante, el ancho de huella más pequeño y el más grande se obtienen a las velocidades más extremas de 0.1 m/s y 0.5 m/s a excepción de la categoría de carga de 22.3 N donde el ancho de huella menor es a la velocidad de 0.2 m/s y la mayor a 0.4 m/s lo que coincide nuevamente con un mayor y menor tasa de desgaste respectivamente la cual vemos reflejadas en el gráfico de barras de la tasa de desgaste contra la carga para cada categoría de velocidad constante.

En la gráfica de la figura 4.14 se observa el efecto de la carga aplicada sobre la tasa de desgaste de los anillos contrapuestos contra el cromo duro para cada categoría de velocidad constante de operación en la cual vemos como al aumentar la carga para cada categoría de velocidad constante, la tasa de desgaste aumenta como es de esperarse, a excepción de la categoría de velocidad de 0.2 m/s en donde la mayor tasa de desgaste se obtiene a la carga de 22.3 N. La menor tasa de desgaste (condición favorable), al igual que ocurrió con los bloques, se obtuvo a la menor carga y menor velocidad de operación, mientras que la mayor tasa de desgaste se obtuvo a la mayor carga de 44.5 N y máxima velocidad de 0.5 m/s.

4.2.7. Efecto de la carga sobre la tasa de desgaste del anillo

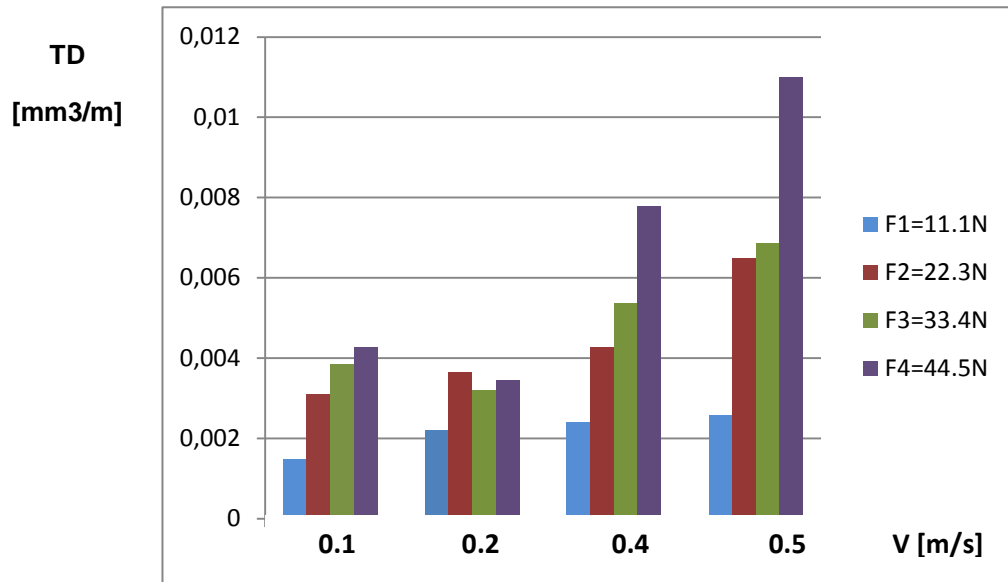


Figura 4.14: Tasa de desgaste contra velocidad de deslizamiento para los anillos

Evaluando el comportamiento de la tasa de desgaste para cada categoría de velocidad de deslizamiento se puede observar en el gráfico de la figura 14.15 donde se tiene que para una velocidad de 0.1 m/s la menor tasa de desgaste de $1.49E-03\text{mm}^3/\text{m}$ a la carga de 11.1N (condición favorable) y la mayor tasa de $4.27E-03\text{m}^3/\text{m}$ se obtiene a la carga de 44.5 N y para esta categoría de velocidad, el aumento de la tasa de desgaste contra la carga se da en la medida que aumenta esta última. Para la categoría de velocidad de 0.2 m/s se obtiene la menor tasa de desgaste $2.19E-03\text{mm}^3/\text{m}$ para la carga de 11.1 N, pero como ya se dijo anteriormente, la máxima tasa de desgaste de $3.65E-03\text{mm}^3/\text{m}$ se obtiene a la carga de 22.3 N para luego disminuir hasta $3.21E-03\text{mm}^3/\text{m}$ para la carga de 33.4 N y volver a aumentar hasta $3.45E\text{mm}^3/\text{m}$, por lo cual no se puede verificar una tendencia lineal del incremento de la tasa de desgaste al aumentar la carga aplicada para esta categoría de velocidad. Para la siguiente categoría de velocidad de 0.4 m/s se obtiene el menor valor de tasa de desgaste de $2.40E-03\text{mm}^3/\text{m}$ para la menor carga aplicada de 11.1 N y un máximo valor

de $7.78E-03 \text{ mm}^3/\text{m}$ verificándose un aumento de la tasa de desgaste con el aumento de la carga aplicada. Para la última categoría de velocidad de 0.5 m/s se tiene un incremento de la tasa de desgaste desde $2.56E-03 \text{ mm}^3/\text{m}$ para la carga de 11.1 N hasta un valor máximo de $1.09E-02 \text{ mm}^3/\text{m}$ a la máxima carga de 0.5 m/s mostrándose nuevamente un incremento de la tasa de desgaste respecto a la carga.

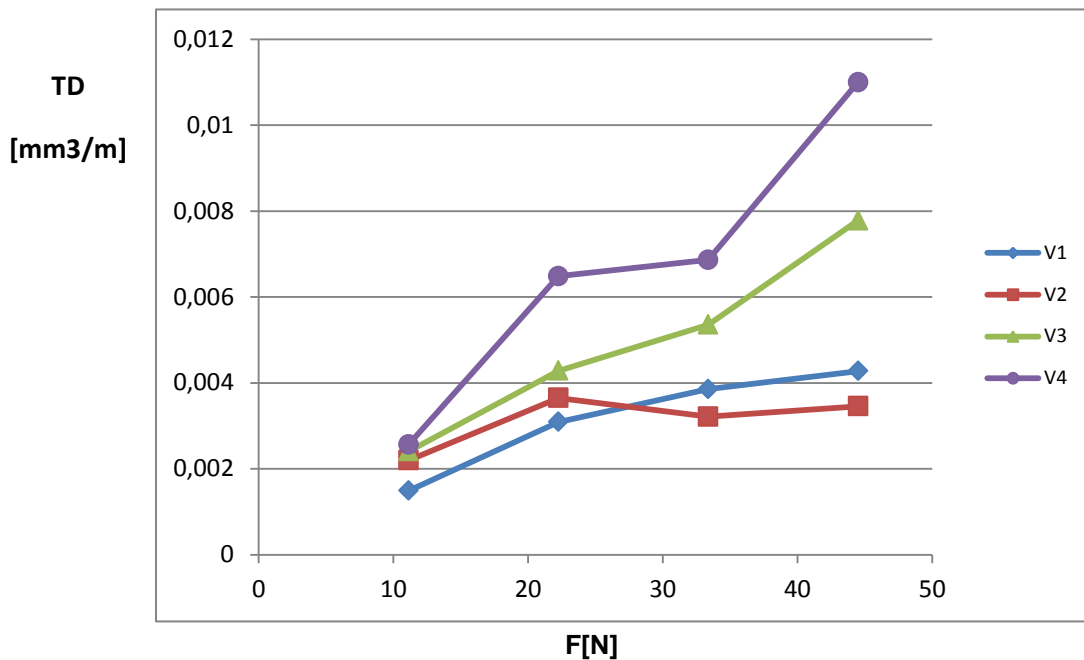


Figura 14.15: Tasa de desgaste contra carga aplicada para los anillos

4.2.8. Efecto de la velocidad sobre la tasa de desgaste del anillo

En la gráfica de la figura 14.6 se observa el efecto del aumento de velocidad sobre la tasa de desgaste de los anillos contrapuestos a los bloques recubiertos con cromo duro para cada categoría de fuerza aplicada en donde la tendencia de la tasa de desgaste es a aumentar conforme aumenta la velocidad dejando fija la carga.

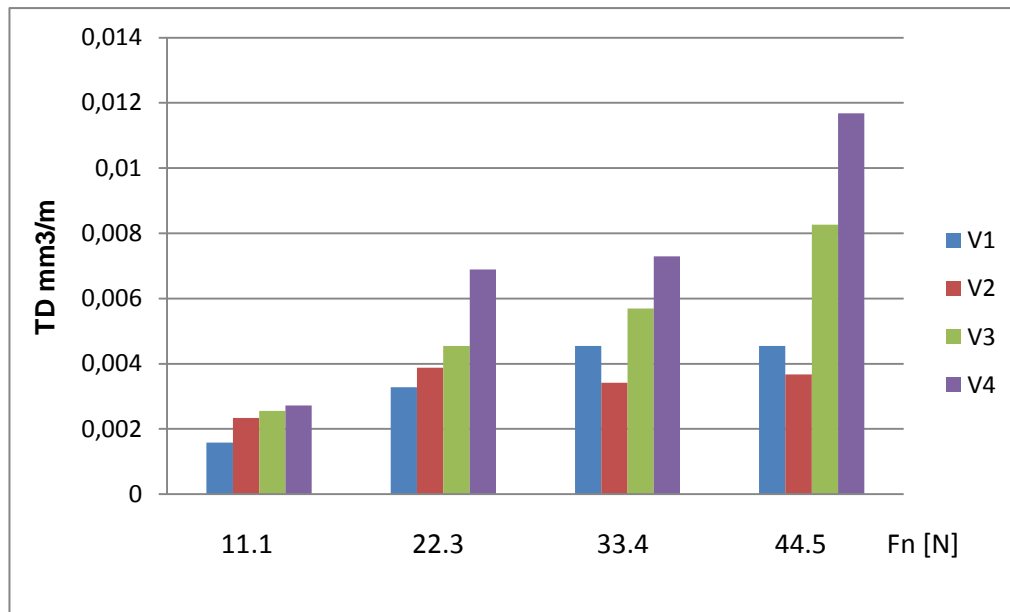


Figura 14.16: Tasa de desgaste contra carga normal para los anillos

Para cada categoría de carga se obtuvo la mayor tasa de desgaste a la mayor velocidad de operación de 0.5 m/s siendo estos máximos valores de $2.72E-03 \text{ mm}^3/\text{m}$, $6.89E-03 \text{ mm}^3/\text{m}$, $7.29E-03 \text{ mm}^3/\text{m}$ y $1.17E-02 \text{ mm}^3/\text{m}$ para las cargas de 11.1 N, 22.3 N, 33.4N y 44.5 N respectivamente para la velocidad de 0.5 m/s. Por su parte los valores mínimos de la tasa de desgaste de los anillos se obtuvieron para la menor velocidad de 0.1 m/s para las cargas de 11.1 N y 22.3 N, siendo estos valores de $1.58E-03 \text{ mm}^3/\text{m}$ y $3.28E-03 \text{ mm}^3/\text{m}$ respectivamente, mientras que para las categorías de carga de 33.4 N y 44.5 N las tasas de desgaste más bajas de $3.41E-03 \text{ mm}^3/\text{m}$ y $3.67E-03 \text{ mm}^3/\text{m}$ respectivamente se obtuvieron a la velocidad de 0.2 m/s.

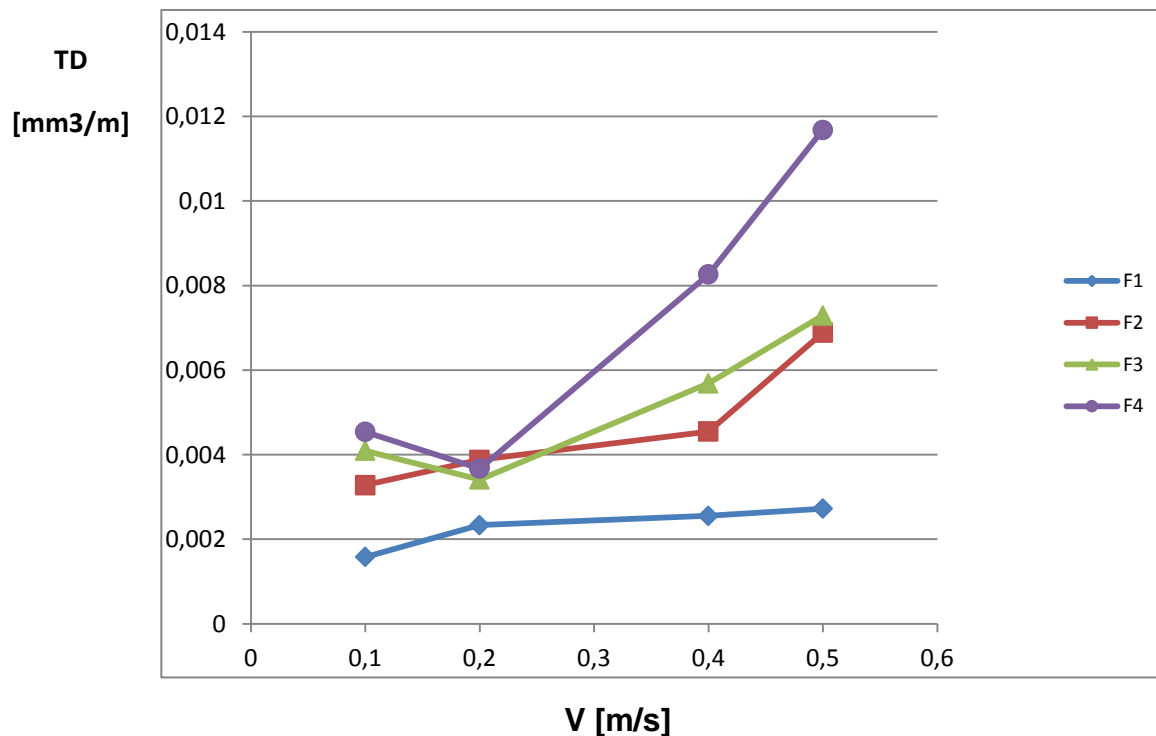


Figura 14.17: Tasa de desgaste contra velocidad de deslizamiento para los anillos

En la figura 14.7 se puede apreciar la tendencia de la tasa de desgaste frente al cambio de velocidad de operación para cada una de las categorías de carga aplicadas. Se observa que para todas las categorías de carga, las tasas de desgaste tienden a aumentar conforme aumenta la velocidad pero con factores de correlación R^2 no tan buenos para asumir tendencias lineales.

Tabla 4.13: Curvas de mejor ajuste para la tasa de desgaste contra la velocidad de deslizamiento para los anillos

Carga	Tendencia lineal		Curva de tendencia		
	ecuacion	R^2	tendencia	ecuacion	R^2
F1 = 11.1 N	$0,0025X + 0,0015$	0,8255	Logaritmica	$0,0007\ln(X) + 0,0032$	0,9346
F2 = 22.3 N	$0,0079X + 0,0025$	0,8299	Polinmica grado 2	$0,0291X^2 - 0,0098X + 0,0042$	0,9315
F3 = 33.4 N	$0,0087X + 0,0025$	0,8346	Polinmica grado 2	$0,0318X^2 - 0,0142X + 0,005$	0,9797
F4 = 44.5 N	$0,0189X + 0,0014$	0,8766	Polinmica grado 2	$0,0715X^2 - 0,024X + 0,006$	0,9897

En la tabla 4.13 se muestra las curvas de mejor ajuste para las tasas de desgaste en función de la velocidad para cada categoría de carga aplicada.

De todas las categorías de carga, la más susceptible al incremento de la tasa de desgaste al aumentar la velocidad respecto a las condiciones extremas de velocidad fue la categoría de carga de 44.5 N donde se aprecia un incremento de la tasa de desgaste desde un valor de $4.54E-03 \text{ mm}^3/\text{m}$ para la velocidad de 0.1 m/s hasta un valor de $1.17E-02 \text{ mm}^3/\text{m}$ para la máxima velocidad de 0.5 m/s lo que significa un incremento del 157.3% en el valor de la tasa de desgaste a la máxima velocidad de 0.5 m/s respecto a la menor de 0.1 m/s para la categoría de carga mayor de 44.5 N. Para la condición de carga menor de 11.1 N el aumento de la velocidad de deslizamiento no representa un incremento en la tasa de desgaste tan grande como para la carga de 44.5 N ya que a la carga de 11.1 N la tasa de desgaste se incrementa desde $1.58E-03 \text{ mm}^3/\text{m}$ para la velocidad de 0.1 m/s hasta un valor de $2.72E-03 \text{ mm}^3/\text{m}$ para la velocidad de 0.5 m/s representando un aumento del 72.1%. Para las otras categorías de carga se tienen que los aumentos desde la velocidad menor de 0.1 m/s hasta la mayor de 0.5 m/s fueron desde $3.28E-03 \text{ mm}^3/\text{m}$ hasta $6.89E-03 \text{ mm}^3/\text{m}$ representando un incremento del 109.9% para la carga de 22.3 N, $4.09E-03 \text{ mm}^3/\text{m}$ hasta un valor de $7.29E-03 \text{ mm}^3/\text{m}$ para un incremento del 78.1% para la carga de 33.4 N. Del mismo modo para el incremento de carga desde el valor menor de 11.1 N hasta el mayor de 44.5 N se tiene que la tasa de desgaste aumenta desde $1.58E-03 \text{ mm}^3/\text{m}$ hasta $4.54E-03 \text{ mm}^3/\text{m}$ para un aumento del 186.9% para la categoría de velocidad de 0.1 m/s, desde $2.33E-03 \text{ mm}^3/\text{m}$ hasta $3.67E-03 \text{ mm}^3/\text{m}$ para un aumento del 57.2% para la velocidad de 0.2 m/s, desde $2.56E-03 \text{ mm}^3/\text{m}$ hasta $8.26E-03 \text{ mm}^3/\text{m}$ para un aumento del 223.7% para la velocidad de 0.4 m/s y desde $2.72E-03 \text{ mm}^3/\text{m}$ hasta $1.17E-02 \text{ mm}^3/\text{m}$ para un aumento del 329% para la categoría de mayor velocidad de 0.5 m/s lo que evidencia, al igual que para el

desgaste de los bloques recubiertos de cromo duro, que el aumento de la carga sobre la tasa de desgaste es más significativo que para el aumento de la velocidad, aunque nuevamente este parámetro también influye sobre la tasa de desgaste.

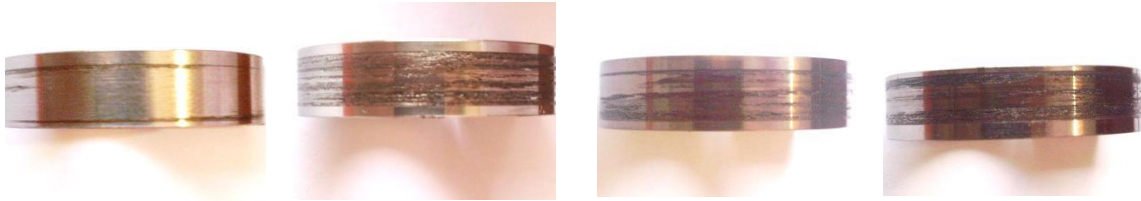
Al analizar los resultados de las tasas de desgaste de los bloques recubiertos con cromo duro y los anillos ensayados a deslizamiento en el tribómetro maquina Falex se concluye que para el par tribológico cromo-AISI D-2 la tasa de desgaste es más susceptible al incremento de la carga que al incremento de la velocidad de deslizamiento aumentando el valor de la tasa de desgaste al aumentar el valor de estos dos parámetros de ensayo y para el recubrimiento de cromo duro el aumento de la tasa de desgaste conforme aumenta la carga aplicada tiene un comportamiento lineal con buenos factores de correlación, pudiéndose establecer que la tasa de desgaste tiene una relación lineal o directa respecto a la carga aplicada lo cual está en concordancia con lo establecido en la teoría

Con la finalidad de visualizar el efecto de la carga normal en la resistencia al desgaste, se tomaron fotografías de la superficie de los anillos ensayados desde el nivel de carga menor ($F_1=11.1\text{N}$) hasta la mayor ($F_4=44.5\text{N}$) (Ver figura 4.18), manteniendo el valor constante de velocidad de deslizamiento ($V_1=0.1\text{m/s}$) en la primera fila de fotografías [a), b), c) y d)] en donde podemos apreciar, al igual que en todas las demás categorías de velocidad constante, efectos similares al de los bloques, es decir, al aumentar la carga aumenta el espesor de la huella y la huella más pequeña de todas las fotografías y la más grande se tienen a las condiciones más extremas de carga y velocidad. Por otra parte, para cada categoría de carga constante el ancho de huella más pequeño y el más grande se obtienen a las velocidades más extremas de 0.1 m/s y 0.5 m/s .

Una cosa adicional que se puede observar en las fotografías de los anillos es como se distribuye la superficie desgastada alrededor de la periferia del anillo donde se ve claramente que a medida que aumenta la carga aplicada para las distintas categorías de velocidad constante, hay mayor uniformidad en la huella alrededor del anillo, igualmente ocurre que al aumentar la velocidad, se tiene una mayor uniformidad.

En la teoría adhesiva de la fricción (Tabor, D. 1973), cuando dos superficies se colocan una junto a otra bajo la acción de una carga, el contacto solo se produce en las crestas de las asperezas y el área real que soporta la carga es, por esto, mucho más pequeña que el área aparente de contacto, lo cual puede estar evidenciado por el hecho de que a bajas cargas

V1 = 0,1 m/s



a) F1 = 11.1N

b) F2 = 22.3N

c) F3 = 33.4N

d) F4 = 44.5N

V2 = 0,2 m/s



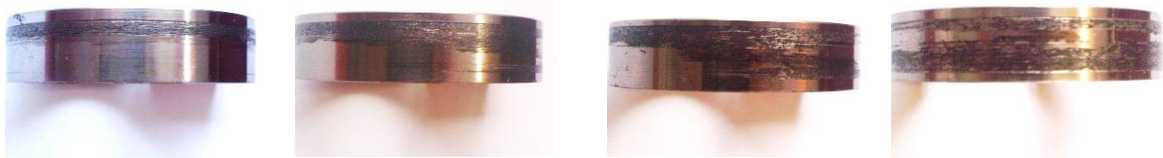
a) F1 = 11.1N

b) F2 = 22.3N

c) F3 = 33.4N

d) F4 = 44.5N

V3 = 0,4 m/s



a) F1 = 11.1N

b) F2 = 22.3N

c) F3 = 33.4N

d) F4 = 44.5N

V4 = 0,5 m/s



a) F1 = 11.1N

b) F2 = 22.3N

c) F3 = 33.4N

d) F4 = 44.5N

Fig 4.18: Fotografías de la superficie desgastada de los anillos AISI D2 para todas las categorías de carga y velocidad

las huellas no están distribuidas uniformemente. En las minúsculas regiones donde los dos cuerpos se unen íntimamente, si las dos superficies están limpias, los átomos de ambas se atraen mutuamente y se produce una fuerte adhesión que genera un componente de fuerza de fricción mayor si no hay presencia de capas de óxido desarrolladas por acción de altas temperaturas que permitan disminuir el coeficiente de fricción, dichas temperaturas son cada vez mayores al aumentar la velocidad de deslizamiento y la carga aplicada. En el caso que existan contaminantes superficiales tales como óxidos, la adhesión se vería disminuida, pero existiría de todos modos, a causa de las altas presiones que se generan debido al área tan pequeña que soporta la carga. Estas altas presiones romperían las capas contaminantes y permitirían el contacto directo entre ambas superficies.

4.2.9 Análisis Comparativo de los resultados obtenidos de la Tasa de Desgaste y el Coeficiente Específico de Desgaste

En la tabla Comparativa se han presentado los valores de la tasa de desgaste y coeficiente específico de desgaste de tres pares tribológicos que nos sirven de patrón de comparación para nuestro par tribológico Cromo Duro vs Acero D-2, tanto los bloques como los anillos respectivamente. Un valor típico en el coeficiente específico de desgaste k es $7.0E-03$, según la tabla 2.7, para ensayo de esfera sobre disco, con valores en el rango entre 0.18 y 0.8 para el coeficiente de fricción f , con condición de deslizamiento en seco y par tribológico acero- acero. El valor de k promedio en el presente trabajo para los bloques con recubrimiento de Cromo Duro es de $2.16E-05$ y para los anillos de D-2 de $3.97E-04$ obteniéndose por debajo de los valores antes mencionado, como se pueden observar en la tabla 4.10 y tabla 4.12 para los bloques y los anillos respectivamente. Los valores mínimos y máximos obtenidos para el

coeficiente específico de desgaste k en los bloques son, $1.25E-05$ y $5.08E-05$, respectivamente. Igualmente los valores mínimo y máximo de k obtenidos en los anillos son, $1.81E-04$ y $6.77E-04$, respectivamente.

Respecto a los valores como referencias para el tipo de régimen de desgaste, el mínimo valor en la tasa de desgaste en los bloques para todos los ensayos es de $7.56E-05$ mm^3/m . Igualmente el mínimo valor en la tasa de desgaste en los anillos para todos los ensayos es $8.54E-03$ mm^3/m . Estos valores en comparación con los trabajos realizados por Cubillan(2002) donde los mecanismos de desgaste presentes que predominó fue el desgaste abrasivo, el régimen de desgaste severo según los coeficientes de desgaste obtenidos, para los bloques de un mínimo de $7.80E-03$ y para los anillos de $7.93E-03$.

Cadenas (2005) obtuvo que para el par tribológico D-2 con bloques con recubrimiento de Colmonoy 88 STT eran hasta 178 veces más resistente al desgaste que el acero AISI 4340 obtenido en el trabajo de Cubillan (2002), si comparamos los resultados de Cadenas(2005) con los obtenidos en este trabajo conseguimos que el valor mínimo obtenido para los bloques Colmonoy fue de $8.99E-05$ y para los anillos $4.16E-05$ en comparación con los nuestros el recubrimiento de Cromo Duro es aún más resistente al desgaste que el Colmonoy 88 STT.

4.2.10. Efecto de la carga sobre el volumen de desgaste de la pletina en el ensayo de abrasión.

Para este ensayo se prepararon 41 platinas recubiertas con cromo duro para realizar la experimentación en concordancia con la norma, de las cuales las primeras 10 platinas se usaron para determinar los parámetros de carga y de distancia recorrida que se ajustaran a las recomendaciones de la

norma en cuanto a cómo debe ser la huella dejada por el desgaste finalizada la experiencia.

Se colocaron cargas de 44.13 N a un tiempo de 25 min y 15 min, 29.42N de 15 min, de 24.52 N con tiempos de 25 y 15 min, de 9.81 N a 10 min, 4.90 N a 15 min, 10 min y 5 min y en todos los casos anteriores se llegó al substrato de la platina de manera que no era concluyente en la investigación.

Se cambió los valores de las cargas aplicadas a las platinas por 1.12N; 2.23N y 4.45N y se sometieron a desgaste por tiempo de 5, 3 y 1 min obteniéndose una matriz de datos de 3X3 y se realizaron tres réplicas de cada condición para obtener finalmente una data de 27 valores.

En la tabla 4.14 se registran los valores de masa inicial y final para cada pletina en el ensayo de abrasión así como también se registran los valores de pérdida volumétrica.

Tabla 4.14: Valores medidos de masa y valores calculados de pérdida de volumen para las pletinas en el ensayo de abrasión

Probeta	descripción	M.I.(gr)	M.F (gr)	Δm (gr)	Δm_{corr}	$\Delta V_{corr}(mm^3)$
11	F3,t1,r1	93.0887	93.0818	0.00696667	0.0068996	0.97077084
12	F3,t2,r1	93.5512	93.5479	0.00326667	0.0032774	0.45519398
13	F3,t3,r1	93.3871	93.3831	0.00406667	0.0040800	0.56667006
14	F2,t1,r1	93.1652	93.1548	0.01036667	0.0104007	1.44454416
15	F1,t1,r1	93.3328	93.3234	0.00940000	0.0094309	1.3098439
16	F2,t2,r1	93.1009	93.0930	0.00796667	0.0079928	1.11011593
17	F2,t3,r1	93.2771	93.2746	0.00250000	0.0025082	0.34836274
18	F1,t2,r1	93.1369	93.1316	0.00523333	0.0052505	0.72923934
19	F1,t3,r1	92.9410	92.9382	0.00283333	0.0028426	0.39481111
20	F3,t1,r2	93.4968	93.4862	0.01060000	0.0106348	1.47705802
21	F3,t2,r2	93.4729	93.4621	0.01080000	0.0108355	1.50492704
22	F3,t3,r2	93.6898	93.6867	0.00310000	0.0031102	0.4319698
23	F2,t1,r2	93.5110	93.5013	0.00973333	0.0097653	1.35629227
24	F2,t2,r2	94.8399	94.8338	0.00613333	0.0061535	0.85464992
25	F2,t3,r2+8s	93.2347	93.2318	0.00290000	0.0028947	0.40203907
26	F1,t1,r2+30s	93.1251	93.1157	0.00946667	0.0094493	1.31240339
27	F1,t2,r2	93.2453	93.2401	0.00516667	0.0051572	0.7162765
28	F1,t3,r2	93.2269	93.2241	0.00280000	0.0027949	0.3817565
29	F3,t1,r3	93.3321	93.3215	0.01060000	0.0105806	1.4695221
30	F3,t2,r3	92.74473	92.7390	0.00830000	0.0082848	1.15066353
31	F3,t3,r3	93.39	93.3888	0.00323333	0.0032274	0.44825045
32	F2,t1,r3	93.2212	93.2126	0.00856667	0.008551	1.18763264
33	F2,t2,r3	93.2997	93.2942	0.00550000	0.0054899	0.76248788
34	F2,t3,r3	93.2931	93.2913	0.00183333	0.0018300	0.25416263
35	F1,t1,r3	93.3211	93.3139	0.00713333	0.0071203	0.98892368
36	F1,t2,r3	93.3419	93.3366	0.00533333	0.0053236	0.73938219
37	F1,t3,r3	93.3922	93.3908	0.00136667	0.0013642	0.18946669

De los resultados obtenidos podemos concluir que a medida que se incrementaba la carga se incrementaba la pérdida volumétrica, de igual manera a medida que se recorría mayores distancias la pérdida volumétrica también incrementaba.

La condición en la cual se observa el menor valor de volumen de desgaste es la condición F1, T3 siendo está a una carga aplicada de 1.12 N

por un tiempo de 60 segundos y la condición donde se aprecia la mayor pérdida de volumen corresponde a la F3, T1 siendo está a una carga aplicada de 4.45 N por un tiempo de 300 segundos.

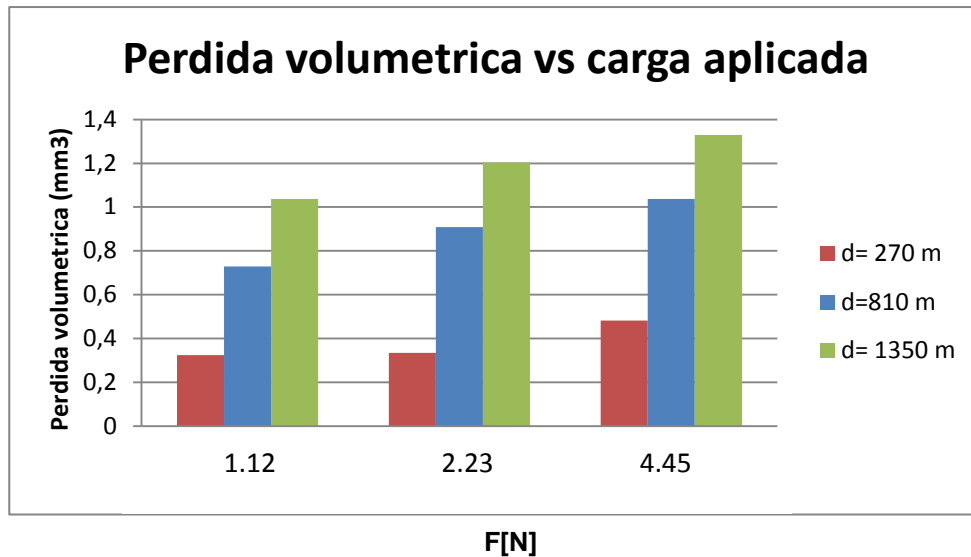


Figura 4.19: Perdida volumétrica contra carga aplicada para el ensayo de abrasión

4.2.11. Evaluación de la Micro dureza

Para evaluar la micro dureza superficial del recubrimiento de cromo duro, se realizaron ensayos de micro dureza vickers en la superficie del recubrimiento haciendo un barrido de carga desde 0.05 kg hasta 0.5 kg, para determinar la variación de la micro dureza con la carga aplicada según el modelo de Thomas A (1987), y así obtener la dureza absoluta del recubrimiento, para lo cual se grafica el valor de dureza vickers obtenido con cada carga aplicada en función del inverso de la medida de la diagonal "L" de la impronta de la huella y obtener el punto de corte con el eje de las ordenadas, determinado a partir del término independiente de la ecuación lineal de ajuste de los puntos graficados y el cual representa el valor de la dureza absoluta.

En la tabla 4.15 se muestran los valores obtenidos de la micro dureza Vickers y de la, medida de la diagonal de la huella”L”, para cada una de las cargas aplicadas en los ensayos,

Tabla 4.15: Micro dureza Vickers y valor de la diagonal “L” de la huella para el recubrimiento de cromo duro y para el sustrato de acero AISI 1020

Carga [Kg]	L cromo [mm]*10 ⁻³	L sustrato [mm]*10 ⁻³	HVN cromo [Kg/mm ²]	HVN sustrato [Kg/mm ²]
0,05	11,32 ±0,41	23,84 ±0,86	887,4±47,24	222,6±7,09
0,1	14,7 ±0,52	27,2 ±1,15	858,2±31,24	220,6±3,11
0,2	21,05 ±0,68	40,2 ±2,18	837±23,01	217,9±13,96
0,3	25,95 ±0,57	55,25 ±1,65	826,1±24,75	216,4±6,78
0,5	33,7 ±0,60	63,15 ±1,30	816,4±21,17	212,5±5,29

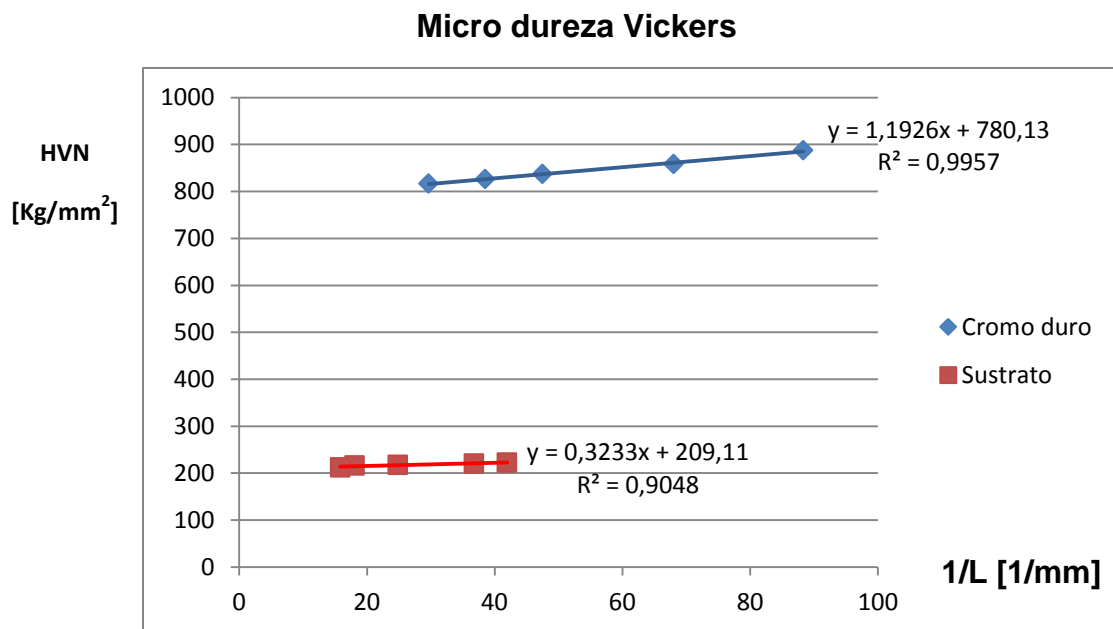


Figura 4.20: Micro dureza Vickers del recubrimiento de cromo duro y del sustrato contra el inverso de la diagonal de la impronta (1/L)

Con estos valores se realiza el gráfico de la micro dureza en función del inverso de la diagonal (Ver Figura 4.20), para obtener de las ecuaciones de tendencia lineal la dureza absoluta, Ho, según Thomas (1987), la cual resultado

de 780 kg/mm^2 para el recubrimiento de cromo duro y de 209 kg/mm^2 para el sustrato.

Observando las pendientes de las líneas de tendencia de lineal (Figura 4.20), se obtiene que el coeficiente B de la ecuación de Thomas, el cual representa la variación de la dureza con la carga, siendo de $B = 1.19 \text{ kg/mm}$ para el recubrimiento de cromo duro y $B = 1.54 \text{ kg/mm}$ para el sustrato y sustituyendo en la ecuación de Thomas ($H_v = H_o + B/L$), resulta:

$$H_v = 780 + 1.19/L \text{ (Recubrimiento de Cromo Duro)}$$

$$H_v = 209 + 0.32/L \text{ (Sustrato acero AISI 1020)}$$

4.3 Análisis Micro estructural del Recubrimiento de Cromo Duro

Para obtener el análisis micro estructural del recubrimiento se aplicó un procedimiento de desbastado y pulido para luego ser observadas a través de microscopía electrónica de barrido y poder medir el espesor de recubrimiento obtenido por vía electrolítica sobre el material base de acero AISI 1020.

En la Figura 4.21 se observa el espesor del recubrimiento con una amplificación de 500X donde se midió un valor de espesor de recubrimiento de 76.4 μm , en esta figura se observa una zona de la interfase entre el recubrimiento y el sustrato con una buena adherencia.

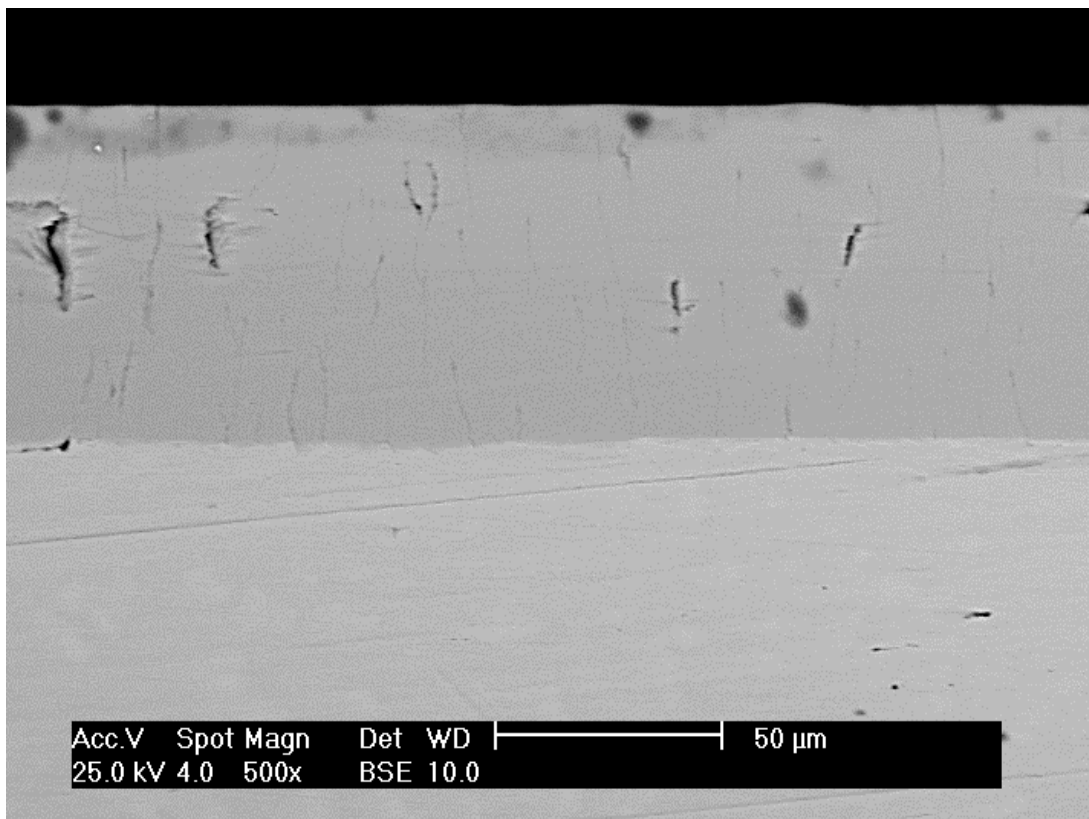


FIGURA 4.21: Metalografía de recubrimiento de Cromo Duro a 500X

4.3.1 Análisis Micro estructural por Microscopia Electrónica de barrido (MEB) del recubrimiento de Cromo Duro sometidos a desgaste por deslizamiento.

La Figura 4.22 a) corresponde a una microscopia electrónica de barrido al 300X donde un bloque de acero AISI 1020 con recubrimiento de Cromo Duro fue sometido a un ensayo por desgaste sin deslizamiento contra un anillo de acero AISI D-2 bajo las condiciones mínimas de $F_{in}= 11,13N$ y $V=0,1$ m/s, y posteriormente se le realizó un análisis de dispersión de rayos X (Figura 4.22 b)) para obtener los elementos presentes en la muestras en donde se puede observar una zona gris oscura en donde se produjo un mecanismo de desgaste oxidativo de material proveniente del anillo cuyo contenido es de hierro y se observa presencia de oxígeno lo que nos demuestra la oxidación del material en el recubrimiento.(Figura 4.22 c))y una zona gris clara (Figura 4.23 a) , b) y c)) donde se evidencia solo recubrimiento de Cromo Duro sin presencia de oxígeno lo que nos indica una buena deposición dl recubrimiento según lo reportado por el fabricante.

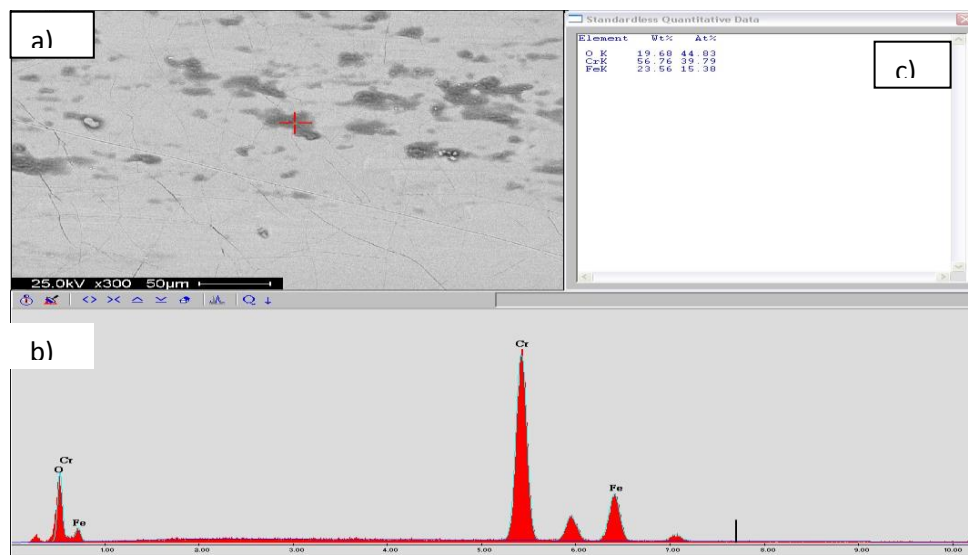


FIGURA 4.22 a) Micro estructura del recubrimiento de Cromo Duro (MEB 300X)
b) EDX realizado en la fase gris oscura
c) Elementos presentes

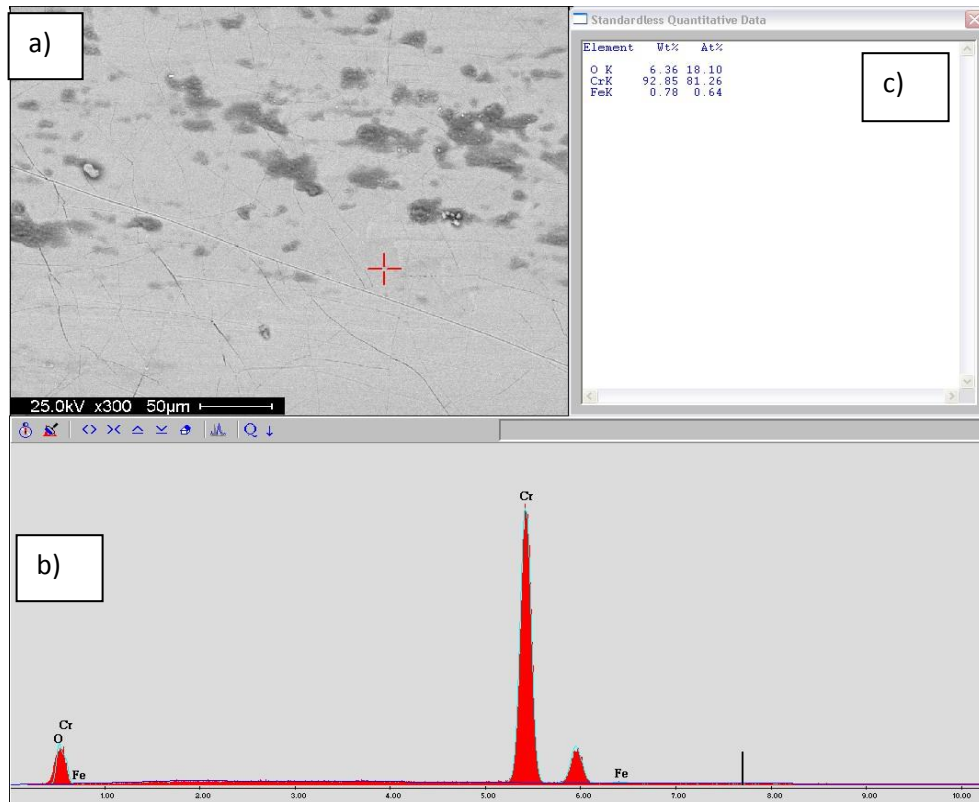


FIGURA 4.23 a) Micro estructura del recubrimiento de Cromo Duro (MEB 300X)

b) EDX realizado en la fase gris clara

c) Elementos presentes

En el anillo se puede observar en la Figura 4.24, los elementos presentes en las fases oscuras a), con sus elementos constituyentes más representativos y su proporción c) en donde producto de la adhesión de material al bloque y el desprendimiento posterior del mismo se produce oxidación y se observan grandes surcos profundos con valles o mesetas que demuestran un mecanismo de abrasión en el material

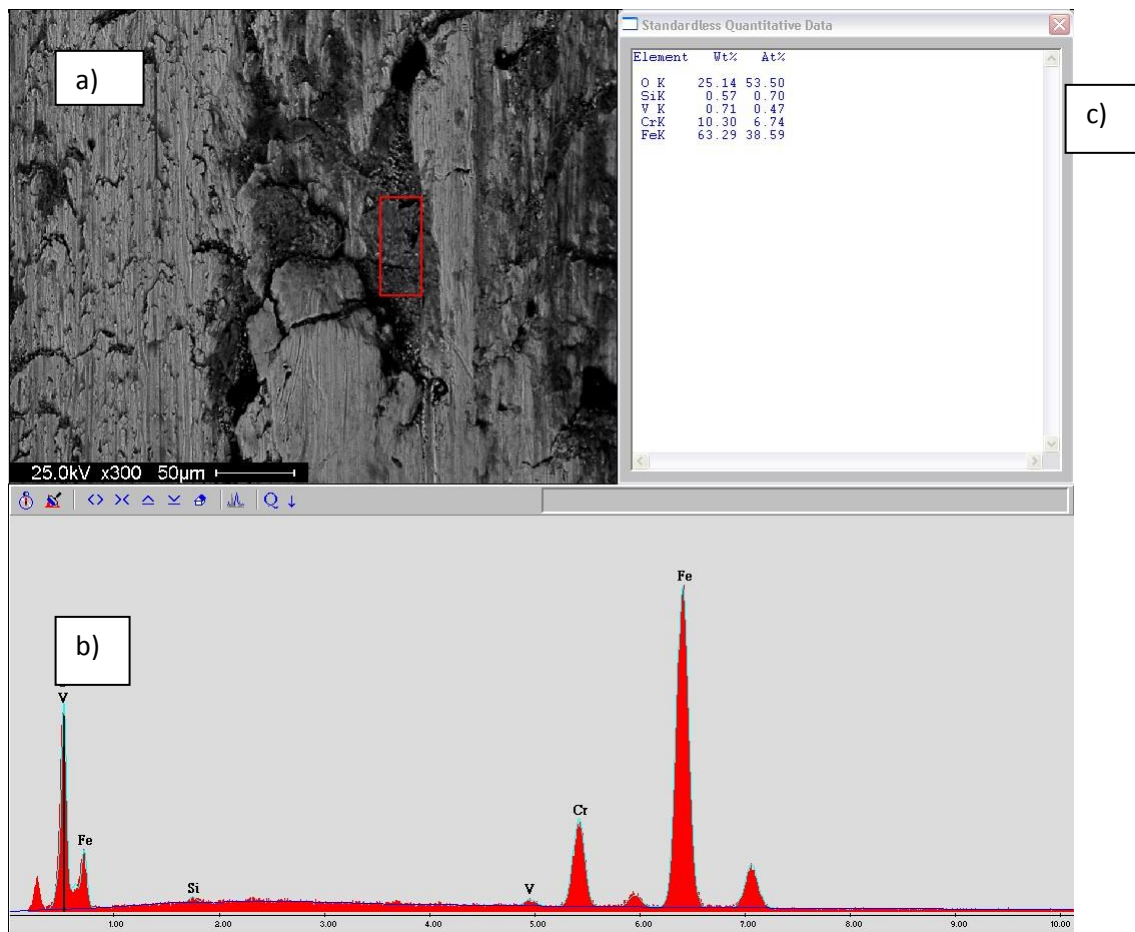


FIGURA 4.24 a) Micro estructura de la contraparte anillo AISI D-2 (MEB 300X)

b) EDX realizado en la fase gris oscura

c) Elementos presentes

En la fase clara del anillo Figura 4.25 a) b) y c) se observa elementos propios de la constitución del anillo y poca adhesión de elementos provenientes del recubrimiento de cromo Duro pero igual al anterior vista la zona de desgaste por el mecanismo de adhesión y posteriormente abrasión nos da una idea de cómo ocurre la pérdida de material en el material menos duro.

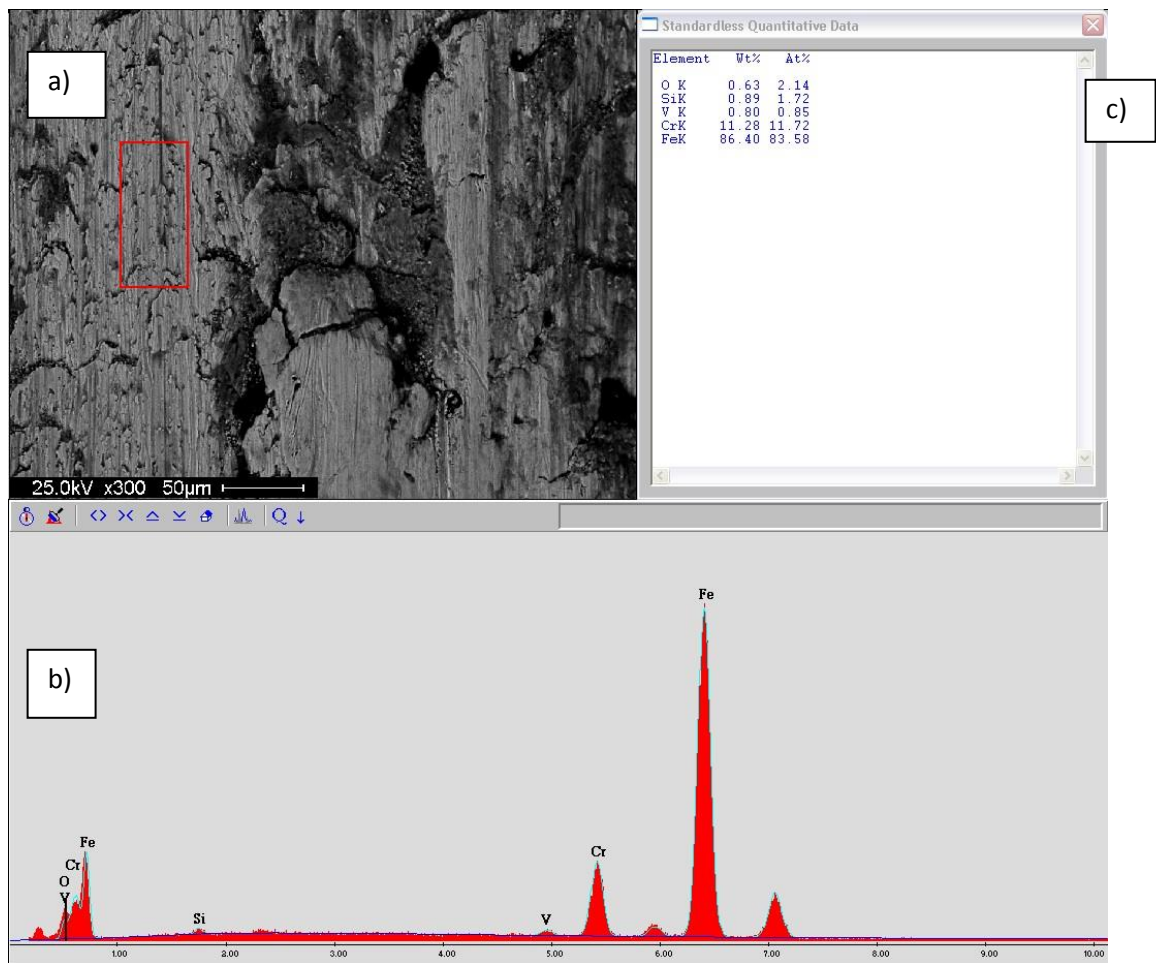


FIGURA 4.25 a) Micro estructura de la contraparte anillo AISI D-2 (MEB 300X)
b) EDX realizado en la fase gris clara
c) Elementos presentes

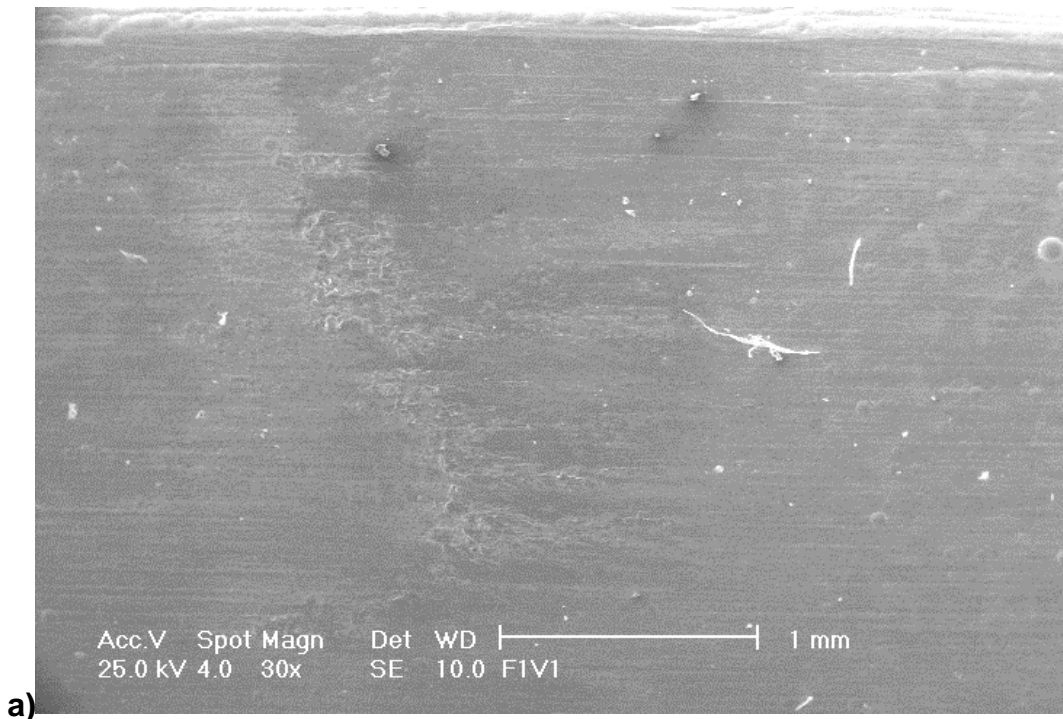
4.3.2 Mecanismos de Desgaste

Con la finalidad de determinar los mecanismos de desgaste, se observaron por microscopia electrónica de barrido las huellas desgastadas del recubrimiento en los bloques en la interfase de la huella y el recubrimiento sin desgaste y en el centro de la misma, en los anillos utilizados como contraparte, y en las platinas del ensayo de abrasión, para los niveles mínimos y máximos de carga normal y velocidad de deslizamiento; y así identificar también el efecto de estas variables operacionales en los mecanismos de desgaste.

De estas observaciones, se encontró una serie de interesantes rasgos topográficos en las huellas desgastadas. Por ejemplo, para los menores niveles de carga normal y velocidad de deslizamiento ($F_n=11,13$ N y $V= 0,1$ m/s), para el recubrimiento de Cromo Duro (Figura 4.26 a). y para el Anillo bajo las mismas condiciones (Figura 4.26 b) En estas figuras se observa que el mecanismo de desgaste manifestado es el de adhesión (Tabor, 1973), debido a la transferencia de material desgastado de los anillos hacia la superficie del recubrimiento (ver zona A) y también de la superficie del recubrimiento hacia la superficie de los anillos(ver zona B) como se puede observar en la Figura 4.27a y Figura 4.27b, aunque en menor proporción en los anillos.

Después de ocurrido el mecanismo de adhesión, se puede observar en las siguientes figuras que la superficie de estas capas de material adherido son aplanadas por la acción de la fuerza de fricción y oxidadas debido a la presencia de oxígeno y al incremento de la temperatura durante el ensayo producto de la fricción, esto se puede sustentar en que hubo un mecanismo de desgaste oxidativo (Quinn et al, 1980) y que la mayoría de estas capas de óxido no fueron removidas debido a que la fuerza de fricción es menor para este nivel de carga normal.

Sin embargo, debido a la repetitiva acción de la carga sobre la superficie de contacto estas capas de adhesión son endurecidas por deformación hasta que fracturan y luego se desprenden como partículas duras que contribuyen con la formación de surcos por abrasión en la superficie del anillo (ver zona C) y en la superficie del recubrimiento (Figura 4.28a y Figura 4.28b respectivamente) que fueron empujadas por la fuerza de fricción. Este mecanismo de abrasión se evidencia más aun en la superficie de los anillos ya que dejó surcos profundos y mesetas del material del anillo (ver zona D) (Figura 4.29) esto indica que resistieron hasta la culminación del ensayo lo cual nos indica que ocurrieron simultáneamente los mecanismos de desgaste por deterioro cíclico y por abrasión. (Blau, 1981).



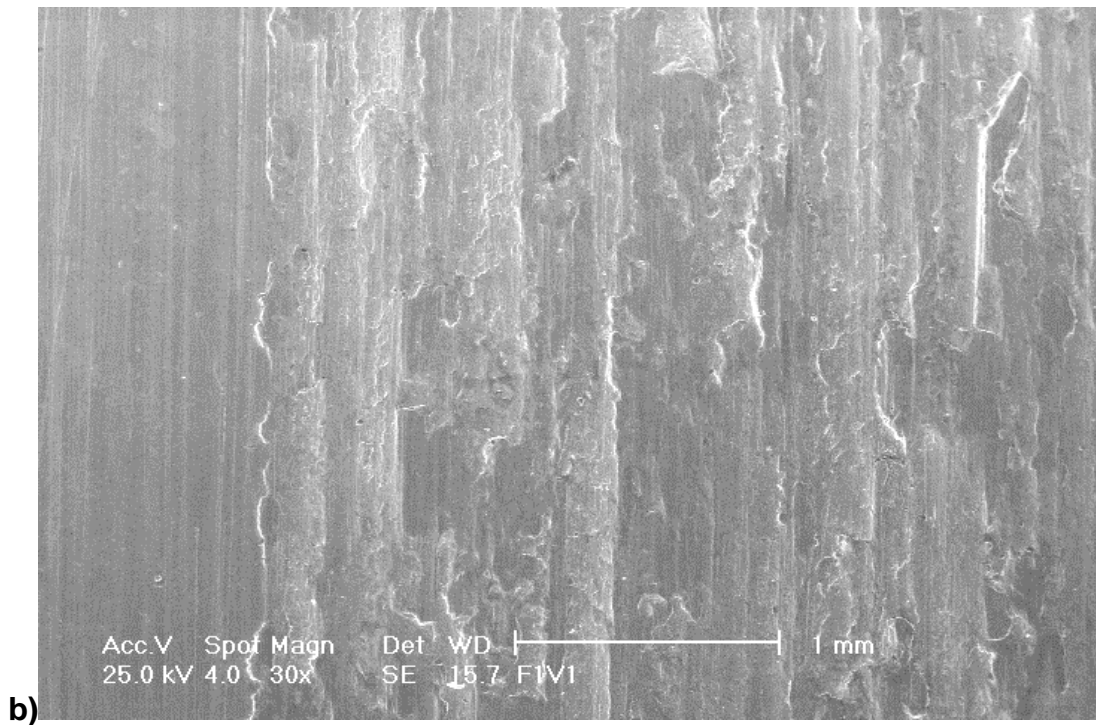
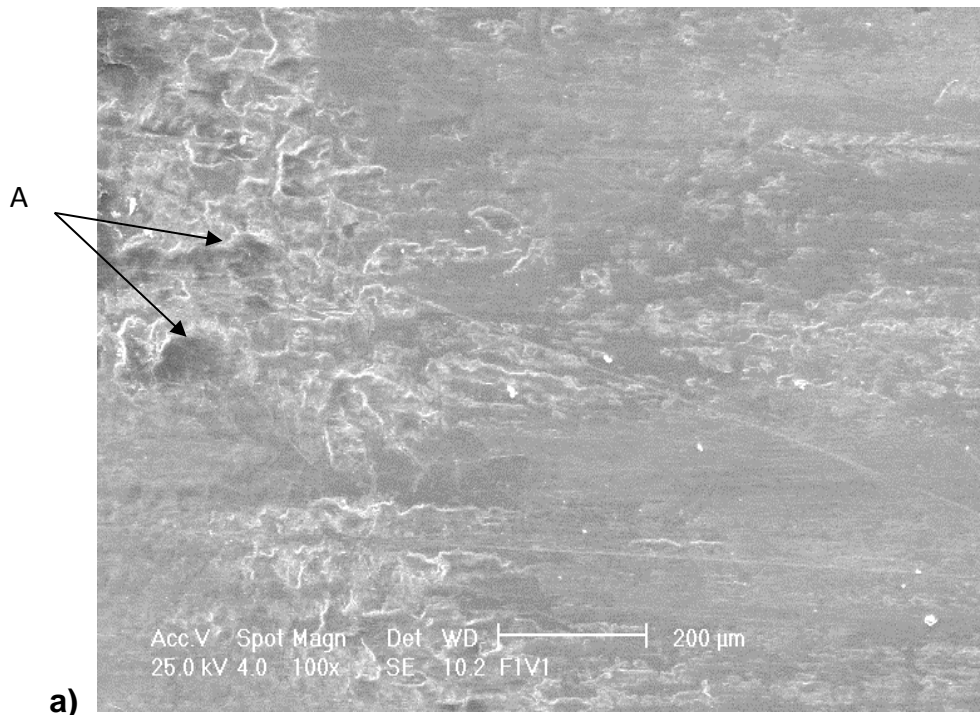


FIGURA 4.26 a) Huella de la superficie desgastada

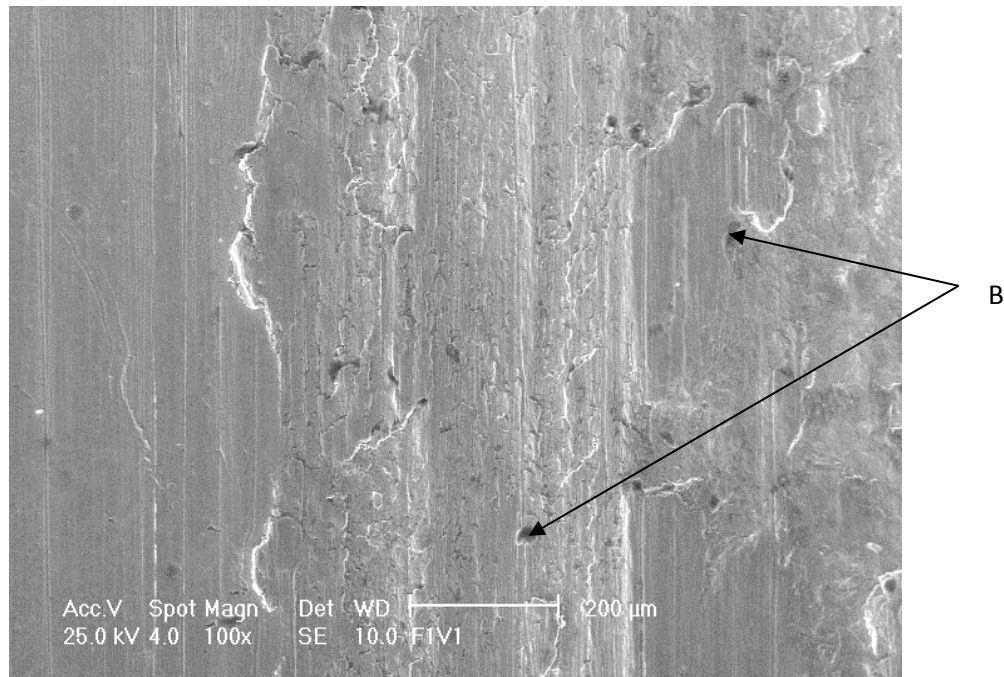
Condición: ($F_n= 11,13\text{N}$ y $V=0,1\text{ m/s}$) (30X)

b) Huella de la superficie desgastada del anillo contraparte

Condición: ($F_n= 11,13\text{ N}$ y $V= 0,1\text{ m/s}$) (30X)



a)



b)

FIGURA 4.27 a) Huella de la superficie desgastada
Condición: ($F_n= 11,13\text{N}$ y $V=0,1\text{ m/s}$) (100X)
b) Huella de la superficie desgastada del anillo contraparte
Condición: ($F_n= 11,13\text{ N}$ y $V= 0,1\text{ m/s}$) (100X)

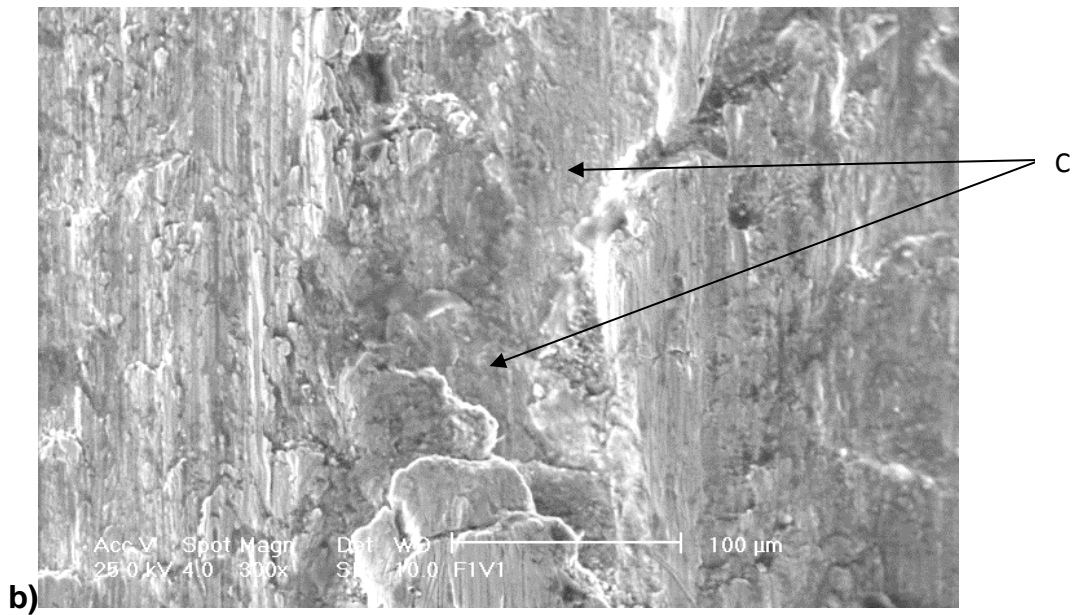
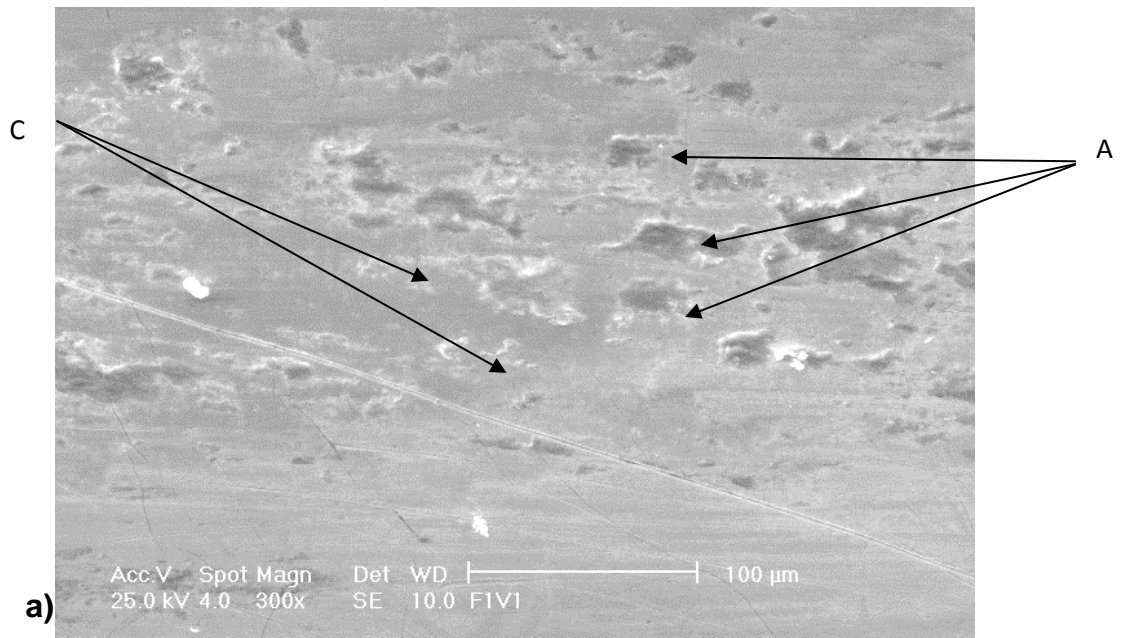
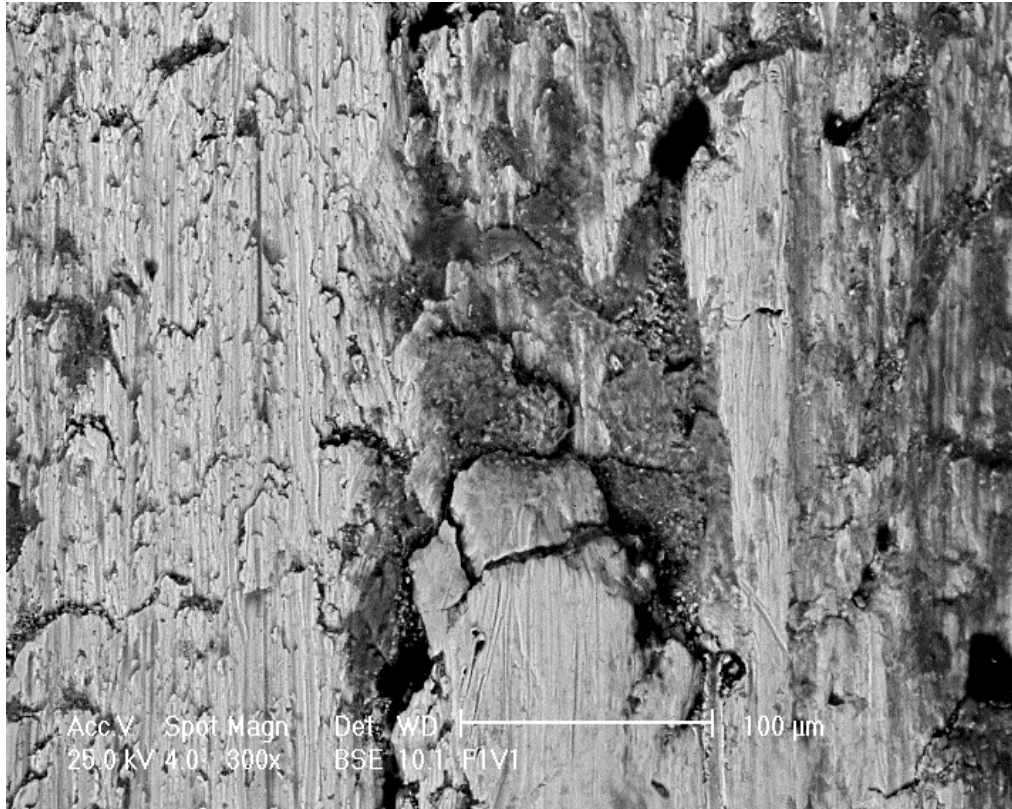


FIGURA 4.28 a) Huella de la superficie desgastada
Condición: ($F_n= 11,13\text{N}$ y $V=0,1\text{ m/s}$) (300X)
b) Huella de la superficie desgastada del anillo contraparte
Condición: ($F_n= 11,13\text{ N}$ y $V= 0,1\text{ m/s}$) (300X)



**FIGURA 4.29: Huella de la superficie desgastada del anillo contraparte
Condición: ($F_n= 11,13$ N y $V= 0,1$ m/s) (300X)**

Bajo este mismo esquema se observaron por microscopia electrónica de barrido las superficie desgastadas del recubrimiento de Cromo Duro (Figura 4.30 a) y la de los respectivos anillos utilizados como contraparte (Figura 4.30 b), para la condición de mayor carga normal y velocidad de deslizamiento ($F_n= 44,45$ N y $V=0,5$ m/s).

De estas figuras, se puede determinar que el mecanismo que más predominó fue el de abrasión y adhesión, esto se evidencia por la abundante formación de surcos en la superficie de los anillos que presentan forma alargada y deformados plásticamente debido al calor generado por la fricción.(Figura 4.31a y Figura 4.31b)

De igual manera que en la condición anterior en la superficie de los anillos se observan zonas planas alargadas y deformadas plásticamente por la acción de la fuerza de fricción y del incremento de la temperatura generado por el calor. (Figura 4.32a y Figura 4.32b).

En resumen se puede decir, que para los menores niveles de carga normal y velocidad de deslizamiento se determinó un mecanismo mixto: adhesivo, oxidativo, abrasivo y de deterioro cíclico simultáneamente. Y para las condiciones de mayor carga normal y velocidad de deslizamiento se determinó un mecanismo mixto: adhesivo, abrasivo y deterioro cíclico simultáneamente. Observándose en ambos casos extremos que el mecanismo de desgaste que más predominó fue el mecanismo de abrasión debido al calor generado por la fricción.

En las platinas que se sometieron a un desgaste por abrasión se observaron por microscopia electrónica de barrido las muestras que se le aplicaron a cargas de 4,45 N y 300 s como condición máxima y a 1.12 N y 60 s como condición mínima.

En las figuras a condición de mínima carga (Figura 4.33 a), b) y c)) se diferencia claramente la zona donde ocurrió el desgaste por abrasión, no se evidencia adhesión de material de la goma de caucho y se observan los surcos característicos de un mecanismo de desgaste por abrasión.

En las figuras a condición de máxima carga (Figura 4.34 a), b) y c)) se observó los surcos de propios de un mecanismo de desgaste por abrasión sin encontrar que se haya llegado al substrato del material base.

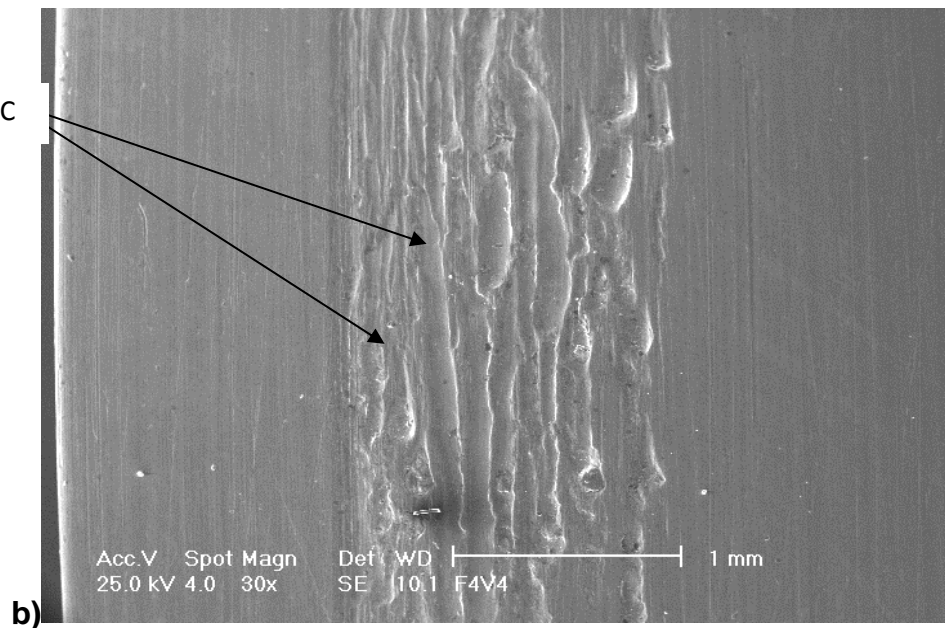
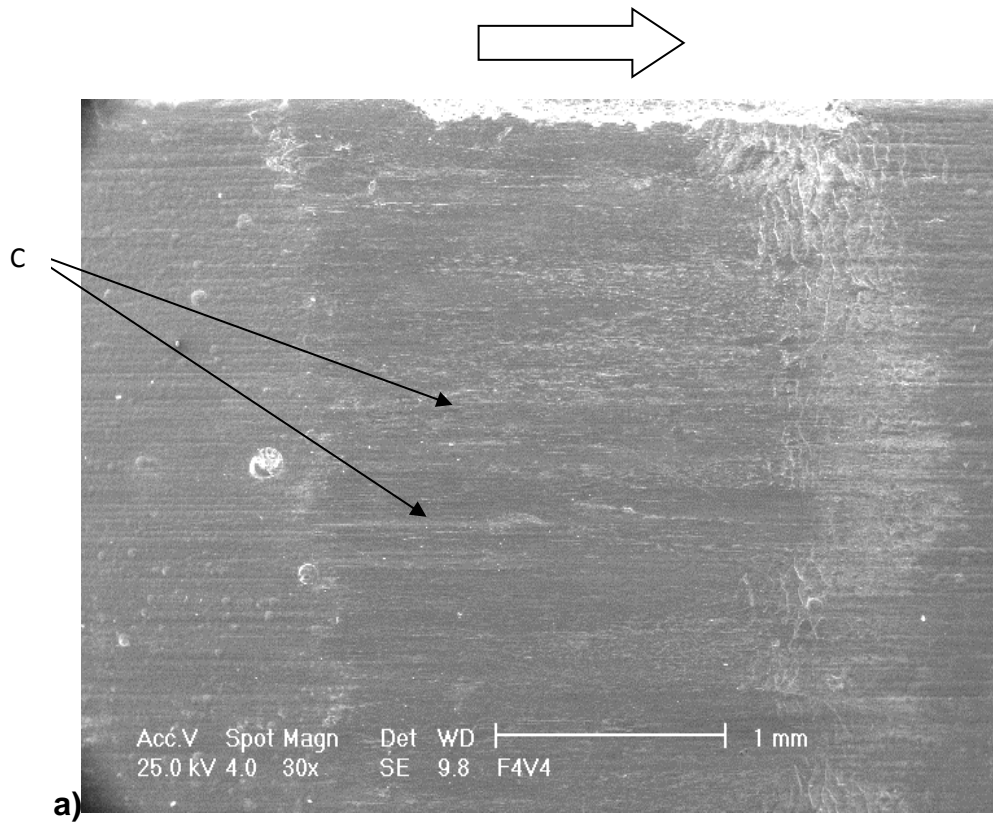


FIGURA 4.30 a) Huella de la superficie desgastada

Condición: ($F_n= 44,45\text{N}$ y $V=0,5 \text{ m/s}$) (30X)

b) Huella de la superficie desgastada del anillo contraparte

Condición: ($F_n= 44,45 \text{ N}$ y $V= 0,5 \text{ m/s}$) (30X)

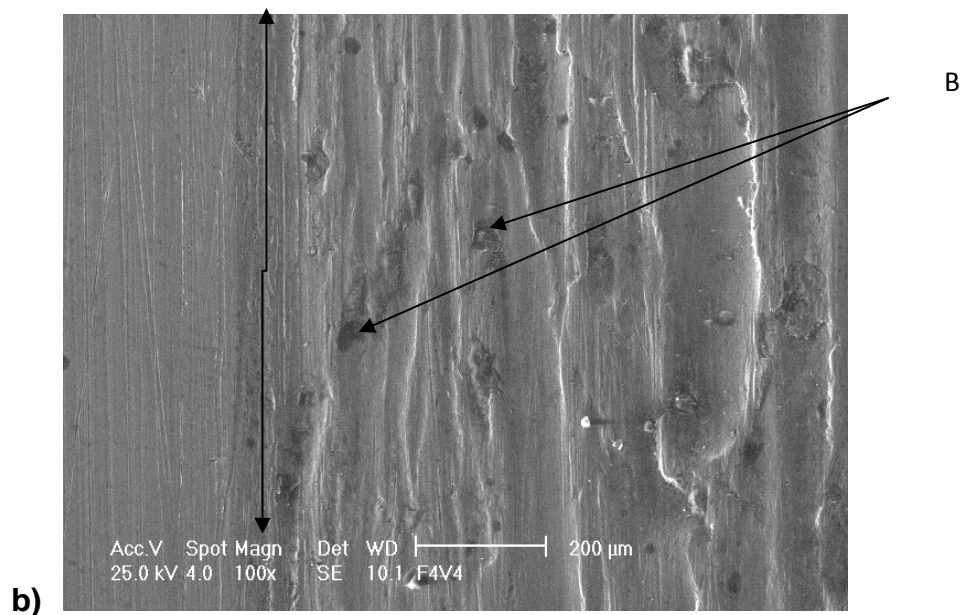
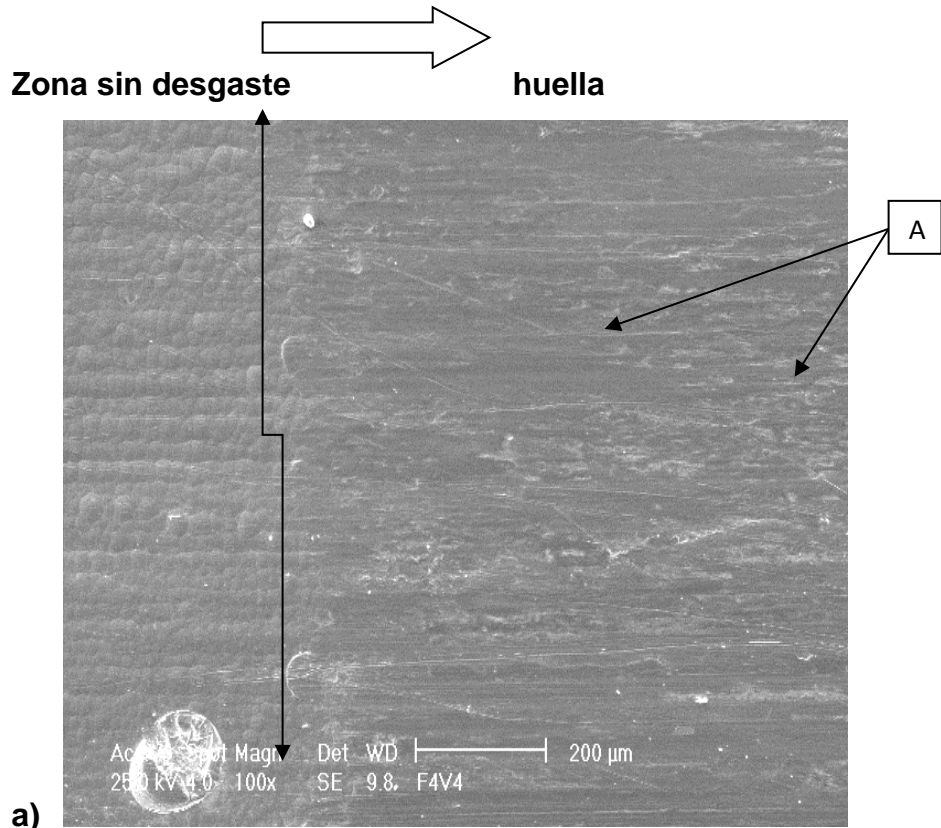
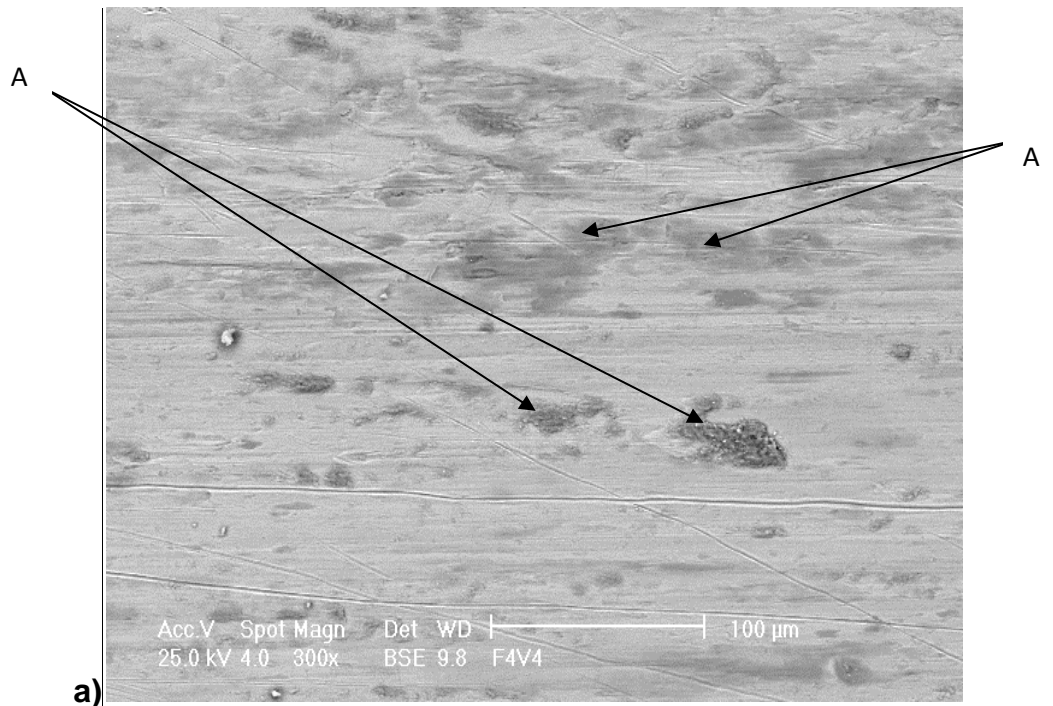
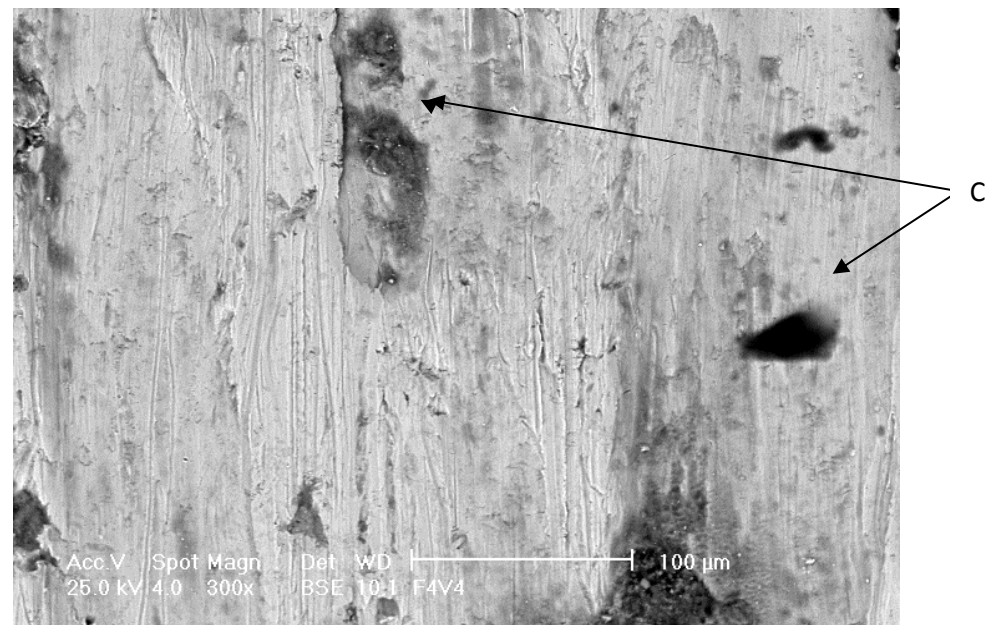


FIGURA 4.31 a) Huella de la superficie desgastada
Condición: ($F_n = 44,45\text{N}$ y $V = 0,5\text{ m/s}$) (100X)
b) Huella de la superficie desgastada del anillo contraparte
Condición: ($F_n = 44,45\text{ N}$ y $V = 0,5\text{ m/s}$) (100X)

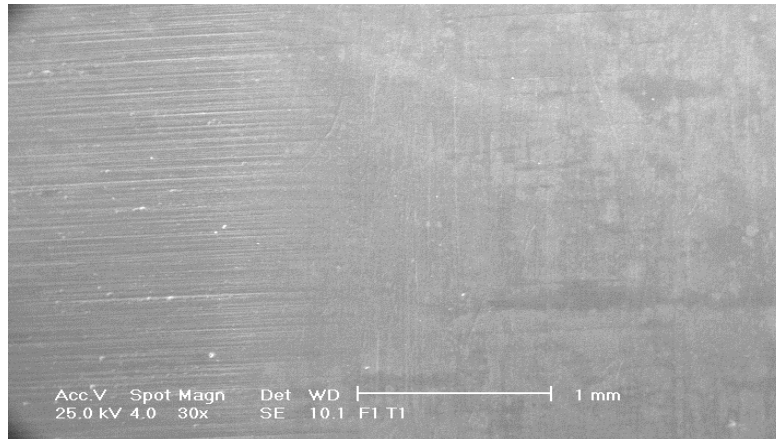


a)

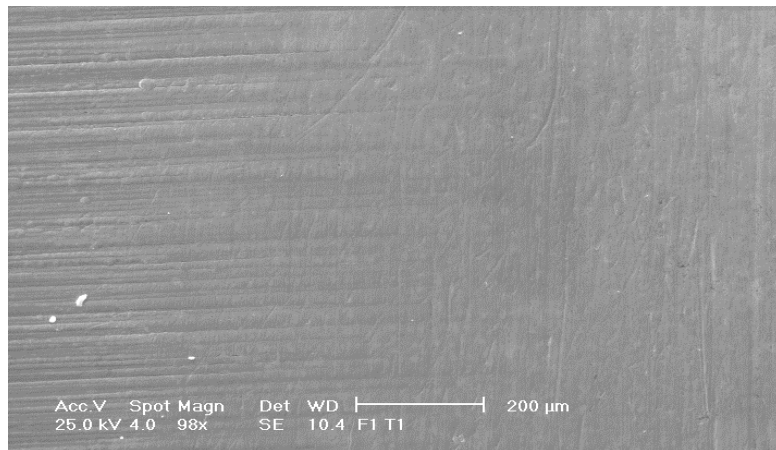


b)

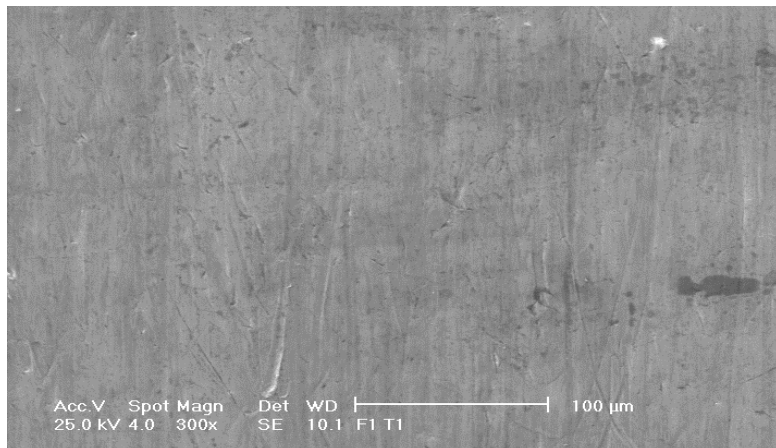
FIGURA 4.32 a) Huella de la superficie desgastada
Condición: ($F_n = 44,45\text{N}$ y $V = 0,5\text{ m/s}$) (300X) BSE
b) Huella de la superficie desgastada del anillo contraparte
Condición: ($F_n = 44,45\text{ N}$ y $V = 0,5\text{ m/s}$) (300X) BSE



a) 30X

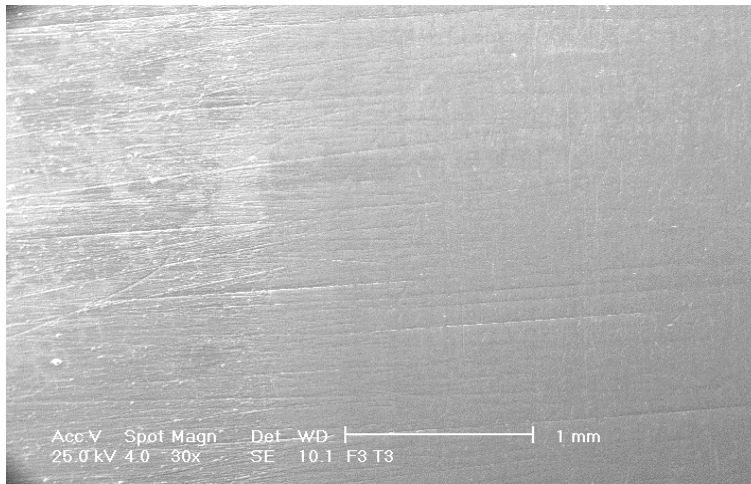


b) 100X

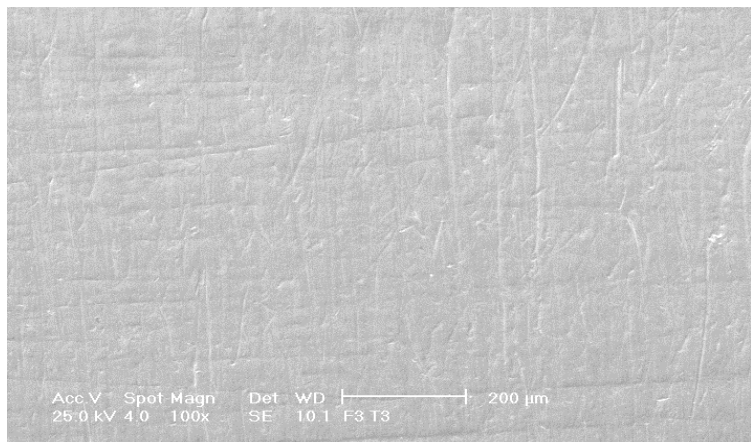


c) 300X

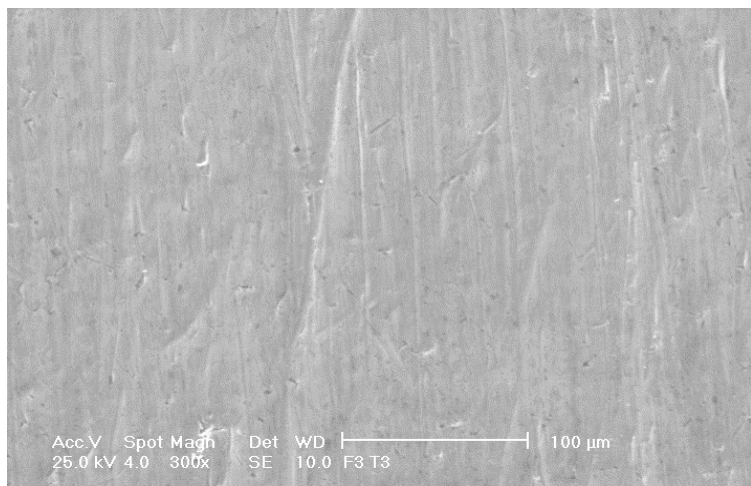
FIGURA 4.33: Platinas con recubrimiento de Cromo Duro ensayadas por abrasión. Condición: $F_n=4,45N$ y $t=300s$



a) 30X



b) 100X



c) 300X

FIGURA 4.34 Platinas con recubrimiento de Cromo Duro ensayadas por abrasión. Condición: $F_n=1,12N$ y $t=60s$

CAPITULO V
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

5.1 CONCLUSIONES

Del análisis de los resultados obtenidos en el presente trabajo se puede concluir que:

- El valor del coeficiente de fricción promedio f , por efecto de la velocidad de deslizamiento para las diferentes categorías de cargas aplicadas disminuye a medida que aumenta el valor de la carga y que aumenta la velocidad de deslizamiento..
- El valor más grande del coeficiente de fricción promedio f se tiene para la carga normal aplicada de 11.1 N y la velocidad más baja de 0.1 m/s es de 0.7877
- El valor más bajo del coeficiente de fricción promedio f de 0.4375 se tiene para la carga normal aplicada de 44.5 N y la velocidad más alta de 0.5 m/s.
- El volumen de desgaste va en aumento con la carga normal y la velocidad de deslizamiento.
- La tasa de desgaste en los bloques recubiertos con Cromo Duro aumenta al incrementar la carga normal aplicada, para todas las categorías de velocidad de deslizamiento constante a excepción de la categoría de la carga de 22.3 N
- La tasa de desgaste en los bloques recubiertos con Cromo Duro aumenta al incrementar la velocidad de deslizamiento, manteniendo la carga constante para todas las categorías de carga a excepción de la carga de 22.3 N en la cual para la menor velocidad de 0.1 m/s se experimenta una mayor tasa de desgaste que para el valor de 0.2 m/s y de forma similar se obtiene entre las velocidades de 0.4 m/s que para 0.5 m/s.
- La condición en que se obtuvo la menor tasa de desgaste, es decir, la condición más favorable, fue para la menor carga de 11.1 n a la menor

velocidad de 0.1 m/s obteniéndose un valor de tasa de desgaste de $7.4 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{m}$

- La Condición en que se obtuvo la mayor tasa de desgaste, es decir, la condición menos desfavorable, fue para la máxima carga de 44.5 N a la mayor velocidad evaluada de 0.5 m/s obteniéndose un valor de tasa de desgaste de $3.2 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{m}$.
- La tendencia es el aumento de la tasa de desgaste en los bloques al aumentar la carga para cada una de las categorías de velocidad constante de deslizamiento.
- El efecto de la carga sobre la temperatura de los bloques recubiertos de Cromo Duro se observa un aumento de la temperatura conforme aumenta la carga aplicada para todas las categorías de velocidad de deslizamiento.
- Al aumentar la velocidad, la temperatura aumenta para todas las categorías de carga aplicada.
- La tasa de desgaste en los anillos aumenta al incrementarse la carga normal aplicada, para todas las categorías de velocidad de deslizamiento constante. Al comparar dichos aumentos con los observados por los bloques, es decir, por su par tribológico, son menos pronunciados.
- La tendencias en el crecimiento de las tasas de desgaste de los anillos al aumentar la carga son menos pronunciadas que las que presentan los bloques.
- La tasa de desgaste en los anillos aumenta al incrementar la velocidad de deslizamiento, para todas las categorías de carga normal aplicada.
- El régimen de desgaste de recubrimientos de Cromo Duro es suave, ya que las tasas de desgaste resultaron menores de $1\text{E}-05 \text{ mm}^3/\text{m}$ para todas las condiciones ensayadas.

- El régimen de desgaste presente en los anillos utilizados como contraparte del recubrimiento de Cromo Duro es severo en razón a los valores del orden de $1E-03$ de la tasa de desgaste.
- El mecanismo de desgaste presente en las superficies desgastadas del recubrimiento de Cromo Duro y de los respectivos anillos utilizados como contraparte, para los menores niveles de carga normal y velocidad de deslizamiento es mixto: adhesivo, oxidativo-abrasivo, como combinación entre ellos.
- El mecanismo de desgaste presente en las superficies desgastadas de contraparte, para los mayores niveles de carga normal y velocidad de deslizamiento es mixto: adhesivo y abrasivo, predominando entre ellos el mecanismo de desgaste abrasivo.
- La pérdida volumétrica presente en las pletinas recubiertas de Cromo Duro aumenta a medida que se incrementa la carga aplicada en el ensayo de Abrasión para todas las categorías.
- La pérdida volumétrica presente en las pletinas recubiertas de Cromo Duro aumenta a medida que se recorren mayores distancias en el ensayo de Abrasión para todas las categorías de las cargas aplicadas.
- La Condición en la cual se observa el menor valor de pérdida volumétrica es en la condición de la carga aplicada de 1.12 N por un tiempo de 60 segundos (270 m).
- La Condición en la cual se observa el mayor valor de la pérdida volumétrica corresponde a la condición de la carga aplicada de 4.45 N por un tiempo de 300 segundos (1350m).
- El valor obtenido experimentalmente de la dureza absoluta según el modelo de Thomas para la determinación de la variación de la dureza con la carga aplicada arroja un valor de 780 Kg/mm^2 para el recubrimiento de Cromo Duro y de 209 Kg/mm^2 para el sustrato.

5.2 RECOMENDACIONES

De la experiencia que se obtuvo en la realización del presente trabajo y con la finalidad que se continúe desarrollando esta línea de investigación se recomienda:

- Mejorar las condiciones del laboratorio de Lubricación y Desgaste, para el mejor control de las variables como la humedad y la temperatura, colocando reguladores en el aire acondicionado y aparatos de medición para la toma de datos de humedad, temperatura, altitud, limpiadores de ultrasonido, balanza electrónica.
- Evaluar la posibilidad de que se instale al tribómetro, una tarjeta de adquisición de datos para registrar instantáneamente los valores de la fuerza de fricción que mide la celda de carga.
- Seguir realizando pruebas con diferentes niveles de carga normal, con la finalidad de obtener la carga de transición entre régimen de desgaste suave y severo.
- Especificar al momento de aplicar los recubrimientos a los bloques los parámetros que deben tenerse en el baño: como corriente, tiempo de baño, espesor del recubrimiento a alcanzar, para evaluar de acuerdo a dichas condiciones predeterminadas y verificadas mediante microscopia.
- Realizar operaciones de limpieza, almacenamiento y manipulación de las probetas antes y después de los ensayos, siguiendo estrictamente lo que indiquen las normas, para protegerlas de la oxidación, y para la mejor evaluación de las superficies de desgaste por microscopia electrónica de barrido.
- Evaluar el desgaste por deslizamiento de otros recubrimientos que se utilicen en la recuperación de piezas desgastadas, con la finalidad de construir los mapas de desgaste de cada uno de estos,

los cuales serían de gran utilidad para la industria mecánica, industrial y metalúrgica.

BIBLIOGRAFÍA

- 1.- A.R.Jones. (1989) "*Microcracks in hard Chromium Electrodeposits*". Plating and Surface Finishing..
- 2.- A.R. Jones.(1997) "*Corrosion of Electroplated Hard Chromium*". ASTM Handbook.. Vol 9. Surface Engineering.
- 3.- Abrahanson, E;Jahanmir,S;Colling,D y Suh,N.,(1974)."*Failure by delamination during wear*" Proceedings of the Workshop on failure Analysis and the SEM IIT Research Institute, EEUU.
- 4.- American Society Testing Machine.(2000) Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus1. (ASTM G65-00).ASTM
- 5.- American Society Testing Machine. (1998). Standard Test Method for Ranking Resistance of Materials to Sliding Wear Using Block-on-Ring Wear Test. (ASTM g 77-98). ASTM
- 6.- American Society Testing Materials. (1988). Standard Tested Method for Calibration and Operation of the Falex Block-on-Ring Friction and Wear Testing Machine. (ASTM D2714).ASTM
- 7.- American Society Testing Materials. (1982). Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials. (ASTM E 92-82). ASTM
- 8.- Archard, J.,(1953) "*Contac and rubbing of flat surfaces*" Journal of Applied Physics.V.24.
- 9.- Archard,J F. y Hirst, W.,(1956). "*The wears of metals under unlubricated condition*" Proceedings of Royal Society. A236.
- 10.- Bentley,R y Duquette,D.,(1981). "*Enviromental considerations in wear processes*" Fundamentals of friction and wear of materials, Rigney,D. Ed.,A.S.M.
- 11.- Blau,P.(1981). "*Mechanisms for Transitional friction and wear behavior of sliding metals*". Wear.V.72
- 12.- Bowden,F y Tabor,D.(1964)."*The friction and lubrication of solids*". Clarendon Press. V.". Inglaterra.
- 13.- Burgos,C.,Hector,L.(2002)."*Evaluación de recubrimiento de Babbitt depositados por Arco electrico utilizados en cojinetes de Turbinas*". Tesis de Grado .Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Caracas. Venezuela.
- 14.- Caicedo, Holman F; Valdes O,Jairo A; Coronado M,John J.(2005) "*Caracterización de Recubrimientos duros frente al desgaste abrasivo a tres cuerpos*".

- 15.- Cadenas,P. (2005).”*Evaluación del desgaste por deslizamiento sin Lubricación de un Recubrimiento Base Níquel Termo-Rociado por HVOF con y sin Tratamiento térmico Posterior por Llama Oxiacetilénica*”. Trabajo de Ascenso. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- 16.- Cubillán, A y Liccionis,O (2002). “*Estudio de la Resistencia al desgaste del acero AISI 4340 bajo condiciones de deslizamiento sin lubricación*”. Tesis de Grado. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Caracas.
- 17.- Da Silva, Domingo R; Hoyer R, Rafael E.(2008) “*Resistencia al desgaste por deslizamiento utilizando el Equipo Falex Block On Ring bajo la norma ASTM G77-98R03*”
- 18.- Díaz N., Siul J. y Franco S., Adolfo A.(2002).“*Análisis Comparativo de la Resistencia al Desgaste de piezas sinterizadas y piezas recubiertas por Rociado Térmico HVOF*”
- 19.- Duarte P. Christopher. N y Farfán R. Rafael. J (2011). “*Influencia De Los Parámetros Sobre La Resistencia Al Desgaste Por Deslizamiento De Recubrimientos Depositados Por Rociado Térmico Con Wc-12%Co Nanoestructurado*” Tesis de Grado. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Caracas.
- 20.- Eyre, T. (1978). “*Wear characteristics of metals*”. Source Book on Wear Control Technology, Rigney,D and Glaesser,W.,(Editores), A.S.M., EEUU.
- 21.- Hirst, W., (1957-58). “*Wear of unlubricated metals*”. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Conference on Lubrication and Wear, Londres.
- 22.- Hirst, W., (1967-68). “*Basic mechanisms of wear*”. *Proceedings of Institution of Mechanical Engineers. V.182.*
- 23.- Iwai,Y y Kichiro,E. (1982).”*Transition of the lubricated wear of carbon steel*”. *Wear. V.75.*
- 24.- Kennard, R.W.,(1978). “*Engineering Statistics and Quality Control*”. Mark’s Standard Handbook for Mechanical Engineers, McGraw-Hill.
- 25.- KennethR.Newby.(1997).“*Industrial (Hard) Chromium Plating*” ASTM Handbook.. Vol.9 Surface Engineering.
- 26.- Kragelskii,I. y Alisin V. (1981). “ *Calculation of wear rate*”. Tribology Handbook, Ed. Mir Publishers, V.2. Moscú.

- 27.- Kragelskii, I y Marchenko, E. (1981). "*Wear of Machine components*". Journal of Lubrication Technology. V.104.
- 28.- Lipson, Ch. (1967). "*Wear considerations in design*". Prentice Hall, EEUU.
- 29.- Mariño B, Carlos A; Ortiz M, Manuel J. (2001). "*Estudio de Fatiga y Corrosión-Fatiga de un acero SAE 4140 recubierto con un depósito de cromo duro*".
- 30.- M.A. Guitar; M, Duarte; D, Montero; S, Suarez; S, P, Bruhl; J, Cimetta y R, Charida.(2003)."*Comportamiento frente al desgaste y corrosión de un acero inoxidable AISI 304 Nitrurado por plasma*".
- 31.- Navas G, María C.(2007)" *Recubrimientos de NiCrBSi resistentes a la corrosión y al desgaste*". Tesis Doctoral..
- 32.- Pinto, N. y Rangel, A., (1999). "*Diseño, construcción y puesta a punto de una máquina para ensayo de abrasión según la norma ASTM G-65*", Trabajo Especial de Grado, Caracas, Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica.
- 33.- Quinn,T, Rowson,D y Sullivan,J., (1980). "*Applications of the oxidational theory of mild wear to the sliding wear of low alloy steel*". Wear. V.&%.
- 34.- Quinn,T.,Allen,C y Sullivan,J. (1985). "*The oxidational wear of high-chromium ferritic steel on austenitic stainless steel*" Journal Tribology. V.107.
- 35.- Q.Y. Hou, J.S. Gao, F. Zhou.(2004) "*Microstructure and wear characteristics of cobalt-based Alloy deposited by plasma transferred arc Weld surfacing.*".
- 36.- Rosenfield,A. (1981). "*Wear and fracture mechanics*". Fundamentals of Friction and Wear of Materials, Rigney,D.A. (Ed). A.S.M.
- 37.- Rosenfield,A. (1981). "*A dislocation theory approach to wear*" Wear.V.72.
- 38.- Rosenfield,A. (1981). "*Elastics-Plastic mechanics and wear*" Wear.V.72.
- 39.- Samuels,L., Doyle,E y Turley,D. (1981). "*Sliding wear mechanics*". Fundamentals of friction and Wear of materials, Rigney, D.A. (Ed.) A.S.M.
- 40.- Suh,N. (1973). "*The delamination theory of wear*". Wear. V.25.
- 41.- Tabor,D.(1973) "*Friction Mechanisms, effect of lubricants*" Tribology Handbook, Neale,M.J. (Ed.),Butterworth and Co. Sección F3.
- 42.- Tabor,c. (1977). "*Wear- A critical synoptic view*". Journal of lubrication Technology. V.99.

- 43.- Vera C, Edgar E.(2009).” *Desgaste por fatiga en deslizamiento y por contacto de rodadura en Aceros AISI 4320, 8320, 4140 y 01 base y con recubrimientos duros de TiN, CrN yWC/C*”..Tesis de Grado.
- 44.- Welsh, N. C., (1957), “*Structural changes in rubbed steel surfaces*” Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Conference on Lubrication and Wear, Londres. , pp. 701-706.
- 45.- Welsh, N. C., (1965), “*The dry wear of steel*”, Philosophical Transaction of Royal Society, V.257. , pp. 31-70.
- 46.- Wright, K. H. R., (1973).” *Mechanisms of wear*”, Tribology Handbook. Neale,M.J. (Ed.). Butterworth and co. Sección F6.