



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



Evaluación de las Propiedades Tribológicas en el Acero Dúplex

Medina, Luis.
Peralta, Gilberto.

Naguanagua, 01 de Noviembre del 2010



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



Evaluación de las Propiedades Tribológicas en el Acero Dúplex

Trabajo especial de grado presentado ante la Ilustre Universidad de Carabobo para optar al título de Ingeniero Mecánico

Tutor académico:
Jorge Romero. *MSc, Ing*

Autores:
Medina, Luis.
Peralta, Gilberto.

Naguanagua, 01 de Noviembre del 2010



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



Evaluación de las Propiedades Tribológicas en el Acero Dúplex

Trabajo especial de grado presentado ante la Ilustre Universidad de Carabobo para optar al título de Ingeniero Mecánico

Medina, Luis.
Peralta, Gilberto.

Naguanagua, 01 de Noviembre del 2010



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



CERTIFICADO DE APROBACIÓN

Quienes suscriben, Miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica para examinar la Tesis de Pregrado titulada "*Evaluación de las Propiedades Tribológicas en el Acero Dúplex*", presentada por los bachilleres: **Gilberto Peralta Rodríguez**, y **Luis Ignacio Medina Vásquez**, portadores de la Cédula de Identidad N°: **17.284.655**, y **17.615.943**, respectivamente; hacemos constar que hemos revisado y aprobado el mencionado trabajo.

Prof. Jorge Romero
Presidente del jurado

Prof. María L. Ochoa
Miembro del jurado

Prof. Javier Arruti
Miembro del jurado

En Naguanagua al primer día del mes de Noviembre de 2010.

Agradecimientos

Ante nada queremos agradecer a Dios por habernos guiado e iluminado para lograr culminar de forma exitosa nuestro Trabajo de Grado. Así mismo queremos expresar, sin tomar en consideración un orden específico, nuestro más sincero agradecimiento a nuestro tutor, el Profesor Jorge Romero, por sus consejos, guiatura y sugerencias oportunas durante el desarrollo de este trabajo de investigación. De igual manera agradecemos a los profesores, David Ojeda, Sandra Cabello, Juan Carlos Pereira y Luis Escalona, quienes en todo momento, durante el desarrollo de la investigación, estuvieron atentos y prestaron toda colaboración, orientación, guiatura y dirección académica para la realización de nuestro trabajo de grado. Asimismo queremos agradecer a nuestros padres que nos brindaron su apoyo desde el inicio de la carrera.

Resumen

El acero inoxidable Dúplex es uno de los aceros de más creciente aplicación dentro del campo de la ingeniería esto debido que combina una serie de propiedades mecánicas y anticorrosivas que lo hacen estar por encima del resto de los aceros inoxidables. Algunas de sus aplicaciones son: tanques de presión, tuberías, intercambiadores de calor, reactores, puentes, entre otros. (Mega Mex, 2010).

Sin embargo, una característica de los aceros dúplex poco investigada es su resistencia al desgaste y la fricción. En este proyecto se estudia el comportamiento tribológico del acero inoxidable dúplex SAF 2507. Los ensayos fueron realizados en un tribómetro que requirió su recuperación y modificación, disponible en el Laboratorio de Predicciones de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la UC. El ensayo de tribología consistió en un arreglo “*esfera sobre anillo*”, el cual es una modificación del procedimiento ASTM G-77. Este ensayo consiste en deslizar una esfera sobre un anillo a una cierta velocidad de deslizamiento durante un tiempo determinado. En nuestro caso la velocidad de deslizamiento fue de 3,1416 m/s, la cual permaneció constante durante todo el ensayo.

Para una velocidad fija, se han evaluado las cargas de: 17,1 N, 12,2 N y 7,3 N y las distancias de: 500 m, 2000 m y 5000 m. Esto representa un número de nueve ensayos, en el cual cinco fueron repetidos para verificar los valores obtenidos.

Los resultados muestran que existe una zona inicial con la distancia y un régimen estable en cada uno de los ensayos. Para este régimen se obtuvo un coeficiente de fricción de 0,44 y un coeficiente de desgaste de 0,00354.

SINOPSIS DEL PROYECTO DE GRADO

TITULO DEL TRABAJO

“EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES TRIBOLÓGICAS EN EL ACERO DÚPLEX”

FECHA DE APROBACIÓN DEL TG-II: 8 de febrero de 2010

FECHA DE EX. FINAL: 02 de Noviembre de 2010

FECHA DE ENTREGA DE EJEMPLARES DEFINITIVOS A DIRECCIÓN DE ESCUELA: 25 de Octubre de 2010

El acero inoxidable Dúplex es uno de los aceros de más creciente aplicación dentro del campo de la ingeniería esto debido que combina una serie de propiedades mecánicas y anticorrosivas que lo hacen estar por encima del resto de los aceros inoxidables. Algunas de sus aplicaciones son: tanques de presión, tuberías, intercambiadores de calor, reactores, puentes, entre otros. (Mega Mex, 2010).

Sin embargo, una característica de los aceros dúplex poco investigada es su resistencia al desgaste y la fricción. En este proyecto se estudia el comportamiento tribológico del acero inoxidable dúplex SAF 2507. Los ensayos fueron realizados en un tribómetro que requirió su recuperación y modificación, disponible en el Laboratorio de Predicciones de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la UC. El ensayo de tribología consistió en un arreglo “*esfera sobre anillo*”, el cual es una modificación del procedimiento ASTM G-77. Este ensayo consiste en deslizar una esfera sobre un anillo a una cierta velocidad de deslizamiento durante un tiempo determinado. En nuestro caso la velocidad de deslizamiento fue de 3,1416 m/s, la cual permaneció constante durante todo el ensayo.

Para una velocidad fija, se han evaluado las cargas de: 17,1 N, 12,2 N y 7,3 N y las distancias de: 500 m, 2000 m y 5000 m. Esto representa un número de nueve ensayos, en el cual cinco fueron repetidos para verificar los valores obtenidos. Los resultados muestran que existe una zona inicial con la distancia y un régimen estable en cada uno de los ensayos. Para este régimen se obtuvo un coeficiente de fricción de 0,44 y un coeficiente de desgaste de 0,00354.

CEDULA DE IDENTIDAD	NOMBRES	FIRMA
17.615.943	Medina, Luis	_____
17.285.655	Peralta, Gilberto	_____
	Tutor: Jorge Romero. <i>MSc, Ing</i>	_____

Índice general

Índice general	i
Índice de figuras	iv
Índice de tablas	v
Nomenclaturas	vi
Introducción	vii
CAPÍTULO 1. El Problema	1
1.1 Introducción	1
1.2 Situación problemática	2
1.3 Objetivos	3
1.3.1 Objetivo General	3
1.3.2 Objetivos Específicos	3
1.4 Justificación	3
1.5 Alcance	4
1.6 Limitaciones	4
CAPÍTULO 2. Marco Teórico	5
2.1 Introducción	5
2.2 Antecedentes	6
2.3 Fundamentos teóricos	7
2.3.1 Acero Dúplex	7
2.3.2 Tribología	9
2.3.3 Fricción	10
2.3.4 Leyes de fricción	11
2.3.5 Fricción por deslizamiento	13

2.3.6	Desgaste	13
2.3.7	Desgaste adhesivo	14
2.3.8	Ecuación de Archard	16
2.3.9	Ensayo espiga sobre disco	17
2.3.10	Ensayo espiga sobre anillo	19
CAPÍTULO 3. Marco Metodológico		20
3.1	Introducción	20
3.2	Nivel de investigación	21
3.3	Diseño de la investigación	21
3.4	Población y Muestra	22
3.5	Técnicas e instrumentos para la recolección de datos	23
3.6	Procedimiento experimental	23
3.7	Técnicas de procesamiento y análisis de datos	27
CAPÍTULO 4. Desarrollo Experimental		28
4.1	Introducción	28
4.2	Calibración de carga	29
4.3	Calibración de velocidad	31
4.4	Rugosidad	32
4.5	Ensayo "Esfera sobre Anillo"	34
4.5.1	Coefficiente de fricción	36
4.5.2	Coefficiente de desgaste	39
4.6	Validación de resultados contra los de aceros comunes y demás inoxidables	46
CONCLUSIONES		47
RECOMENDACIONES		49

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50
APÉNDICE	51
APÉNDICE A	52
APÉNDICE B	58
APÉNDICE C	72

Índice de Figuras

2.1 Diagrama de fuerzas	12
2.2 Fases del desgaste	15
2.3 Ensayo pin-on-disk	18
2.4 Ensayo pin-on-ring	19
4.1 Gráfica de calibración de carga	30
4.2 Pesas	30
4.3 Gráfica de Par Torsor sin Carga	32
4.4 Rugosímetro SJ-201 P	33
4.5 Arreglo ensayo "Esfera sobre anillo"	34
4.6 Equilibrio conjunto eje-motor-espécimen	36
4.7 Gráficas comparativas de μk vs distancia para todas las cargas	38
4.8 Geometría del desgaste	39
4.9 Vista frontal del anillo desgastado	40
4.10 Perfil de las probetas	42
4.11 Ubicación de la probeta en el perfilometro	42
4.12 Probeta 14, carga 17,1 N, 5000 m	43
4.13 Probeta 1, carga 12,2 N, 5000 m	43
4.14 Gráfica comparativa desgaste vs distancia para diferentes cargas	44
4.15 Gráfica comparativa k vs distancia para diferentes cargas	45
A1 Norma ASTM G-99	52
B1 Norma ASTM G-77	58
C1 Diseño del porta pin	72
C2 Cilindrado	73
C3 Perforado	74
C4 Taladrado	74
C5 Porta pin Vista 1	75
C6 Porta pin Vista 2	75

Índice de Tablas

2.1 Valor del coeficiente de fricción para algunos pares de superficie	11
3.1 Matriz de Ensayo	25
3.2 Matriz de eventos	26
4.1 Datos de calibración de carga	29
4.2 Datos de calibración de velocidad	31
4.3 Rugosidad de las muestras	33
4.4 Sistema Tribológico	35
4.5 Coeficiente de fricción	37
4.6 Coeficiente de desgaste	41

Nomenclatura

f	Fuerza de fricción [N]
μ	Coefficiente de fricción (adimensional)
N	Fuerza normal [N]
W	Peso [N]
θ	Ángulo de inclinación [rad]
V	Volumen de desgaste [m ³]
l	Longitud de deslizamiento [m]
H	Dureza [Pa]
k	Coefficiente de desgaste (adimensional)
T'	Par torsor de reacción del motor [Nm]
T	Par torsor entre los materiales [Nm]
T_f	Par torsor gastado en fricción de cojinetes y aire [Nm]
r	Radio de la esfera [m]
w	Ancho de huella [m]
R	Radio de huella [m]
D	Diámetro del anillo [m]
h	Altura de la huella [m]

Introducción

Actualmente, el acero dúplex es uno de los materiales con un significativo crecimiento en el campo de la ingeniería debido a sus excelentes propiedades mecánicas y anticorrosivas. Este crecimiento es principalmente a nivel estructural, tal como en la construcción de tanques presurizados, depósitos de productos químicos, puentes, pasarelas, reactores, entre otros. Sin embargo, existe poca información tribológica (fricción y desgaste) acerca de este material, lo cual limita su aplicación en áreas donde exista el contacto físico, tal como en el área de la biomecánica que involucra el diseño de prótesis y demás dispositivos de éste.

Es por ello, que el equipo de investigación ha decidido determinar el comportamiento tribológico de un acero dúplex SAF 2507. Esto incluye el cálculo del coeficiente de fricción y desgaste bajo diferentes condiciones de carga y distancia.

El contenido del trabajo de investigación está conformado por cuatro capítulos. El primero es el problema, en la cual se plantea la situación problemática y los objetivos de la investigación, el segundo es el marco teórico, donde se desarrolla la información tribológica necesaria para realizar esta investigación, el tercero es el marco metodológico, que explica con detalle, el diseño de la investigación y por último el desarrollo experimental en el que se presentan los resultados obtenidos mediante tablas y curvas con sus respectivos análisis.

Con este trabajo, se proporciona un nuevo inicio a la investigación tribológica, el cual traerá consigo otros proyectos en la Escuela de Ingeniería Mecánica.

CAPÍTULO 1

El problema

1.1 Introducción

En el presente capítulo se da a conocer la situación problemática que enmarca el trabajo de investigación, la cual se basa en la falta de información tribológica acerca del acero dúplex y la necesidad de realizar un ensayo que permita obtener los coeficientes de fricción y desgaste que predican el comportamiento de éste en condiciones de deslizamiento.

Así, el objetivo general del trabajo se basa en evaluar las propiedades tribológicas del acero dúplex con el propósito de generar nueva información acerca de éste y para lograrlo se deberá llevar a cabo, un conjunto de ensayos, mediciones y análisis que brinden la información necesaria para calcular los coeficientes de fricción y desgaste.

Es importante resaltar, que el interés en esta área, surge de la necesidad de elaborar partes biomecánicas, pero sin embargo, es necesario conocer como es su desempeño en el contacto sólido-sólido.

1.2 Situación problemática

Los aceros dúplex son una de las familias más importantes en los aceros inoxidables que están teniendo un significativo potencial de crecimiento. Esto debido a que combinan una serie de propiedades que los colocan a un nivel muy superior de los ya comúnmente utilizados, como son los aceros ferríticos y austeníticos. Su elevada resistencia mecánica lo convierte en uno de los más atractivos para el diseño de estructuras metálicas, ya que posibilita el uso de menores espesores permitiendo un ahorro de material y por consiguiente una reducción de costos en la ejecución de proyectos de ingeniería. A esto se suma una muy buena resistencia a la corrosión uniforme y localizada.

Hoy en día se están realizando muchas investigaciones acerca de los aceros dúplex, ya que todavía se desconocen algunas de sus propiedades. Un caso muy especial es en el área de la tribología, en la cual no se tiene suficiente información acerca de cómo es el comportamiento de este acero bajo condiciones de fricción y su efecto asociado como es el desgaste. Esto genera una limitante en el diseño y fabricación de mecanismos donde el contacto de metales en movimiento relativo es inevitable. Tal es el caso de las aplicaciones biomecánicas o de bioingeniería, como lo son la manufactura de algunas prótesis que presentan movimiento relativo entre las partes; y donde el acero dúplex podría ser un excelente material para la construcción de las mismas, debido a sus propiedades mecánicas, pero existe poca información sobre sus características tribológicas. Son estas características las que permiten tomar una decisión final acerca de su elección como material de fabricación en biotribología. En vista de ello, existe la necesidad de realizar ensayos tribológicos al acero dúplex para evaluar sus coeficientes de fricción y de desgaste.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Evaluar el comportamiento tribológico del acero dúplex.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Interpretar el fenómeno tribológico.
- Establecer condiciones para diseñar la investigación experimental.
- Medir el coeficiente de fricción por deslizamiento.
- Determinar el coeficiente de desgaste por adhesión.
- Validar los resultados contra los de aceros comunes y demás inoxidable.

1.4 Justificación

La tribología es una ciencia que tiene como gran potencial brindar el beneficio de economizar recursos financieros, materias primas y materiales energéticos. De aquí su enorme importancia en la industria estimulando las investigaciones en la fricción, la lubricación y el desgaste.

En las últimas décadas, la tribología se convirtió en una de las ciencias de más rápido desarrollo, eso lo confirma el incremento del número de cátedras universitarias creadas en tribología y las recomendaciones y medidas aplicadas por varios gobiernos de países desarrollados donde son considerados sus fundamentos.

La siguiente investigación permitiría emprender una nueva senda en este campo de la ingeniería en la Escuela de Mecánica de la Universidad de Carabobo, obteniendo un antecedente importante en el análisis tribológico del acero dúplex, el cual a pesar de tener diversas aplicaciones, todavía se desconoce su comportamiento

en ésta área. Por tanto, la misión a cumplir es generar información científica necesaria para dar a conocer las principales propiedades tribológicas del material en estudio, siendo ésta una información valiosa que puede ayudar en otras investigaciones que tengan como fin, reducir la fricción y desgaste.

1.5 Alcance

Medir el coeficiente de fricción y desgaste por adhesión en condiciones de deslizamiento sin la presencia de lubricantes, mediante desarrollo experimental considerando método normalizado de la ASTM. El material a evaluar será un acero dúplex SAF 2507 sin tratamiento térmico, bajo condiciones propias de un laboratorio.

1.6 Limitaciones

- Recursos económicos
- Referencias bibliográficas

CAPÍTULO 2

Marco Teórico

2.1 Introducción

Este capítulo proporciona una base teórica y sobre los antecedentes del estudio tribológico al acero dúplex, el cual presenta cada vez más aplicaciones en las diversas ramas de la industria, esto debido a una excepcional combinación de propiedades mecánicas y corrosivas que lo hacen más atractivo que los tradicionales aceros austeníticos y ferríticos. Aunado a esto se dará a conocer en una forma global y generalizada el fenómeno de la tribología, en la cual serán abordados los conceptos de fricción, desgaste y lubricación. Asimismo, se presentará una descripción breve y concisa de cada uno de los ensayos tribológicos referidos a la medición de los coeficientes de fricción y desgaste.

2.2 Antecedentes

Turkington (1980). Diseñó y construyó un tribómetro de precisión de objetivos múltiples, donde se pueden colocar en contacto deslizante dos especímenes, medir el coeficiente de fricción entre ellos, y obtener datos relativos a la tasa de desgaste en función de los parámetros que influyen en el proceso. La máquina fue construida en el laboratorio de tecnología mecánica de la Universidad de Carabobo.

Fernández (1981). Realizó el ensayo de roce de fricción de frenos, en el cual se presentaron dos procedimientos para el ensayo de roce, mediante la maquina Chase y el tribómetro. Con estas máquinas se puede medir el coeficiente de roce y la tasa de desgaste que existe en las muestras analizadas, poniéndolas en contacto con el elemento de freno (tambor o disco) en función de los parámetros que influyen en el proceso. El tribómetro usado fue diseñado en el laboratorio de tecnología mecánica de la Universidad de Carabobo donde le realizaron ajustes necesarios para el ensayo.

Ortega y Vilela (1984). Desarrollaron el estudio de lo que sucede entre dos piezas cuando existe movimiento relativo entre ellas. En este trabajo se observa el comportamiento del coeficiente de fricción bajo la acción de diferentes valores de fuerzas y velocidad de deslizamiento, así como también la posibilidad de obtener una expresión matemática basada en los diferentes resultados de los ensayos realizados o en su defecto tablas o gráficas en donde se pueda dar un valor del coeficiente de fricción en función de una variable determinada. Se ensayaron los siguientes materiales: Acero AISI 1020, Acero especial VCL 140, Bronce Fosforoso y Latón Amarillo, utilizando siempre los aceros como pieza móvil y el bronce y latón como pieza fija.

Szyndelman (2009). Estudió el comportamiento tribológico del acero inoxidable dúplex 2205. Una característica de los aceros dúplex poco investigada es su resistencia al desgaste. Para ello, se ha realizado su caracterización metalográfica y se han evaluado las características necesarias para complementar dicho estudio como la dureza, la densidad y la rugosidad superficial. A continuación, se han llevado a cabo los ensayos de tribología mediante la técnica de “*pin-on-disk*”. A partir de estos ensayos, se ha determinado la cinética del desgaste, y los tipos y mecanismos de desgaste en deslizamiento del acero inoxidable 2205. Los resultados obtenidos muestran que la cinética de desgaste depende de la velocidad de deslizamiento. Los tipos y mecanismos de desgaste dominantes evolucionan en función de la velocidad de deslizamiento y de la distancia recorrida, existiendo una zona de transición en la que disminuye la cinética de desgaste.

2.3 Fundamentos teóricos

2.3.1 Acero Dúplex (FastPack, 2010)

La denominación dúplex se aplica a un tipo de acero inoxidable, cuya composición química ha sido cuidadosamente ajustada para lograr una estructura cristalina mixta, de aproximadamente mitad de fase ferrita y mitad de fase austenita. Esto se logra incorporando a un acero ferrítico, una cantidad pequeña y controlada de níquel (a veces Mn y N). La aleación resultante presenta características mecánicas muy superiores a la de un acero inoxidable austenítico, permitiendo el uso de menores espesores, con el consiguiente ahorro de material y menor costo. A esto se suma una muy buena resistencia a la corrosión uniforme y localizada, como corrosión por picaduras (pitting), corrosión en grietas (crevice) y corrosión bajo tensión o cracking (SCC), en los casos más críticos de altas concentraciones de cloruro, presencia de

fuertes agentes reductores y presencia de sulfuro de hidrógeno. También poseen buena soldabilidad, si se utiliza la técnica adecuada.

La familia de los aceros inoxidable dúplex se puede dividir en tres grandes categorías: aceros dúplex sin molibdeno, aceros dúplex 22Cr (con 22% de cromo) y aceros dúplex 25Cr (con 25% de cromo). Los dúplex 22Cr han sido utilizados desde 1970 en las plataformas marinas, en la industria del petróleo. Desde fines de la década de los 80 los dúplex 25Cr (llamados superdúplex), de mayor resistencia mecánica, se han introducido gradualmente en ese campo.

El acero dúplex SAF 2507 pertenece al grupo de los aceros dúplex 25Cr o superdúplex con un 4% de molibdeno, 7% níquel y un 0,27 de nitrógeno. El mayor contenido de cromo, níquel y molibdeno le confiere una mayor resistencia a la corrosión uniforme y corrosión por picadura y grietas. Su resistencia mecánica también es superior ($S_u = 108$ Ksi). El dúplex 2507 es fácil de trabajar y soldar, tiene un bajo nivel de expansión térmica y es sugerido para aplicaciones de hasta 600 °F. Entre las aplicaciones de este acero, se pueden citar los siguientes ejemplos: equipos para desalinización, partes para proceso químico como tanques de presión, tubería e intercambiadores de calor, aplicaciones marinas, equipos de limpieza de gases de combustión, equipos de fábrica de pulpa y papel, equipos para la industria petrolera y gas natural.

La principal razón para evolucionar hacia los aceros dúplex es el costo. Su menor porcentaje de níquel (un elemento caro) y una mayor resistencia mecánica, que permiten ahorrar hasta un 25% en peso, reducen el costo de la instalación. Otra razón es su superior resistencia a la corrosión localizada.

2.3.2 Tribología

En (Romero, 2008) se define como la ciencia y la tecnología que involucra las superficies interactuantes en movimiento relativo y todos los tópicos y prácticas conexas. Comprende el estudio de la fricción, el desgaste y la lubricación con el propósito de entender en detalle la interacción del contacto entre las superficies y prescribir mejoras a una aplicación determinada.

El trabajo del tribologista o tribólogo es interdisciplinario, involucrando aspectos de las ciencias puras como física, química, de la ingeniería como mecánica, termodinámica y de la ciencia de los materiales (metalurgia). La naturaleza interdisciplinaria de la tribología conduce a la tendencia general, por ejemplo, para el químico describir en detalle los aditivos lubricantes; o para el ingeniero mecánico a discutir sobre los cojinetes de empuje, sin una guía global al asunto, el control de la fricción y el desgaste. El punto de vista interdisciplinario de la tribología ha probado ser la manera más exitosa de analizar los problemas de fricción y desgaste (Cameron, 1981).

Su aplicación fundamental es en el diseño, la manufactura y el mantenimiento. Su propósito es optimar la eficiencia de la energía, la vida útil y confiabilidad de equipos y maquinarias.

Sin tribología no existiría nada. Todo lo que se mueve forma parte de un sistema tribológico.

En (Hamrock, 2000) la tribología se define como el estudio de la lubricación, la fricción y el desgaste de partes móviles o estacionarias. Esta ciencia tiene una función importante en la vida de los elementos de máquinas, ya que las consideraciones tribológicas deben ser apropiadamente comprendidas para que dichos elementos se diseñen con total éxito. Por lo tanto, la comprensión de la fricción y diferentes mecanismos de desgaste es necesario para hacer la selección correcta de los

materiales, recubrimientos, tratamientos superficiales, lubricantes, y las condiciones de funcionamiento para una aplicación dada.

2.3.3 Fricción (Romero, 2008).

La fricción se considera como la fuerza que resiste el movimiento relativo entre dos superficies en contacto directo (ley natural). La misma se origina por efecto de las rugosidades de las superficies en contacto. Existen dos tipos de fricción: estática y dinámica. Cuando la velocidad de deslizamiento es cero, la fuerza de fricción requerida para iniciar el deslizamiento es conocida como fricción estática, mientras la fricción dinámica es la medida de la fuerza requerida para mantener el movimiento. Asimismo, existen otros tipos de fricción: La fricción sólida y la fricción fluida. En la fricción sólida hay contacto metal-metal completo y apreciable desgaste. Se distinguen dos tipos: la fricción por deslizamiento y la fricción por rodamiento.

En los contactos rodantes y deslizantes se necesita una fuerza tangencial f en la dirección del movimiento, para mover al cuerpo superior sobre el estacionario. La razón entre la fuerza tangencial y la carga normal aplicada N se conoce como el coeficiente de fricción y es:

$$\mu = \frac{f}{N} \quad (2.1)$$

Éste es dependiente de la naturaleza de las superficies en contacto y de las variables operacionales (carga, velocidad y temperatura). Tanto para la fricción sólida como para la fricción fluida se cumple que: $\mu_{\text{estático}} > \mu_{\text{dinámico}}$.

Nota: La fricción fluida no es punto de investigación en este trabajo.

En la literatura se pueden ubicar valores característicos de algunos coeficientes de fricción estático y dinámico para pares de superficies en contacto, como se muestra en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Valor del coeficiente de fricción para algunos pares de superficie (Kajdas, et al, 1990)

Superficies	Estático	Dinámico
Vidrio-Vidrio	0,94	0,4
Acero-Acero	0,74	0,57
Níquel-Níquel	1,1	0,53
Aluminio-Aluminio	1,05	1,4
Cobre-Vidrio	0,68	0,53
Cobre-Acero	0,53	0,36

2.3.4 Leyes de fricción (Hamrock, 2000).

Las tres leyes de la fricción se enuncian simplemente como sigue:

1. La fuerza de fricción es proporcional a la carga normal.
2. La fuerza de fricción no depende del área aparente de los sólidos en contacto, es decir, es independiente del tamaño de los sólidos.
3. La fuerza de fricción es independiente de la velocidad de deslizamiento.
4. La fricción varía según la naturaleza de las superficies en contacto.

Estas leyes son aplicables a la mayoría de las condiciones de deslizamiento en ausencia de lubricante.

La primera ley de la fricción fue presentada por Leonardo da Vinci, y afirma que la fuerza requerida para iniciar o mantener el deslizamiento f es proporcional a N , la fuerza normal.

$$f = \mu N \quad (2.2)$$

Para una situación en la que un cuerpo se desliza sobre una superficie inclinada con un ángulo de inclinación de θ (ver figura 2.1), la ley anterior, podrán ser tomados en términos de ángulo constante de reposo o ángulo de fricción como θ

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

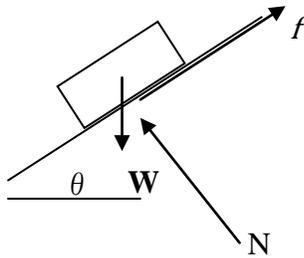


Figura 2.1 Diagrama de fuerzas (Medina y Peralta, 2010)

Donde:

$$f = W \sin \theta \quad (2.4)$$

$$N = W \cos \theta \quad (2.5)$$

$$\mu = \frac{f}{N} = \tan \theta \quad (2.6)$$

La segunda ley de los Estados de fricción indica que, la fuerza de fricción f es independiente de la superficie aparente de contacto A_a . Así, un ladrillo puede deslizarse tan fácilmente en su lado como en su base.

Coulomb introdujo una tercera ley, la cual establece que la fricción es independiente de la velocidad de deslizamiento. Esto implica que, la fuerza necesaria para iniciar el deslizamiento será la misma que, la fuerza necesaria para mantener la velocidad de deslizamiento en cualquier momento determinado, que generalmente no es cierto. Se ha comprobado experimentalmente que las dos primeras leyes de la fricción se cumplen en rangos de condiciones. Sin embargo, una serie de excepciones notables existen.

2.3.5 Fricción por deslizamiento (Kajdas, et al, 1990).

La fricción entre las superficies de deslizamiento se debe a los diversos efectos combinados de la adhesión entre la superficie de la placa, el arado por las partículas de desgaste, la aspereza de las superficies duras y la deformación de aspereza. La contribución relativa de estos componentes depende del material específico, la topografía de la superficie, las condiciones de deslizamiento de interfaz y el medio ambiente.

2.3.6 Desgaste (Kajdas, et al, 1990)

Desde hace mucho tiempo se ha reconocido al desgaste como el proceso más importante y usualmente perjudicial en los elementos de máquinas; sin embargo, los estudios del fenómeno del desgaste comenzaron relativamente en tiempos recientes.

El desgaste se puede considerar como la pérdida progresiva de material en la superficie de operación de un cuerpo, que ocurre como resultado de los efectos de la carga y del movimiento relativo en la superficie. El desgaste se clasifica de acuerdo

con la naturaleza física del proceso subyacente, como la abrasión, la adhesión y la fatiga.

2.3.7 Desgaste adhesivo (Kajdas, et al, 1990)

El desgaste adhesivo es la transferencia de metal de una superficie en contacto hacia otra. Ocurre cuando altas cargas, alta temperatura o alta presión hacen que las asperezas de las dos superficies metálicas, en movimiento relativo, entren en contacto, se suelden e inmediatamente se separen, rompiendo el metal en pequeñas y minúsculas secciones.

La superficie puede quedar áspera y dentada o relativamente suave debido al desplazamiento/deformación del metal. El metal es transferido de una superficie a otra. La adhesión ocurre en los regímenes de lubricación mixta o límite debido al poco abastecimiento de aceite, a una viscosidad inadecuada, a unas incorrectas tolerancias internas, a una instalación incorrecta o a desalineación. Esto puede ocurrir en anillos y cilindros, cojinetes y engranajes.

El desgaste durante el periodo inicial de asentamiento es una forma de desgaste suave, como hojuelas. El rayado generalmente se refiere como un desgaste adhesivo moderado, mientras que el raspado, desplazado y agarrotado resultan de una adhesión severa. La adhesión puede ser prevenida disminuyendo las cargas, evitando las cargas de choque y asegurando que se esté utilizando el aceite con el grado de viscosidad correcto. Si es necesario, se pueden utilizar aceites con aditivos extrema presión (EP) y antidesgaste (AD o AW) para reducir el daño a las superficies.

El desgaste adhesivo se denomina a menudo irritante o de rasguños, aunque estos términos a veces se utilizan para referirse a otros tipos de desgaste. Los procesos de desgaste adhesivo son iniciados por las uniones adhesivas de la interfase

que se forman cuando los materiales sólidos son el contacto a escala atómica. Como una carga normal se aplica, la presión local en las asperezas se convierte en extremadamente alta. En algunos casos, el límite de elasticidad es excedido, y las asperezas generan deformación plástica hasta que el área de la zona de contacto se ha incrementado lo suficiente para soportar la carga aplicada.

El comportamiento del desgaste de una superficie en función de la distancia se puede apreciar en la figura 2.2.

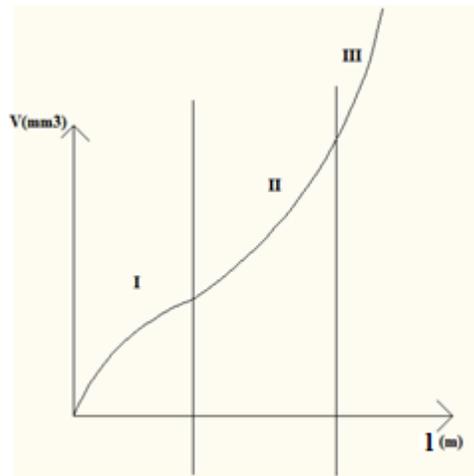


Figura 2.2. Fases del desgaste (Czichos, 1986)

Donde:

V = volumen de desgaste, $[\text{mm}^3]$

l = distancia de deslizamiento, $[\text{m}]$

En la figura 2.2 se pueden apreciar tres diferentes zonas, se tiene que en la zona I en la cual el desgaste en la superficie es pequeño y apenas se comienza a rayar en el material, en la fase II ya el desgaste es medio y se logra apreciar una huella y en

la fase III el desgaste es severo y se aprecia una huella perfecta. Este comportamiento se aplica a cualquier superficie.

Nota: Es importante resaltar que además del desgaste adhesivo, existen muchas otras formas de desgaste tales como: desgaste abrasivo, desgaste por corrosión, desgaste por fatiga, entre otros. Para mayor información refiérase al trabajo “Lubricación y Lubricantes” (Romero, 2008)

2.3.8. Ecuación de Archard (Romero, 2008)

La ecuación propuesta por John Frederic Archard en 1953 es una técnica que es usada muy a menudo, pero aplica a sistemas en deslizamiento y no para sistemas en rodamiento.

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

Donde:

V = Volumen de desgaste, [m³]

k = Coeficiente de desgaste

W = Carga, [N]

l = Distancia de deslizamiento, [m]

H = Dureza del material más suave, [Pa]

La ecuación predice que el volumen de desgaste V , es directamente proporcional a la distancia de deslizamiento L , y la carga W . Ésta permite que la característica de la dureza del material H , de un sistema se compare con otro sistema de control.

El coeficiente de desgaste k es útil para estimación de la vida de servicio bajo condiciones de carga y cantidad de deslizamiento. Éste se evalúa en un ensayo de desgaste estándar para el material dado. El valor de k se supone que no debe exceder la unidad.

Esta ecuación tiene limitaciones, por ejemplo, no toma en consideración otras propiedades aparte de la dureza y no predice el fenómeno de desgaste inicial. Tampoco considera los efectos de la velocidad, lubricación o la presión de contacto. Pero con sus limitaciones, la ecuación es muy útil si se reconocen las influencias de otros efectos y se toma juiciosamente los datos derivados de la data experimental para compensar sus limitaciones.

2.3.9 Ensayo espiga sobre disco (ASTM International, 1996)

El ensayo espiga sobre disco (pin – on – disk) es un procedimiento de prueba común (ASTM G-99), utilizado para medir el coeficiente de desgaste por deslizamiento de un determinado material. Este es un ensayo de desgaste adhesivo y se lleva a cabo en un tribómetro, el cual consiste en un aparato mediante el cual se puede medir variables o parámetros relacionados con lubricación, fricción o desgaste, así como cualquier variación de estos en función de algún parámetro que se considere de importancia.

Para el ensayo se requieren de dos especímenes: una espiga (*Pin*) y un disco (*Disk*). La espiga se construye de un determinado material que puede ser carburo de tungsteno, óxido de aluminio, zafiro, acero inoxidable, etc., mientras que el disco es del material a ensayar. Accionando el disco y empujando la espiga contra él se simula una situación de deslizamiento. En la figura 2.3 se observa una ilustración del ensayo.

El desgaste sobre el disco se mide con un microscopio que los fabricantes de herramientas utilizan, midiendo el tamaño de la marca del desgaste y aplicando la ecuación respectiva. Para el caso de un pin esférico el volumen perdido [mm^3] se calcula mediante la ecuación 2.8:

$$V = \frac{\pi \times (\text{Radio huella de desgaste, mm}) \times (\text{Ancho huella, mm})^3}{6 \times (\text{radio de la esfera, mm})} \quad (2.8)$$

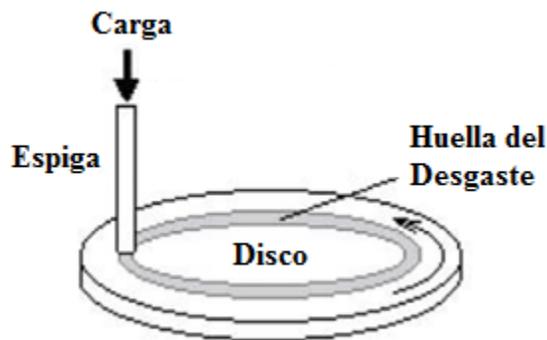


Figura 2.3. Ensayo Pin-On-Disk (Marcia y Deniol, 2006)

Para mayor información acerca de este ensayo refiérase al apéndice A donde puede encontrar la norma ASTM G-99.

2.3.10 Ensayo espiga sobre anillo (ASTM International, 1999)

El ensayo espiga sobre anillo (pin-on-ring) es una de las configuraciones comunes de investigación tribológica en materiales, recubrimientos y lubricantes. Para la medición de la fricción se tienen en cuenta los siguientes factores: carga, velocidad, tiempo y temperatura. Consiste en un ring o anillo y una espiga que en nuestro caso será una esfera, en la cual esta última presiona el ring que gira a una cierta velocidad constante. Las dimensiones del contacto dependen del pin: contacto puntual, contacto lineal y contacto conforme. Es aplicable a contactos secos y lubricados. El ring siempre debe estar rotando en una dirección constante. Este ensayo sigue la norma ASTM G-77 con la modificación de que esta es referida a un “bloque sobre anillo”, pero se sigue el mismo principio. La figura 2.4 muestra una ilustración del ensayo.



Figura 2.4. Ensayo Pin- On- Ring. (Tribology-ABC, 2010)

Para mayor información acerca de este ensayo refiérase al apéndice B, donde puede encontrar la norma ASTM G-77.

Es importante acotar que existen muchas variantes y configuraciones en los ensayos tribológicos. Por ejemplo en los ensayos explicados anteriormente, el pin no necesariamente tiene que ser cilíndrico, puede ser con forma de esfera o bloque. De allí las modificaciones “esfera sobre disco”, “esfera sobre anillo”, “bloque sobre anillo”, etc.

CAPÍTULO 3

Marco Metodológico

3.1 Introducción

La metodología del trabajo de grado incluye principalmente el ensayo tribológico sobre el acero dúplex 2507 que nos va permitir obtener la información necesaria para cumplir con el objetivo general propuesto. Es importante resaltar que en todo momento la investigación es experimental, exploratoria y descriptiva. El ensayo tribológico se llevará a cabo mediante un tribómetro que busca simular el ensayo “Esfera sobre anillo” (ASTM G-77 modificado) y así determinar el coeficiente de fricción y desgaste en el material a ensayar mediante métodos normalizados ASTM.

3.2 Nivel de Investigación

El presente trabajo de grado se basa en dos niveles investigativos: *exploratorio* y *descriptivo*. Es exploratorio ya que se debe indagar acerca del fenómeno tribológico, es decir, estudiar a fondo el proceso de fricción y de desgaste. Así mismo se debe conocer acerca del ensayo tribológico a realizar (Esfera sobre anillo) que involucra el procedimiento para determinar el coeficiente de fricción y las ecuaciones que deben ser usadas siguiendo las normas ASTM G-77 y G-99 para determinar el coeficiente de desgaste.

Por otra parte la investigación es descriptiva ya que una vez realizado el ensayo, se debe presentar cada uno de los resultados obtenidos, específicamente el valor numérico del coeficiente de fricción así como el coeficiente de desgaste para un acero dúplex SAF 2507.

3.3 Diseño de la investigación

En este caso la investigación es un diseño netamente *experimental*, basado en un ensayo tribológico el cual deberá efectuarse en las condiciones propias de un laboratorio. Se dispondrá a realizar el ensayo tribológico haciendo uso de un tribómetro recuperado y acondicionado por el equipo de investigación y que actualmente está disponible en el Laboratorio de Predicciones de la Escuela de Ingeniería Mecánica. Con éste se va a llevar a cabo un ensayo “Esfera sobre anillo” que es una modificación del ASTM G-77, ya que en este caso es una esfera la que hace contacto con el anillo y no un bloque como lo indica originalmente la norma.

Para simular el ensayo en esta máquina fue necesario el diseño de un porta pin esférico, ya que la máquina venía diseñada originalmente para un ensayo block on ring (bloque sobre anillo). Aunado a esto, fue necesario la construcción de un porta

pesas, cambios de rodamientos, mecanizado del eje de la máquina, entre otros mantenimientos que permitieron llevar a cabo la puesta punto de ésta.

Para más información acerca de los ajustes realizados a la máquina refiérase al Apéndice C.

Así pues se busca determinar el coeficiente de fricción por deslizamiento y el coeficiente de desgaste del acero en cuestión. El coeficiente de fricción se va a determinar mediante las curvas de calibración del tribómetro (carga y velocidad), mientras que el coeficiente de desgaste se calcula apoyados en las normas ASTM G-77 y G-99.

El ensayo experimental con el acero dúplex es la estrategia que se tiene para lograr resolver el problema planteado inicialmente, tal como es la falta de información tribológica acerca de este acero.

3.4 Población y muestra

En la presente investigación la población está representada por cada uno de los aceros dúplex presentes en el mercado. Sin embargo, el equipo de investigación ha decidido trabajar en particular con el acero dúplex SAF 2507 (súper dúplex), el cual representa una muestra de la familia de aceros dúplex existentes. Para la elaboración de los ensayos se va utilizar un total de 14 probetas.

Es importante resaltar que se tomo una pequeña cantidad de muestras en vista de los limitantes recursos económicos por el equipo de investigación, aunque lo ideal sería utilizar una mayor cantidad de muestras para así lograr resultados más confiables.

3.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

La data experimental será obtenida mediante la elaboración del ensayo tribológico “Esfera sobre anillo”. En el caso del coeficiente de fricción es necesario la construcción de dos curvas: la curva de calibración y la de par torsor sin carga. Mediante las mismas y las respectivas ecuaciones de la mecánica racional será calculado su valor. En lo que respecta al coeficiente de desgaste, la técnica de recolección de datos será a través de la tabulación de cada una de las dimensiones de las huellas de desgaste en las probetas ensayadas, las cuales serán obtenidas con la ayuda de perfilometro. Una vez recolectadas las dimensiones, con la ayuda de las normas ASTM G-77, G-99 y las ecuaciones de desgaste adhesivo será calculado respectivamente el volumen perdido y el coeficiente de desgaste.

3.6. Procedimiento experimental

El procedimiento experimental para determinar el coeficiente de fricción y desgaste es mediante el ensayo “esfera sobre anillo”, que ha sido diseñado por (Medina y Peralta, 2010) con apoyo de la metodología de Turkington y de las normas ASTM G-77 y G-99.

A continuación se explica paso a paso el procedimiento empleado:

1. Para determinar la fuerza de fricción será mediante dos curvas experimentales (curva de calibración de carga y velocidad), las cuales deben construirse a partir de datos obtenidos de ensayos preliminares. Básicamente estas curvas relacionan la deflexión de una viga (placa metálica de sección rectangular) contra las cargas aplicadas a un motor y las rpm que este puede generar respectivamente. Para la curva de calibración de carga se deben colocar diferentes

cargas y medir a través de un reloj comparador la deflexión de la viga para cada carga. Con respecto a la curva de calibración de velocidad (par torsor sin carga) se debe variar la velocidad del motor y anotar la deflexión de la viga para cada velocidad. (Turkington, 1980).

2. Se mide la rugosidad de cada uno de las probetas para verificar que cumplan con la norma ASTM G-77. (ASTM G-77, 1999)

3. Se construye la matriz de ensayo y eventos. Aquí se seleccionan las variables que se van a controlar durante el ensayo y sus respectivos valores. Más adelante se muestra las matrices utilizadas por el equipo de investigación.

4. Se realiza el ensayo “esfera sobre anillo”, colocando los anillos (espécimen móvil) sobre el eje de la máquina y la esfera (espécimen fijo) en el porta pin. Se anota el valor inicial del reloj comparador y luego se enciende la máquina y comienza a deslizar el anillo respecto a la esfera. Durante el ensayo se miden los valores del reloj comparador para distintos tiempos y finalmente se toma un promedio que será el valor final del reloj comparador. Éste valor restado del valor inicial indica la deflexión de la viga para la distancia de deslizamiento ensayada. (Turkington, 1980) y (ASTM G-77 modificado)

5. Con apoyo de las curvas de calibración y de la deflexión medida en el ensayo para las diferentes probetas (14), se pudo determinar el valor del torque entre los dos especímenes, sabiendo que este es la diferencia entre el par torsor de reacción indicado por la viga calibrada (T') y el par gastado en fricción de cojinetes y debido al aire (T_f). Conocida la deflexión, se puede conocer la carga mediante la curva de calibración y junto al radio del eje se calcula el valor de T' . Mientras que T_f se determina con el valor de la velocidad de giro (2000 rpm), mediante la curva de par torsor se obtiene la deflexión y luego con la de calibración se obtiene la carga que

junto al radio del eje define directamente el valor. Una vez obtenido el par torsor, el cálculo de la fuerza de fricción es directo, conociendo el radio del anillo. Finalmente, el coeficiente de fricción es determinado mediante la relación entre la fuerza de fricción y la carga normal que viene dada por las cargas aplicadas en el ensayo. (Turkington, 1980)

6. En relación al desgaste, una vez realizados los ensayos, es preciso medir cada una de las dimensiones de las huellas dejadas por la esfera mediante un perfilometro y que nos van a permitir obtener el volumen de desgaste en el acero mediante la ecuación que se verá más adelante en el capítulo 4 y que junto a la ecuación de Archard (2.7), se podrá determinar finalmente el coeficiente de desgaste en el acero dúplex. (ASTM G-99)

La matriz de ensayo se va a construir en función de tres variables, carga, velocidad de deslizamiento y distancia de deslizamiento.

Se cuenta con un total de 14 probetas, para la cual se deben realizar 9 ensayos con 5 repeticiones cumpliendo con el porcentaje de repetitividad del 50 % (Lee et al, 2005) asegurando así la confiabilidad de los valores obtenidos. En este caso la matriz estará conformada por tres cargas y tres distancia de deslizamiento controlado a una velocidad fija por medio de un reóstato. El valor de las cargas y las distancias se detalla a continuación:

Tabla 3.1. Matriz de ensayo (Peralta y Medina, 2010)			
CARGAS (N)	7,301	12,201	17,101
DISTANCIA (m)	500	2000	5000
VELOCIDAD (m/s)	3,1416		

A partir de la matriz de ensayo se puede construir la matriz de eventos a realizar, esta se observa en la siguiente tabla:

Tabla 3.2. Matriz de eventos (Peralta y Medina, 2010)				
EVENTOS	CARGA (N)	DISTANCIA (m)	VELOCIDAD (m/s)	TIEMPO (min)
1	17,1	500	3,1416	2,7
2	17,1	2000	3,1416	10,6
3	17,1	5000	3,1416	26,5
4	12,2	500	3,1416	2,7
5	12,2	2000	3,1416	10,6
6	12,2	5000	3,1416	26,5
7	7,3	500	3,1416	2,7
8	7,3	2000	3,1416	10,6
9	7,3	5000	3,1416	26,5
10	17,1	500	3,1416	2,7
11	12,2	5000	3,1416	26,5
12	17,1	2000	3,1416	10,6
13	12,2	500	3,1416	2,7
14	7,3	2000	3,1416	10,6
total min				172,4
HORAS				2,9

En función de las distancias de deslizamiento y las RPM a la cual gira el motor, se calcula la duración de cada uno de los ensayos. El tiempo será tomado desde que se enciende el motor para realizar la prueba.

El espécimen a ensayar pertenece al grupo de los aceros dúplex 25Cr (25% cromo y 7 % Níquel) o superdúplex con un 4% de molibdeno y un 0.27% de nitrógeno. El mayor contenido de cromo, níquel y molibdeno le confiere una mayor resistencia a la corrosión uniforme y corrosión por picadura y grietas, en ambientes de cloruro. Su resistencia mecánica también es superior ($S_u=108\text{ksi}$). Si es recocido (1050-1125°C) y templado la aleación contiene 30-50% de fase ferrita y el resto es austenita.

3.7 Técnicas de procesamiento y análisis de datos

Las técnicas de recolección de datos serán mediante el empleo de tablas y curvas. En el caso del coeficiente de fricción, este se determina a partir de los datos y curvas obtenidas del tribómetro. Estos datos una vez obtenidos serán comparados con los de otros aceros inoxidable y analizados respectivamente. En lo que se refiere al ensayo pin-on-ring, se tiene que mediante la huella de desgaste en el ring y con el radio de curvatura del pin se logra obtener la tasa de desgaste, la cual será sustituida en la ecuación de desgaste por adhesión y posteriormente despejar así el coeficiente de desgaste. Una vez obtenido el coeficiente de desgaste, este será comparado con el de otros aceros estudiados tribológicamente y se lograra predecir el comportamiento de este acero ante condiciones de fricción y desgaste. En todo momento, será empleado el análisis estadístico para conocer la fiabilidad de los datos.

CAPÍTULO 4

Desarrollo Experimental

4.1 Introducción

En el presente capítulo se da a conocer cada uno de los resultados del ensayo tribológico tales como curvas, tablas y demás valores que junto a los diferentes métodos normalizados ASTM y demás ecuaciones conducen al cumplimiento de cada uno de los objetivos de esta investigación. En términos generales, se presentan las curvas de calibración, rugosidad de las muestras, condiciones de ensayo y demás resultados de fricción y desgaste del acero dúplex SAF 2507.

4.2. Calibración de carga

La calibración de carga (figura 4.1) consiste en obtener una curva de carga (N) vs deflexión de la viga (mm). Para ello se deben ir colocando las diferentes cargas incluyendo el porta pesas e ir registrando el valor de la deflexión para cada peso. Este procedimiento se realiza con el motor apagado. Los valores registrados se encuentran en la tabla 4.1:

Tabla 4.1. Datos calibración de carga
(Medina y Peralta, 2010)

CARGA (N)	CARGA (gf)	VALOR RELOJ	DEFLEXIÓN (mm)
0	0	2,2	0
2,401	245	2,56	0,36
4,361	445	2,85	0,65
6,321	645	3,19	0,99
7,301	745	3,4	1,2
9,261	945	3,68	1,48
12,201	1245	4,26	2,06
14,161	1445	4,63	2,43

Para el cálculo de la deflexión se utilizó un reloj comparador (marca MITUTOYO, apreciación de 0,01 mm y un rango de 0-9 mm), el cual se coloca haciendo contacto el vástago del mismo a la viga. A medida que la viga sufre deflexión por efecto de las cargas, el vástago del reloj se extiende registrando el valor en mm. Este valor se resta del valor inicial registrado sin cargas y se obtiene la deflexión de la viga.

En la figura 4.1 se puede apreciar que existe una relación prácticamente lineal entre la carga y la deflexión. Esto indica que son valores directamente proporcionales. A partir de esta curva será posible determinar el coeficiente de fricción como se verá más adelante.

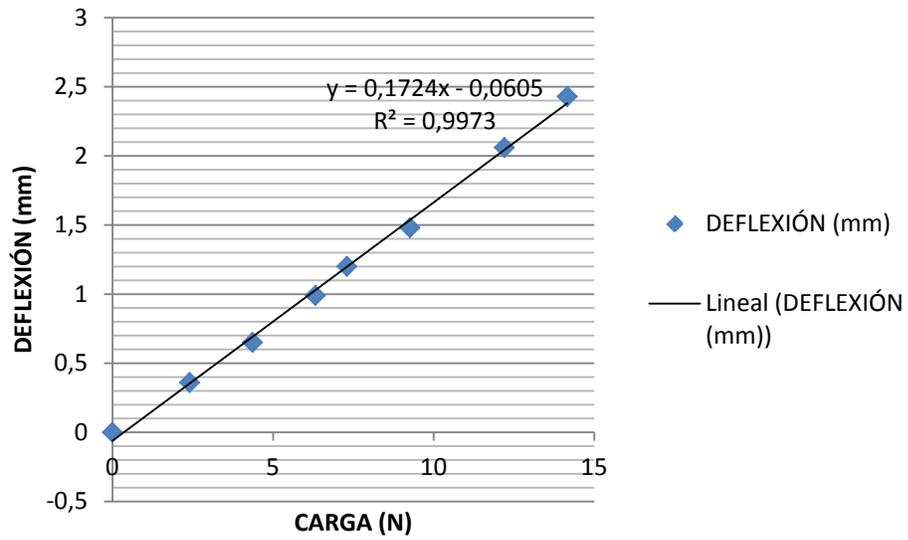


Figura 4.1. Gráfica de calibración de carga (Medina y Peralta, 2010)

Para la calibración de la máquina se utilizaron pesas de los siguientes valores: 200 g, 500 g y 1000 g. Esto se puede apreciar en la figura 4.2:

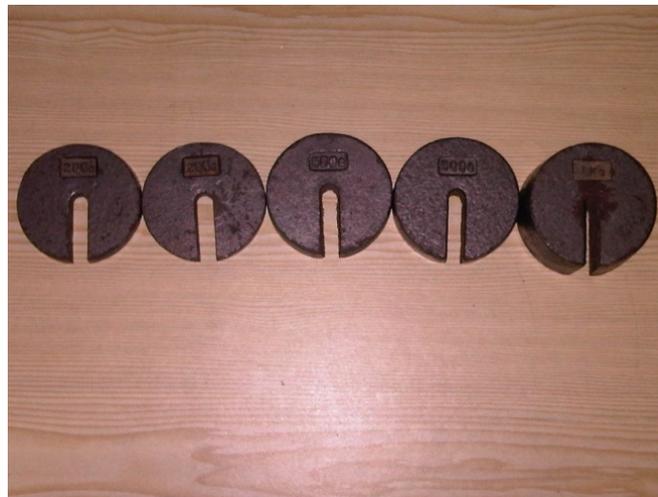


Figura 4.2. Pesas (Medina y Peralta, 2010)

4.3. Calibración de velocidad

La calibración de velocidad consiste en obtener una curva de par torsor sin carga. Ésta se obtiene midiendo la deflexión de la viga (mm) a diferentes RPM. Para ello es necesario variar la velocidad de la máquina mediante una variación de voltaje, lo cual se consigue a través de una fuente de poder variable. En nuestro caso, en el Laboratorio de Predicciones no se disponía al momento de los ensayos de este tipo de fuente por lo cual se requirió de los servicios del Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la escuela de Ingeniería Eléctrica de la UC.

Los datos registrados se presentan en la tabla 4.2:

Tabla 4.2 Datos calibración de velocidad
(Medina y Peralta, 2010)

RPM	VALOR INICIAL	DEFLEXIÓN (mm)
0	4,31	0
500	4,4	0,09
1000	4,5	0,19
1500	4,55	0,24
2000	4,6	0,29
2500	4,65	0,34
3000	4,7	0,39
3500	4,73	0,42

Para la calibración de velocidad fue utilizada una fuente de poder variable, un tacómetro digital, voltímetro y amperímetro. Igualmente es importante acotar que los valores obtenidos en la tabla 4.2 llevan consigo un cierto grado de incertidumbre o error ya que durante la calibración de velocidad, las vibraciones del motor hacen que la aguja del reloj comparador fluctúe de forma rápida y sea más difícil la obtención del valor. En figura 4.3 se observa la curva de par torsor sin carga.

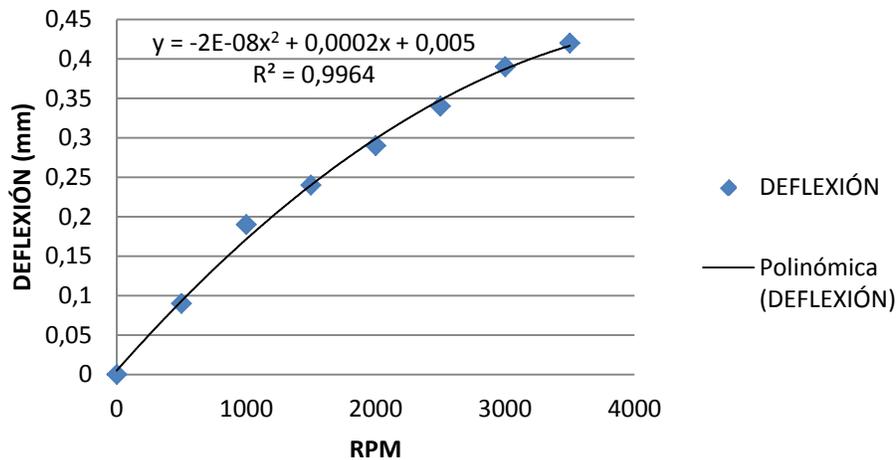


Figura 4.3. Gráfica de par torsor sin carga (Medina y Peralta, 2010)

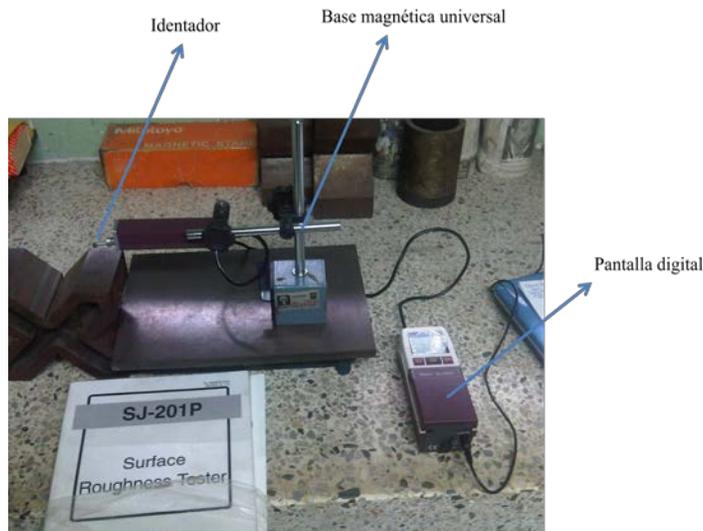
4.4. Rugosidad

Para el ensayo esfera sobre anillo, es preciso disponer la rugosidad indicada ($0,952 \mu\text{m}$) ya que el coeficiente de fricción y desgaste es un valor que depende de la topografía del material. Por tanto, mientras mejor sea el acabado de la pieza más confiables serán los resultados obtenidos. Para ello, fue utilizado un rugosímetro marca MITUTOYO, modelo SJ-201P como se aprecia en la figura 4.4. El recorrido del identador fue en la dirección del ensayo, es decir, a través de arcos de circunferencia y la distancia recorrida por el mismo fue de $0,25 \text{ mm}$. Para obtener valores confiables se realizaron tres mediciones de la rugosidad (R_a) en distintas zonas de cada probeta y luego se determinó el promedio. Los datos obtenidos se observan en la tabla 4.3:

Tabla 4.3. Rugosidad de las muestras (Medina y Peralta, 2010)

MUESTRA	R _a (μm)	R _a (μm)	R _a (μm)	R _a promedio
1	0,39	0,25	0,36	0,33
2	0,34	0,3	0,35	0,33
3	0,45	0,3	0,42	0,39
4	0,33	0,3	0,4	0,34
5	0,52	0,3	0,42	0,41
6	0,35	0,99	0,67	0,67
7	0,35	0,68	0,44	0,49
8	0,42	0,41	0,58	0,47
9	0,34	0,84	0,61	0,60
10	0,45	0,71	0,6	0,59
11	0,59	0,43	0,7	0,57
12	0,52	0,62	0,48	0,54
13	0,35	0,75	0,65	0,58
14	0,71	0,56	0,58	0,62
Promedio				0,50
Desv. Estándar				0,12

De acuerdo a la norma ASTM G-99 y G-77, el valor máximo de rugosidad indicado en el material debe ser hasta de 0,952 μm. Así pues de esta manera, se puede verificar que cada una de las probetas cumple con la rugosidad requerida para realizar el ensayo.



4.5. Ensayo “Esfera sobre anillo”

El arreglo del ensayo consistió en colocar el motor de la máquina en serie con un reóstato, una fuente de poder y un regulador de voltaje. El motor de la máquina es un motor de corriente continua con un voltaje de 12 voltios, un amperaje máximo de 25 Amperios y una velocidad máxima de 3500 RPM. La fuente de poder utilizada tiene una entrada de 110 voltios ac y una salida de 13.8 voltios dc, 17 Amperios, marca Nitron, modelo PS105.

En vista de que el voltaje de salida en la fuente es 1,8 Voltios por encima de los que consume el motor, fue necesario utilizar un reóstato para controlar el voltaje suministrado a la máquina. Mediante el mismo, se logró controlar la velocidad de la máquina en 2000 RPM, la cual es una velocidad adecuada para así comparar los resultados obtenidos con los antecedentes que dispone el equipo de investigación. El regulador fue usado para controlar el voltaje de entrada a la fuente, sin embargo ciertas variaciones de voltaje se pudieron apreciar durante todos los ensayos debido a problemas de estabilidad en la toma principal. En la figura 4.5 se muestra el arreglo final para el ensayo:

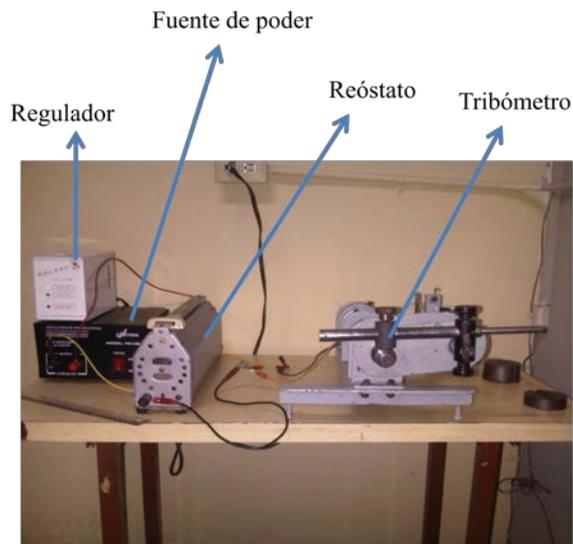


Figura 4.5. Arreglo ensayo “Esfera sobre anillo” (Medina y Peralta, 2010)

Las condiciones del ensayo tribológico así como las propiedades de los materiales involucrados en el ensayo se encuentra en la tabla 4.4 siguiendo el modelo que utiliza la literatura Czichos (1978):

Tabla 4.4. Sistema tribológico (Medina y Peralta, 2010)						
TIPO DE ENSAYO: ENSAYO ESFERA SOBRE ANILLO						
VARIABLES OPERATIVAS						
CARGA (N)			VELOCIDAD (m/s)	DISTANCIA (m)		
7,301	12,201	17,101	3,1416	500	2000	5000
<i>Tipo de movimiento:</i> Deslizamiento continuo				<i>Duración del ensayo:</i> 6 Horas aproximadamente		
ESTRUCTURA DE LOS TRIBO-SISTEMAS						
CARACTERÍSTICAS		PIN	RING	ATMÓSFERA		
<i>Tipo de material/elemento</i>		ACERO AISI Cr 52 100	ACERO INOXIDABLE SAF 2507	AIRE		
<i>Geometría y dimensiones</i>		ESFÉRICO D= 6 MM	ANILLOS D _{EXT} =30 mm espesor= 4mm	No aplica		
<i>Composición (% peso)</i>		1,35 a 1,65 Cr 0,90 a 1,10 C 0,15 a 0,35 Si 0,25 a 0,45 Mn	25 Cr ; 7 Ni 4 Mo ; 0,27 N	“		
<i>Dureza promedio</i>		838 HV	240 HB	“		
<i>Rugosidad promedio</i>		0,100 µm	0,495 µm	“		

4.5.1. Coeficiente de fricción

Para el cálculo del coeficiente de fricción se usará el procedimiento explicado en el capítulo tres. A continuación se presenta la relación para determinar el par torsor entre los especímenes, valor que será utilizado para determinar la fuerza de fricción.

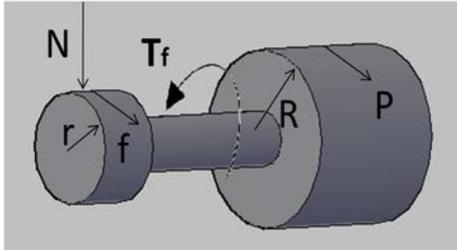


Figura 4.6. Equilibrio del conjunto eje-motor-muestra (Turkington, 1980)

$$T = f \times r \quad (4.1)$$

$$T' = P \times R \quad (4.2)$$

Donde $T + T_f = T'$ (4.3)

T' representa el par torsor de reacción indicado por la viga calibrada y se obtiene a partir de la curva de calibración. Se obtiene con la ecuación 4.2

T_f representa el par torsor gastado en fricción de cojinetes y debido al aire. Se obtiene a partir de la curva de par torsor sin carga (figura 4.3)

T es el par torsor entre las muestras a ensayar (ecuación 4.3)

Así que en la tabla 4.5 se muestra los resultados de fricción obtenidos del ensayo:

A continuación se presenta la gráfica del coeficiente de fricción (μ_k) versus distancia de deslizamiento para las diferentes cargas trabajadas:

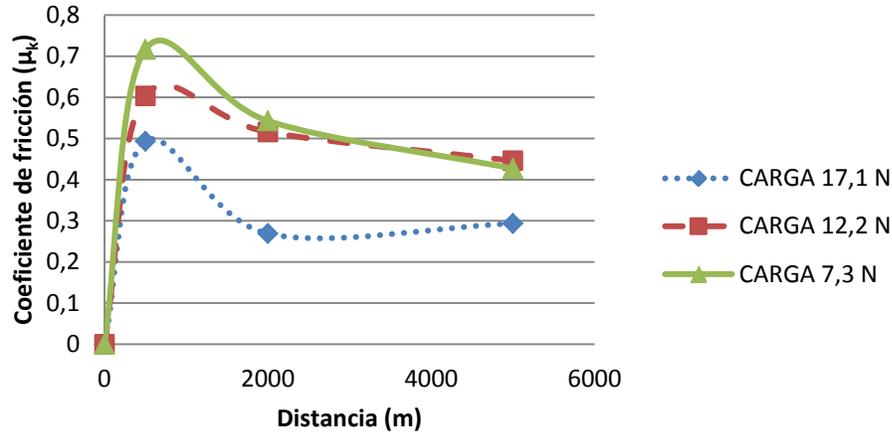


Figura 4.7. Gráfica comparativa de μ_k vs distancia para todas las cargas (Medina y Peralta, 2010)

En la gráfica anterior se observó una zona inicial durante los primeros quinientos metros de deslizamiento y luego el coeficiente de fricción comienza a descender hasta que se estabiliza en un determinado valor con la distancia. Esta distancia de estabilización se observa a partir de dos mil metros.

Con respecto a lo anterior se determinó que para una carga de 17,1 N el coeficiente de fricción promedio en régimen estable es de 0,28, para una carga de 12,2 N su valor es de 0,48 y por último para una carga de 7,3 N se obtiene un coeficiente de fricción de 0,49.

En la figura 4.7, se puede apreciar que los valores más altos del coeficiente de fricción se obtienen para la carga normal de 7,3 N, seguido de 12,2 N y por último para una carga de 17,1 N. Esto se debe a que de acuerdo a la ecuación 2.1 el coeficiente de fricción es inversamente proporcional a la carga normal, es decir, mientras mayor sea la carga aplicada menor es el coeficiente de fricción.

4.5.2. Coeficiente de desgaste

El coeficiente de desgaste será determinado a partir del punto 6 del procedimiento experimental explicado en el capítulo tres. A continuación se presenta el desarrollo para determinar el volumen de desgaste, para una condición esfera sobre anillo:

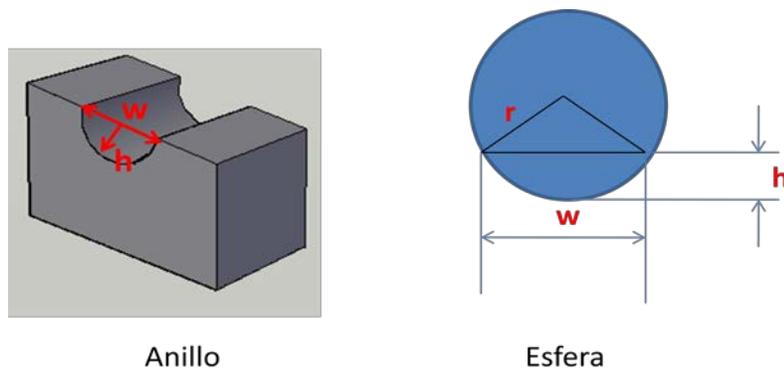


Figura 4.8. Geometría del desgaste (Medina y Peralta, 2010)

A partir de la figura 4.8 se tiene que el área del perfil de la huella dejada por la esfera viene dada por la siguiente ecuación:

$$A = r^2 \operatorname{sen}^{-1} \left(\frac{w}{2r} \right) - \frac{1}{4} w \sqrt{(4r^2 - w^2)} \quad (4.4)$$

Donde:

r = Radio de la esfera [mm]

w = Ancho de la huella [mm]

Luego el volumen de desgaste viene dado por el producto del área y la longitud recorrida por la esfera:

$$V = 2\pi R \times A = \pi(D - h) \times A \quad (4.5)$$

Donde:

R = radio de la huella [mm]. En la cual ésta se considera como una referencia promedio de la traza circular dejada por la esfera en el anillo, tal como se especifica en el ASTM G-99. Ver figura 4.9

D = diámetro del anillo [mm]. Ver figura 4.13

h = altura de la huella [mm]. Ver figura 4.13

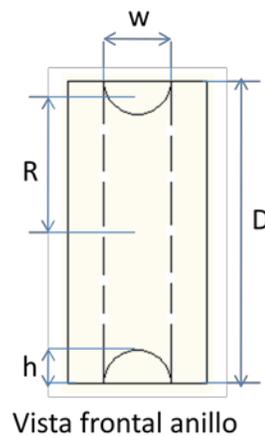


Figura 4.9. Vista frontal del anillo desgastado (Medina y Peralta, 2010)

En la tabla 4.6 se muestran los resultados de desgaste obtenidos para cada probeta.

Es importante resaltar que las dimensiones de las huellas, fueron tomadas haciendo uso de un perfilometro marca Mitutoyo, modelo PJ-2500.

En las figuras 4.10 y 4.11 se muestra un perfil de las probetas y la posición en que fueron colocadas para la medición respectivamente:

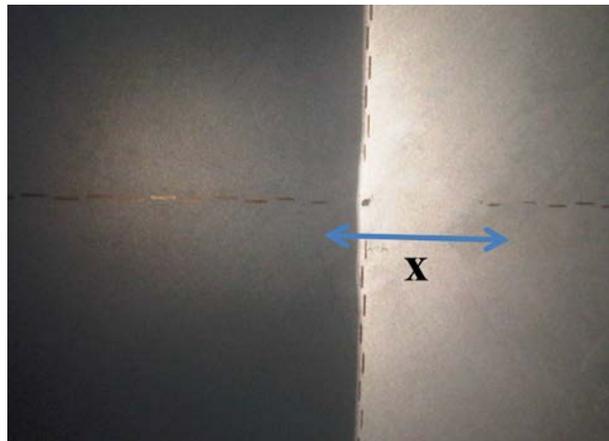


Figura 4.10. Perfil de las probetas (Medina y Peralta, 2010)

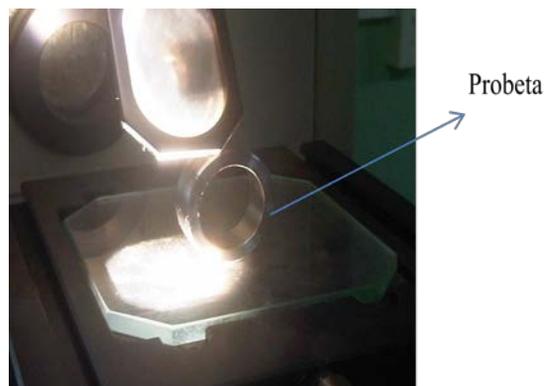


Figura 4.11. Ubicación de la probeta en el perfilometro (Medina y Peralta, 2010)

Como se puede observar en la figura 4.10, en la dirección x se puede determinar la altura de la huella. Y si se desea medir el ancho, simplemente se gira 90 grados a partir de la posición que se observa en la figura 4.11.

En las figuras 4.12 y 4.13 se muestran algunas imágenes de las probetas que fueron sometidas a mayor desgaste durante los ensayos:



Figura 4.12. Probeta 14, carga 17,1 N, 5000 m (Medina y Peralta, 2010)



Figura 4.13. Probeta 1, carga 12,2 N, 5000 m (Medina y Peralta, 2010)

A continuación se presentan la figura 4.14 donde se puede apreciar el volumen de desgaste en las piezas contra la distancia de deslizamiento.

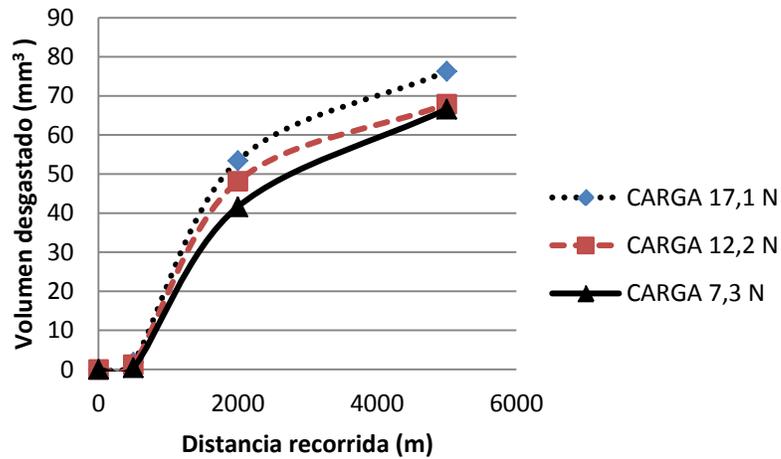


Figura 4.14. Gráfica comparativa desgaste vs distancia para diferentes cargas (Medina y Peralta, 2010)

En la gráfica anterior se puede observar que mientras mayor es la distancia recorrida mayor es el volumen de desgaste en las probetas. Esto es lo esperado, ya que el volumen de desgaste de acuerdo a la ecuación de Archard (2.7) es directamente proporcional a la distancia recorrida.

Con respecto a la figura 4.14 se puede apreciar que a valores de carga elevado mayor es el volumen de desgaste obtenido en la pieza. De igual forma esto se debe a que el volumen de desgaste es directamente proporcional a la carga aplicada al material. En las curvas se puede apreciar que el mayor valor de desgaste obtenido es de $76,27 \text{ mm}^3$ para una carga de 17,1 N y una distancia recorrida de 5000 m.

En la figura 4.15 se observa el comportamiento del coeficiente de desgaste (k) en función de la distancia:

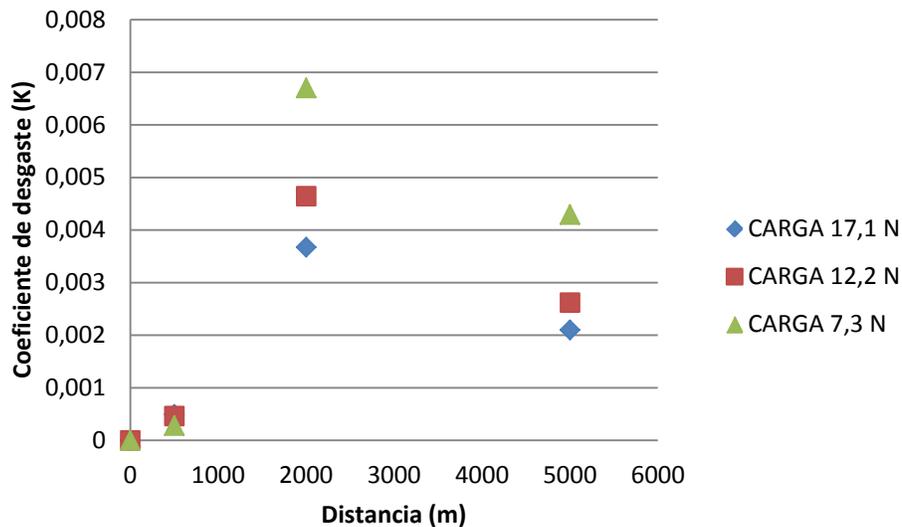


Figura 4.15. Gráfica comparativa de k vs distancia para diferentes cargas (Medina y Peralta, 2010)

En la figura 4.15 se puede apreciar una condición inicial durante los primeros quinientos metros en la cual, debería esperarse un coeficiente alto durante esta etapa, más sin embargo, en este caso, no se observa debido a que el modelo de Archard no se aplica en ésta.

A partir de los 2000 metros si se observa un régimen estable donde se aplica la ecuación de Archard (2.7), en la cual a medida que aumenta la distancia hay una disminución del coeficiente de desgaste. Con una matriz más amplia sería posible visualizar mejor la tendencia.

De igual forma en la figura 4.15 se observa que a mayor carga menor coeficiente de desgaste, lo cual verifica la ecuación de desgaste de Archard (2.7).

4.6. Validación de resultados contra los de aceros comunes y demás inoxidables

Es importante resaltar, que la bibliografía de esta investigación no es extensa, debido a que no existen antecedentes tribológicos en el acero dúplex SAF 2507. Por lo cual, los resultados aquí obtenidos conforman una información novedosa que busca generar una literatura. De esta manera, se busca realizar una ligera comparación con los demás aceros más que validar los resultados obtenidos.

Si se compara con el trabajo de Szyndelman (2009), el cual trabajó con un acero dúplex 2205 y realizó un ensayo “pin on disk” a diferentes velocidades, se tiene que los coeficientes de fricción y desgaste obtenidos en su investigación difieren con los de este trabajo. Por ejemplo, en Szyndelman (2009), para una velocidad de 1,2 m/s, en la zona de régimen, el coeficiente de fricción y desgaste fue de 1,20 y 0,000094 respectivamente. Para ésta investigación, en un régimen permanente el coeficiente de fricción obtenido fue de 0,44 y el de desgaste 0,00354.

Sin embargo, la tendencia de las gráficas en ambos casos es bastante similar, lo que ratifica los fundamentos teóricos empleados. La diferencia radica esencialmente en el tipo de material, matriz empleada y las condiciones del ensayo. Por ejemplo, la desigualdad de velocidades es un factor importante. En ésta investigación se trabajó con 3,1416 m/s; mientras que Szyndelman trabajó con una velocidad máxima de 1,2 m/s. Es de resaltar, que en su trabajo también se apreció al igual que en éste, una zona inicial y un régimen permanente.

Si se revisa los valores de fricción que presenta la literatura de Kajdas, et al (1990). Allí se muestra que para superficies acero-acero el coeficiente de fricción dinámico es 0,57. Mientras que el dúplex SAF 2507 tiene un coeficiente de 0,44. Lo cual resulta bastante aceptable en vista de pertenecer ambos a la familia de aceros.

Conclusiones

- Se alcanzaron los objetivos planteados: Interpretar el fenómeno tribológico, establecer condiciones para diseñar la investigación experimental, medir el coeficiente de fricción por deslizamiento, determinar el coeficiente de desgaste por adhesión y validar los resultados contra los de aceros comunes y demás inoxidables.
- En las curvas de fricción se pudo apreciar una condición inicial en los primeros quinientos metros y luego se observa una estabilidad a partir de los dos mil metros. Esta situación se presentó en cada una de las gráficas. Por lo tanto se cumplen los fundamentos teóricos.
- El coeficiente de fricción promedio para la condición inicial es de 0,55 y el coeficiente de fricción para el régimen estable es de 0,44. Con una desviación estándar en cada caso de 0,11 aproximadamente, lo cual resulta aceptable.
- En las curvas de volumen de desgaste se observó un crecimiento progresivo a medida que aumenta la distancia y la carga. De igual forma se tiene un período inicial durante los primeros quinientos metros y después se pueden apreciar las etapas I (500 a 2000 m) y II (2000 a 5000 m) propias de una curva de desgaste vs distancia.

- Se obtuvo un coeficiente de desgaste promedio en la transición de 0,000899 con una desviación estándar de 0,001 y un coeficiente de desgaste promedio en régimen estable de 0,00354 con una desviación estándar de 0,002, lo cual resulta aceptable.
- Durante los ensayos, el desgaste fue constante en todas las esferas con respecto al anillo, lo cual no corresponde, debido a que la dureza de la esfera (838 HV) no es lo suficientemente alta con respecto al anillo (240 HB).
- El procedimiento presentado en esta investigación, fue elaborado en función del trabajo de Turkington (1980) y las normas ASTM G-77 y G-99; lo que conlleva a la creación de una metodología propia.
- Los coeficientes de fricción y desgaste aquí obtenidos es una información novedosa asociada al acero dúplex SAF 2507, en vista de que no se encontraron antecedentes tribológicos para este material.
- Las muestras que fueron repetidas (cinco), se pudo apreciar que existía poca dispersión de los valores respecto a los ensayados por primera vez. Esto permite concluir que los valores obtenidos son bastante aceptables.

Recomendaciones

- Es necesario utilizar especímenes con una diferencia de dureza superior a la empleada en este ensayo, para así lograr una huella significativa en el material más blando.
- Se recomienda la adquisición de una fuente de poder que permita variar la velocidad del motor y así construir una matriz de ensayos para diferentes velocidades de deslizamiento, con el fin de determinar la influencia de ésta en el comportamiento tribológico del acero.
- Es de gran utilidad para futuros trabajos determinar la influencia de la temperatura en el comportamiento tribológico.
- Se sugiere la realización de más experiencias para lograr una completa caracterización del acero dúplex y obtener resultados más confiables.
- Es recomendable estudiar la influencia de un envejecimiento isotérmico sobre el comportamiento tribológico del acero dúplex.

Referencias Bibliográficas

- Fernández G. Nelson J. (1981). **“Determinación de la calidad del material de fricción de los elementos de frenos”**. Tesis de grado no publicada. Universidad de Carabobo (UC).
- Hamrock, B.J; Jacobson, B.O; Schmid, S.R. (2000); Elementos de Máquinas. McGraw-Hill.
- Kajdas C.; S.S.K. Harvey and E. Wilusz.(1990) **“Encyclopedia of Tribology”**. Printed in the Netherlands.
- Ortega V. Rodolfo L., Vilela R. Gustavo. (1984) **“Estudio experimental del coeficiente de fricción en el contacto intermetálico”**. Tesis de grado no publicada. Universidad de Carabobo (UC).
- Romero J. **“Lubricación y lubricantes”** (2008). Trabajo de ascenso no publicado. Universidad de Carabobo (UC).
- Szyndelman (2009) **“Comportamiento tribológico del acero inoxidable dúplex 2205”**. Universidad Politécnica de Cataluña (UPC).
<https://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/4792/1/Memoria%20Gr%C3%A9gorio%20Szyndelman%20Comportamiento%20tribologico%20de%20los%20aceros%20inoxidables%20duplex.pdf>
- Tribology-abc. (2010). **“Measuring friction, testing”**. [http:// www.tribology-abc.com](http://www.tribology-abc.com)
- Turkington Kenneth J. (1980). **“Diseño y fabricación de una máquina para ensayos de roce”**. Tesis de grado no publicada. Universidad de Carabobo (UC).
- FastPack (2009). **“Boletín técnico N° 4 de aceros dúplex”**.
<http://www.fastpack.cl/assets/files/materialtecnico/boletines/materiales/aceros-duplex.pdf>

Apéndice

Introducción

En el siguiente apéndice se indican las adaptaciones fundamentales para el uso debido del tribómetro, donde se realizaron diseños e inclusión de complementos requeridos, además de incluir métodos normalizados (ASTM G-77 y G-99) de ensayos tribológicos los cuales fueron referencia en esta investigación. Es necesario indicar que sin ser el objetivo principal del trabajo se asumió recuperar esta valiosa máquina con principios de ingeniería, creada en la Escuela de Mecánica con el fin de desarrollar investigaciones de índole tribológicos.



Designation: G 99 – 04

Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus¹

This standard is issued under the fixed designation G 99; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reappraisal. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reappraisal.

1. Scope

1.1 This test method covers a laboratory procedure for determining the wear of materials during sliding using a pin-on-disk apparatus. Materials are tested in pairs under nominally non-abrasive conditions. The principal areas of experimental attention in using this type of apparatus to measure wear are described. The coefficient of friction may also be determined.

1.2 The values stated in SI units are to be regarded as standard.

1.3 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:²

E 122 Practice for Choice of Sample Size to Estimate, With a Specified Tolerable Error, the Average for Characteristic of a Lot or Process

E 177 Practice for Use of the Terms Precision and Bias in ASTM Test Methods

E 178 Practice for Dealing with Outlying Observations

G 40 Terminology Relating to Wear and Erosion

G 117 Guide for Calculating and Reporting Measures of Precision using Data from Interlaboratory Wear or Erosion Tests

2.2 Other Standard:³

DIN-50324 Testing of Friction and Wear

3. Summary of Test Method

3.1 For the pin-on-disk wear test, two specimens are required. One, a pin with a radiused tip, is positioned perpen-

dicular to the other, usually a flat circular disk. A ball, rigidly held, is often used as the pin specimen. The test machine causes either the disk specimen or the pin specimen to revolve about the disk center. In either case, the sliding path is a circle on the disk surface. The plane of the disk may be oriented either horizontally or vertically.

NOTE 1—Wear results may differ for different orientations.

3.1.1 The pin specimen is pressed against the disk at a specified load usually by means of an arm or lever and attached weights. Other loading methods have been used, such as hydraulic or pneumatic.

NOTE 2—Wear results may differ for different loading methods.

3.2 Wear results are reported as volume loss in cubic millimetres for the pin and the disk separately. When two different materials are tested, it is recommended that each material be tested in both the pin and disk positions.

3.3 The amount of wear is determined by measuring appropriate linear dimensions of both specimens before and after the test, or by weighing both specimens before and after the test. If linear measures of wear are used, the length change or shape change of the pin, and the depth or shape change of the disk wear track (in millimetres) are determined by any suitable metrological technique, such as electronic distance gaging or stylus profiling. Linear measures of wear are converted to wear volume (in cubic millimetres) by using appropriate geometric relations. Linear measures of wear are used frequently in practice since mass loss is often too small to measure precisely. If loss of mass is measured, the mass loss value is converted to volume loss (in cubic millimetres) using an appropriate value for the specimen density.

3.4 Wear results are usually obtained by conducting a test for a selected sliding distance and for selected values of load and speed. One set of test conditions that was used in an interlaboratory measurement series is given in Table 1 and Table 2 as a guide. Other test conditions may be selected depending on the purpose of the test.

3.5 Wear results may in some cases be reported as plots of wear volume versus sliding distance using different specimens for different distances. Such plots may display non-linear relationships between wear volume and distance over certain portions of the total sliding distance, and linear relationships over other portions. Causes for such differing relationships

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee G02 on Wear and Erosion and is the direct responsibility of Subcommittee G02.40 on Non-Abrasive Wear.

Current edition approved Jan. 1, 2004. Published January 2004. Originally approved in 1990. Last previous edition approved in 2003 as G 99 – 03.

² For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For Annual Book of ASTM Standards volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

³ Available from Beuth Verlag GmbH, Burggrafenstrasse 6, 1000 Berlin 30, Germany.

Apéndice B



Designation: G 77 – 98

Standard Test Method for Ranking Resistance of Materials to Sliding Wear Using Block-on-Ring Wear Test¹

This standard is issued under the fixed designation G 77; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

1. Scope

1.1 This test method covers laboratory procedures for determining the resistance of materials to sliding wear. The test utilizes a block-on-ring friction and wear testing machine to rank pairs of materials according to their sliding wear characteristics under various conditions.

1.2 An important attribute of this test is that it is very flexible. Any material that can be fabricated into, or applied to, blocks and rings can be tested. However, the interlaboratory testing has been limited to metals. Thus, the potential materials combinations are endless. In addition, the test can be run with various lubricants, liquids, or gaseous atmospheres, as desired, to simulate service conditions. Rotational speed and load can also be varied to better correspond to service requirements.

1.3 Wear test results are reported as the volume loss in cubic millimetres for both the block and ring. Materials of higher wear resistance will have lower volume loss.

1.4 *This standard does not purport to address the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:

- D 2714 Test Method for Calibration and Operation of the Falex Block-on-Ring Friction and Wear Testing Machine²
- E 122 Practice for Choice of Sample Size to Estimate a Measure of Quality for a Lot or Process³
- E 177 Practice for Use of the Terms Precision and Bias in ASTM Test Methods³
- E 691 Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method³
- G 40 Terminology Relating to Wear and Erosion⁴

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee G-2 on Wear and Erosion and is the direct responsibility of Subcommittee G02.40 on Non-Abrasive Wear.

Current edition approved Oct. 10, 1998. Published January 1999. Originally published as G 77 – 83. Last previous edition G 77 – 97.

² *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 05.02.

³ *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 14.02.

⁴ *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 03.02.

3. Terminology

3.1 Definition:

3.1.1 *wear*—damage to a solid surface, generally involving progressive loss of material, due to relative motion between that surface and a contacting substance or substances.

3.1.2 For additional definitions pertinent to this test method, see Terminology G 40.

4. Summary of Test Method

4.1 A test block is loaded against a test ring that rotates at a given speed for a given number of revolutions. Block scar volume is calculated from the block scar width, and ring scar volume is calculated from ring weight loss. The friction force required to keep the block in place is continuously measured during the test with a load cell. These data, combined with normal force data, are converted to coefficient of friction values and reported.

5. Significance and Use

5.1 The significance of this test method in any overall measurement program directed toward a service application will depend on the relative match of test conditions to the conditions of the service application.

5.2 This test method seeks only to prescribe the general test procedure and method of calculating and reporting data. The choice of test operating parameters is left to the user. A fixed amount of sliding distance must be used because wear is usually non-linear with distance in this test.

6. Apparatus and Materials

6.1 *Test Schematic*—A schematic of the block-on-ring wear test geometry is shown in Fig. 1.⁵ Acceptable testing machines are shown in Appendix X1.

6.2 *Test Ring*—A typical test ring is shown in Fig. 2. The test ring must have an outer diameter of 34.99 ± 0.025 mm (1.377 ± 0.001 in.) with an eccentricity between the inner and

⁵ Several machines, including the current Falex Model I and the older Dow Corning LFW-1 machines, have been found satisfactory for the purposes of this test. These models may differ in lever arm ratio, load range, speed control (variable or fixed), speed range, and type of friction measuring device. Suitable machines may be purchased from Falex Corporation, 1020 Airpark Dr., Sugar Grove, IL 60554.

Apéndice C

Requerimientos de diseño

Inicialmente la máquina sólo podía trabajar con espigas en forma de bloque y espigas de forma cilíndricas, esta limitación restringía el uso del pin requerido (esferas de 6mm), por lo tanto se decidió diseñar y fabricar un porta pin esférico, que permitiera cumplir con los objetivos fijados para la realización del ensayo esfera sobre anillo (ver plano 1). Aunado a esto fue necesario el diseño de un porta pesas nuevo (ver plano 2) debido a que el anterior que tenía la máquina estaba muy deteriorado. A continuación se explican ambos diseños:

Diseño del porta pin

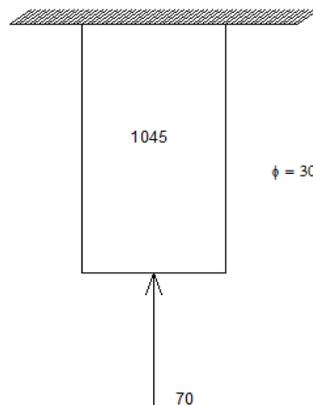


Figura C1. Diseño del porta pin (Medina y Peralta, 2010)

Datos:

$Carga\ max = 70\ N = 7.13\ Kg$

$Diámetro\ del\ tocho = 30\ mm$

$Esfuerzo\ de\ fluencia = 39\ kg/mm^2$

$$A = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi(30)^2}{4}$$

$$A = 706.85 \text{ mm}^2$$

$$\sigma_{pp} = \frac{P_{max}}{A} = \frac{7.13}{706.85}$$

$$\sigma_{pp} = 0.01 \text{ kgf/mm}^2$$

$$\sigma_{fluencia} > \sigma_{pp}$$

Nota: Es necesario indicar que se asumió un cilindro sin perforaciones ya que al tener una diferencia tan elevada entre los esfuerzos, se logró un sobre dimensionamiento, no obstante, para evitar que la esfera se incrustara en el material, se realizó una nitruración a la pieza aumentando su dureza.

Pasos para la fabricación del porta pin

Tocho:

$$\varnothing = 35 \text{ mm}$$

$$\text{Longitud} = 100 \text{ mm}$$

- **Cilindrado:**

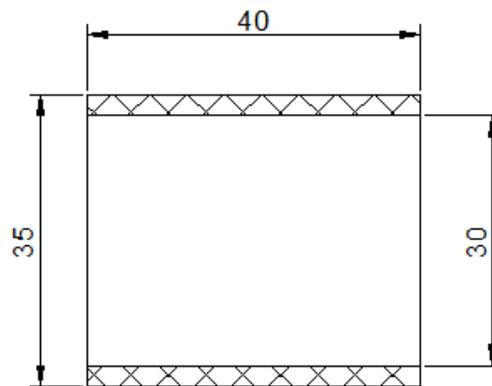


Figura C2. Cilindrado (Medina y Peralta, 2010)

- **Perforado**

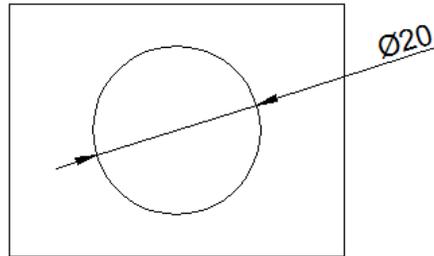


Figura C3. Perforado (Medina y Peralta, 2010)

- **Taladrado**

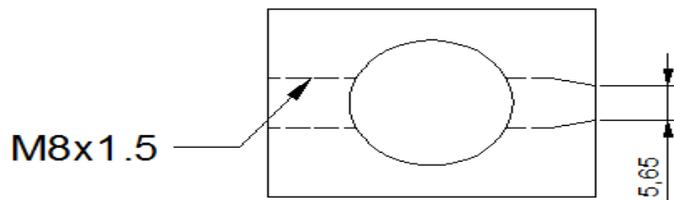


Figura C4. Taladrado (Medina y Peralta, 2010)

Nota: Para obtener el diámetro de 5.65 mm se realizaron taladrados incompletos, con el fin de medir progresivamente hasta alcanzar la dimensión deseada.

A continuación en las figuras C5 y C6 se observa el porta pin fabricado.



Figura C5. Porta pin vista 1 (Medina y Peralta, 2010)



Figura C6. Porta pin Vista 2 (Medina y Peralta, 2010)

Diseño de porta pesas.

Se diseño un porta pesas realizado en acero inoxidable (Ver plano 2) el cual la máquina no poseía; debido a que el material de acero dúplex obtenido (donado) era de un diámetro de 30mm decidimos realizar un cambio al eje principal de dicha máquina donde el espécimen giratoria debía estar colocado, todo ello para asegurar un mayor espesor en el anillo y adicionalmente se le realizó mantenimiento a la máquina, cambios de rodamientos y limpieza a barra calibrada pieza fundamental del tribómetro.