



Universidad de Carabobo

Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica
Departamento Diseño Mecánico y Automatización

Evaluación del Comportamiento ante El Desgaste por Frotamiento del Acero Dúplex SAF 2507

Autor: Prof. Jorge Emir Romero Contreras

Bárbula, 26 de enero de 2012



Universidad de Carabobo

Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica
Departamento Diseño Mecánico y Automatización

Evaluación del Comportamiento ante El Desgaste por Frotamiento del Acero Dúplex SAF 2507

Autor: Prof. Jorge Emir Romero Contreras

*Trabajo de Ascenso presentado ante la Ilustre
Universidad de Carabobo para optar a la
Categoría de profesor Asociado*

Bárbula, 26 de enero de 2012

A mis padres, María y Jorge

A mi esposa, Ely

A mis hijos, Víctor y Marco

***A mis hermanos, Jorfe, María, Javier,
Jairo, Mayola, Maithe***

Contenido

AGRADECIMIENTO	IX
RESUMEN	XI
INTRODUCCIÓN	1
1. SITUACIÓN PROBLEMÁTICA	3
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.2. OBJETIVOS DEL TRABAJO	4
1.3. JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO	5
1.4. LIMITACIONES Y DELIMITACIONES	6
2. CONSIDERACIONES TEÓRICAS	7
2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN DEL ACERO DÚPLEX EN TRIBOLOGÍA	7
2.2. BASE TEÓRICAS	9
2.2.1. <i>Generalidades sobre Materiales en Tribología</i>	9
2.2.2. <i>Aceros inoxidable en tribología</i>	10
2.2.3. <i>El Acero Dúplex para proteger contra el desgaste</i>	12
2.2.4. <i>El Acero Dúplex como biomaterial</i>	12
2.2.5. <i>Fundamentos del Desgaste por Frotamiento</i>	13
3. CONSIDERACIONES METODOLÓGICAS.....	21
3.1. ADQUISICIÓN DEL MATERIAL	21
3.2. PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS	22
3.3. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL.....	24
3.4. EQUIPO DE ENSAYO	24

3.5.	SELECCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE ENSAYOS.....	24
3.6.	DISEÑO EXPERIMENTAL	27
3.6.1.	<i>Obtención de la matriz ortogonal DET</i>	27
3.6.2.	<i>Análisis experimental SN de los datos</i>	29
3.7.	EVALUACIÓN DE LA HUELLA DE DESGASTE	30
3.7.1.	<i>Determinación del Volumen y Coeficiente de desgaste</i>	30
3.7.2.	<i>Identificación del Régimen y Mecanismo de desgaste por frotamiento</i>	32
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	33
4.1.	PROPIEDADES DEL MATERIAL	33
4.2.	COMPORTAMIENTO ANTE EL DESGASTE POR FROTAMIENTO	34
4.2.1	<i>Datos del volumen y coeficiente de desgaste.....</i>	34
4.2.2	<i>Efecto de los parámetros variados en el desgaste por frotamiento.....</i>	36
4.2.3	<i>Análisis de datos mediante Taguchi.....</i>	43
4.3.	OBSERVACIONES MEDIANTE MICROSCOPIA ÓPTICA Y MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO. 46	
4.3.1.	<i>Régimen del desgaste por Frotamiento</i>	47
4.3.2	<i>Mecanismo del desgaste por Frotamiento.....</i>	64
5.	CONCLUSIONES	69
6.	RECOMENDACIONES.....	71
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73
	ANEXOS.....	75
	ANEXO A. CERTIFICADO DE INSPECCIÓN SAF 2507	77
	ANEXO B. MÉTODO TAGUCHI	79

Agradecimiento

El autor desea expresar su especial agradecimiento a:

Prof(a). Dr. M. Staia por la aceptación del autor como investigador visitante y permitir la realización de esta investigación en Laboratorio de Tribología del Centro de Ciencias e Ingeniería de Nuevos Materiales y Corrosión, UCV.

Prof. Dr. E. Carrasquero de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica, UCV, por su valiosa guía y colaboración en la realización de las pruebas.

A los Asistentes de Investigación Centro de Ciencias e Ingeniería de Nuevos Materiales y Corrosión, UCV, por su colaboración y disposición en la disponibilidad de los equipos de ensayo.

Al personal Técnico del Laboratorio de Materiales y del Laboratorio de Predicciones de la Escuela de Ingeniería Mecánica de Nuestra Facultad por su colaboración en la preparación y análisis de muestras en microscopía.

Al Centro de Investigación de Materiales de la Universidad de Carabobo por el financiamiento a través del Fondo de Investigación de la Facultad de Ingeniería, partida 4.07 de 2010.

Resumen

El presente trabajo expone la evaluación del comportamiento ante el desgaste por frotamiento del acero inoxidable dúplex. Los ensayos fueron desarrollados en un tribómetro tipo bola sobre disco. Como material del disco se empleó el acero inoxidable dúplex SAF 2507 sin tratamiento térmico y como material para la bola se usó el acero AISI 52100. Los ensayos se realizaron en condiciones de ambiente (aire) y de lubricación seca. Los parámetros seleccionados, a fin de estudiar sus efectos en el volumen y coeficiente de desgaste por frotamiento, fueron: valores de frecuencias de 10 Hz y 30 Hz, valores de cargas de 10 N y 70 N y rangos de ciclos de duración 10^4 a 5×10^5 . La amplitud de oscilación se tomó fija con valor de $100 \mu\text{m}$. Se empleó un diseño experimental ortogonal de Taguchi. Para las condiciones evaluadas, los valores del coeficiente de desgaste se reportan en el rango desde $1,96 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{N}$ hasta $3,60 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{N}$. Se analizó la morfología de la huella por microscopía óptica y electrónica de barrido, identificándose que los ensayos se realizaron bajo las condiciones de un régimen mixto de frotamiento. Se halló que los desechos de desgaste se generan por mecanismos de adhesión, deformación cíclica simple y deformación cíclica repetida.

Palabras claves: desgaste por frotamiento, coeficiente de desgaste por frotamiento, acero inoxidable dúplex

Introducción

En la actualidad se están realizando muchas investigaciones acerca de los aceros inoxidables dúplex, motivado a su constante desarrollo, y por consiguiente, aún 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 tipo de acero inoxidable ante el desgaste. Esto genera una limitante en el diseño y fabricación de mecanismos donde la durabilidad es un factor de decisión. Se puede considerar, de manera particular, las aplicaciones biomecánicas o de bioingeniería, en la que elementos de fijación, implantes y algunas prótesis, presentan movimiento relativo entre las partes; y donde el acero inoxidable dúplex podría ser un excelente material para la construcción de las mismas, a muy bajo costo, pero desafortunadamente para el diseñador, existe poca información acerca de sus características tribológicas, las cuales van a permitir tomar una decisión final acerca de su elección como material de fabricación en biotribología.

En el caso específico, del daño derivado del movimiento oscilatorio o vibración de poca amplitud, conocido como desgaste por frotamiento (“Fretting Wear”), que puede ocurrir en ciertos aparatos ortopédicos, en especial en dispositivos de fijación de la fractura, tales como las placas. Estas placas, son utilizadas para mantener unidas las partes del hueso fracturado y se componen de materiales resistentes a la corrosión que se ajustan al hueso por medio de tornillos, generalmente, del mismo material. El frotamiento puede ocurrir entre la parte inferior de la cabeza del tornillo y el avellanado del agujero en la placa. El desgaste por frotamiento, en este caso resulta en la destrucción de las películas de protección y la liberación continua de iones de metales pesados en los fluidos corporales, con posibles reacciones tóxicas.

En vista de lo anteriormente expuesto, en el presente trabajo se muestra un estudio tribológico al acero dúplex SAF 2507 para evaluar su resistencia al desgaste ante el frotamiento. Se reportan los resultados de ensayos desarrollados en

especímenes de acero dúplex SAF 2507 sin tratamiento térmico y como contraparte de contacto acero AISI 52100, en condiciones de lubricación seca, para una amplitud fija, en varios valores de frecuencias, cargas y ciclos de duración.

Inicialmente, en el capítulo 1, se presenta en detalle la motivación de la investigación, la formulación, los objetivos, las limitaciones y el alcance del estudio. Luego, en el capítulo 2, se exponen las consideraciones teóricas que permiten conocer el tipo de material en estudio y comprender el fenómeno de desgaste por frotamiento. En el capítulo 3, se describe en detalle la fase experimental, las variables o los parámetros considerados, las características de los dispositivos empleados y el procedimiento implementado. Seguidamente, en el capítulo 4 y 5, se muestran los resultados para el volumen y coeficiente de desgaste, su discusión y análisis, respectivo. Finalmente, en el capítulo 6 y 7, se señalan las conclusiones a las cuales se arribaron en la evaluación del comportamiento ante el Desgaste por Frotamiento del acero inoxidable dúplex evaluado, y la continuidad de la investigación sobre del mismo.

Cabe señalar que el trabajo descrito aquí se basa en ensayos preliminares dentro de un programa de investigación más amplio en el contexto de los estudios doctorales que actualmente realiza el autor.

1. Situación Problemática

1.1. Planteamiento del problema

Los aceros dúplex son aceros inoxidable que están teniendo un significativo crecimiento por sus distintas aplicaciones. Esto debido a que combinan una serie de propiedades que los colocan a un nivel muy superior sobre los aceros inoxidable comúnmente utilizados. Su elevada resistencia mecánica y corrosiva lo convierte en un atractivo material para el diseñador, ya que posibilita un ahorro de éste, y por consiguiente, una reducción de costos del proyecto de diseño de ingeniería.

En la actualidad se están realizando muchas investigaciones acerca de los aceros inoxidable dúplex, motivado a su constante desarrollo, y aún 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 tipo de acero inoxidable, bajo condiciones de fricción y su efecto asociado, el desgaste. Esto genera una limitante en el diseño y fabricación de mecanismos donde el contacto en movimiento relativo es inevitable. Se puede considerar, de manera particular, las aplicaciones biomecánicas o de bioingeniería, en la que elementos de fijación, implantes y algunas prótesis, presentan movimiento relativo entre las partes; y donde el acero dúplex podría ser un excelente material para la construcción, a muy bajo costo, de las mismas, pero desafortunadamente para el diseñador, existe poca información acerca de sus características tribológicas, la cuales van a permitir tomar una decisión final acerca de su elección como material de fabricación en biotribología.

En el caso específico, del daño derivado del movimiento oscilatorio o vibración de poca amplitud, conocido como desgaste por frotamiento (“Fretting Wear”, en inglés), que puede ocurrir en ciertos aparatos ortopédicos, en especial en dispositivos de fijación de la fractura, tales como las placas óseas. Estas son utilizadas para mantener unidas las partes del hueso fracturado. Se componen de placas de materiales resistentes a la corrosión que se ajustan al

hueso por medio de tornillos del mismo material. El frotamiento puede ocurrir entre la parte inferior de la cabeza del tornillo y el avellanado del agujero en la placa. El desgaste por frotamiento, en este caso resulta en la destrucción de las películas de protección y la liberación continua de iones de metales pesados en los fluidos corporales, con posibles reacciones tóxicas.

En vista de lo anteriormente expuesto, se plantea la necesidad de realizar ensayos o pruebas al acero inoxidable dúplex para evaluar sus características tribológicas, y en particular, su resistencia al desgaste ante el frotamiento, la vibración u oscilación de poca amplitud. En el presente trabajo de ascenso se muestran un estudio tribológico al acero dúplex SAF 2507 para evaluar su resistencia al desgaste ante el frotamiento. Se reportan los resultados de ensayos desarrollados en especímenes de acero dúplex SAF 2507 sin tratamiento térmico y como contraparte de contacto acero AISI 52100, en condiciones de lubricación seca, para una amplitud fija, en varios valores de frecuencias, cargas y ciclos de duración.

1.2. Objetivos del trabajo

Objetivo General:

Evaluar el comportamiento ante el desgaste por frotamiento del acero dúplex SAF 2507

Objetivos Específicos

- Definir los parámetros involucrados en el fenómeno de desgaste por frotamiento a considerarse como caso de estudio.
- Establecer las condiciones para el diseño de la investigación experimental
- Describir la morfología de la huella de desgaste por frotamiento en el caso de estudio
- Determinar el coeficiente de desgaste por frotamiento en el caso de estudio.

1.3. Justificación del trabajo

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 permitirá retomar el camino en el campo de la Tribología en el Centro de Investigación de Materiales de la Universidad de Carabobo, obteniendo un antecedente importante en el análisis tribológico de materiales novedosos, siendo un caso particular el Acero Inoxidable Dúplex, poco estudiado en esta área. La misión a cumplir es generar documentación necesaria para dar a conocer las principales propiedades tribológicas del material en estudio siendo esta una información valiosa que puede ayudar en otras investigaciones posteriores que tengan como fin comprender los fenómenos de la fricción y el desgaste. Además, el principal beneficiado será el investigador el cual podrá indagar y proseguir los posteriores ensayos y análisis, referente a este u otros materiales.

1.4. Limitaciones y Delimitaciones

Limitaciones:

- Disponibilidad de equipos para realizar los ensayos y evaluación.
- Recursos económicos.

Delimitaciones:

- Se evaluará la morfología de la huella y el coeficiente de desgaste por frotamiento para el caso de deslizamiento oscilante con baja amplitud, correlacionando la carga, frecuencia y duración, sin lubricante, bajo las condiciones de temperatura, humedad y presión normal de un laboratorio.
- El material a evaluar será disco de acero inoxidable dúplex SAF 2507 sin tratamiento térmico, usando como contraparte de contacto, bolas de acero al cromo AISI 52100 de cojinetes estándares.
- La investigación se llevara a cabo en los espacios del Laboratorio de Tribología del Centro de Ciencias e Ingeniería de Nuevos Materiales y Corrosión, CEMANCOR, de la Universidad Central de Venezuela y de los Laboratorio de Materiales y de Predicciones de la Escuela de Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo.

En la sección siguiente se presenta en resumen los fundamentos teóricos considerados y la revisión bibliográfica realizada como base del marco teórico del tema de investigación.

2. Consideraciones Teóricas

En esta sección se presenta un resumen de aspectos teóricos y algunos estudios previos relacionados en el área de la investigación desarrollada.

2.1. Antecedentes de la investigación del acero dúplex en tribología

A continuación se resumen algunas de las investigaciones realizadas, para caracterizar tribológicamente algunos de los aceros inoxidable dúplex, disponibles en la literatura.

En el trabajo de Suarez y otros (Suárez, Suárez, & Contreras, 2001), se aborda el estudio tribológico comparativo de 3 familias de aceros inoxidable, aceros inoxidable austeníticos, martensíticos y dúplex, representadas por un tipo de acero inoxidable en cada caso. En el caso del acero dúplex se utiliza el AISI 329 (UNS S32900). En el trabajo se logra la caracterización tribológica de los aceros ante los mecanismos de desgaste abrasivo y erosivo, permitiendo la comparación y definición de campo de aplicación de los mismos ante estos mecanismos de desgaste. Se presentan las relaciones entre intensidad de desgaste y tiempo de contacto en el desgaste abrasivo, y entre ángulo de incidencia e intensidad de desgaste para 2 velocidades de impacto de las partículas en el desgaste erosivo. Se demostró el efecto importante de la velocidad de impacto de las partículas y el ángulo de incidencia de éstas en el desgaste erosivo. Al aumentar la velocidad de impacto, aumenta la intensidad de desgaste para los 3 aceros, ocurriendo lo contrario con el ángulo de incidencia, que al incrementarse disminuye la intensidad de desgaste. El acero inoxidable austenítico muestra la mejor resistencia al desgaste abrasivo para todos los tiempos de abrasión, seguido muy de cerca por el acero dúplex.

En proyecto investigación de Szyndelman (Szyndelman, 2008), se estudia el comportamiento tribológico del acero inoxidable dúplex 2205. 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”. Las velocidades de deslizamiento seleccionadas han sido: 0,2 m/s, 0,7 m/s y 1,2 m/s. Para cada una de estas velocidades, se han evaluado las distancias de: 500 m, 1000 m, 2000 m, 3000 m, 4000 m y 5000 m. 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 la distancia recorrida, existiendo una zona de transición en la que disminuye la cinética de desgaste.

En proyecto de investigación de Renedo (Renedo, 2010). Se estudia el comportamiento al desgaste por deslizamiento de cuatro aceros representativos de las cuatro grandes familias de aceros inoxidables: ferrítico (AISI 446), austenítico (AISI 316), dúplex (AISI 2205) y martensítico (AISI 420). Para cada uno de ellos se han realizado: caracterización metalográfica, determinación de dureza, densidad y rugosidad, y ensayos de tribología mediante la técnica de bola sobre disco. Se han seleccionado una velocidad de 0,024 m/s y unas distancias de 100, 250 y 500 m. A partir de estos ensayos, se ha determinado la cinética de desgaste para cada uno de los aceros y sus mecanismos de desgaste. Los resultados han mostrado que el acero martensítico presenta la mayor resistencia al desgaste debido a su mayor dureza y a su alto contenido en Carbono (0.38 %). El siguiente acero con mejor respuesta al desgaste ha sido el acero ferrítico, con un contenido en Carbono (0.18 %), superior al dúplex y al austenítico. El ferrítico presenta una huella de desgaste con la mayor aglomeración de partículas. Con una menor resistencia al desgaste se encuentra el acero dúplex. Finalmente, el que experimentó mayor desgaste fue el acero inoxidable austenítico. Los mecanismos de desgaste observados son los de “ploughing” o apilamiento por fatiga, por oxidación y por microcorte (mecanismo predominante para los cuatro aceros estudiados). Se ha observado una reducción en la tasa de desgaste para los aceros ferrítico, austenítico y dúplex. Estas reducciones se deben a la aglomeración de partículas sobre la huella.

En investigación de Medina y Peralta (Medina & Peralta, 2010) se estudio 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 Universidad de Carabobo. 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. La velocidad de deslizamiento fue constante. Para una velocidad fija de 3,14 m/s, se han evaluado las cargas de: 17,1 N, 12,2 N y 7,3 N y las distancias de: 500 m, 2000 y 5000 m. Esto representa un número de nueve experiencias, de las cuales cinco fueron repetidos para verificar los valores obtenidos. A partir de estos ensayos, se ha logrado determinar el coeficiente de fricción y de desgaste. Los resultados obtenidos reflejan los valores esperados para este tipo de materiales, lo cual es comparable con los antecedentes tribológicos.

Cabe señalar, en opinión del autor, que poco se ha investigado sobre el comportamiento ante el desgaste en aceros inoxidables dúplex y en particular sobre desgaste del SAF 2507 en condición de frotamiento, según lo demuestra la revisión bibliográfica realizada, lo cual confirma la relevancia que tiene la presente investigación para la comunidad de investigadores.

2.2. Base teóricas

En esta sección se desarrolla los contenidos que conforman el punto de vista adoptado para sustentar el problema planteado.

2.2.1. Generalidades sobre Materiales en Tribología

Los materiales usados en tribología (la ciencia y la tecnología de interacción de las superficies en movimiento relativo y de las prácticas correspondientes), son los mismos materiales usados, en general, para las aplicaciones en ingeniería. Existen algunos materiales específicamente diseñados para aplicaciones tribológicas como materiales

antifricción, por ejemplo, los babbitts empleados para cojinetes. Hay otros materiales muy resistentes al desgaste como el acero AISI 52100 usado en el contacto rodante. Lamentablemente, para el ingeniero de diseño o para el tribologista (el sustantivo genérico para los que estudian la fricción y el desgaste), la información que es requerida está dispersa en la literatura, resultando un elevado consumo de tiempo en recopilar las propiedades de los materiales que necesita, y más aun, si éste es de reciente desarrollo, en tal caso, debe realizar una evaluación experimental. Existen manuales que proveen una excelente referencia para materiales usados en aplicaciones tribológicas, en la mayor parte de los casos que requieren su debida actualización, revisar por ejemplo, el proporcionado por Gleaser (Glaeser, 1992).

2.2.2. Aceros inoxidable en tribología

Los aceros inoxidable son usados en aplicaciones donde es esencial la resistencia al calor y corrosión. Hay tres tipos básicos de aceros inoxidable usados en el control de desgaste: Aceros inoxidable austeníticos, martensíticos y de endurecimiento por precipitación (Glaeser, 1992).

Aceros Inoxidable Austenítico: De uso extendido gracias a su superior resistencia a la corrosión. Resiste varios agentes químicos, agua de mar, metales líquidos y el agua de reactor de 316 °C. Estos son aceros de la serie 300 y contienen alrededor de 18% de cromo, 8% de níquel y 0,1 % de carbón. Son conocidos por su tendencia a la adhesión y al rayado. A pesar que, éstos desarrollan una rápida película de óxido pasivado, cuando se exponen al aire, su baja tasa de endurecimiento de trabajo en frío causa ruptura al contacto del óxido y el material virgen. Estos aceros inoxidable no pueden ser endurecidos por tratamiento térmico, y por lo tanto, no hay medios simples de mejorar su resistencia al desgaste.

Aceros Inoxidable Martensítico: Este contiene más de 11,5% de cromo y bajo contenido de níquel, denominado serie 400. Puede ser endurecido por tratamiento térmico, lo que lo hace más resistente al rayado que los de la serie 300, sin embargo no son tan resistentes a la corrosión como este último.

Acero Inoxidable de Endurecimiento por Precipitación (PH, por Precipitation Hardened): Es usado en ambientes de altas temperaturas y medios corrosivos que requieren resistencia al desgaste. Poseen alta dureza y resistencia a la tracción, los que lo hace superiores a los de la serie 400. (Glaeser, 1992)

En la tabla 2.1 se encuentran las propiedades mecánicas de algunos aceros inoxidables seleccionados.

Tabla 2.1. Propiedades mecánicas de aceros inoxidables (Glaeser, 1992).

MATERIAL	CONDICIÓN	TRATAMIENTO TÉRMICO	DUREZA [HV]	RESISTENCIA A TRACCIÓN [MPa]	MODULO ELÁSTICO [MPa]
15-5 PH	Forjado	H900	420	1379	1,96 E+05
17-4 PH	Forjado	H900	320	1379	1,96 E+05
410		HT, 1000F te	257	758	1,96 E+05
410		Recocido	135	517	1,96 E+05
440C		Recocido	257	862	2,00 E+05
440C		HT, 600F te	650	1379	2,00 E+05
304		Recocido	150		1,97 E+05
316		Recocido	159	586	1,96 E+05
316		Laminado en frio	200	558	1,96 E+05
347	Trabajado en caliente	Recocido	150	620	1,93 E+05

Se ha desarrollado una nueva familia de aceros inoxidables bifásicos (dúplex) de amplio crecimiento en aplicaciones de ingeniería, los aspectos principales se resumen en la sección siguiente.

2.2.3. El Acero Dúplex para proteger contra el desgaste

Los aceros inoxidable Dúplex son aleaciones de cromo-níquel-molibdeno que son balanceados en el contenido de una mezcla de austenita y ferrita, y también son magnéticos. Su estructura dúplex resulta en una resistencia mejorada contra la corrosión, en comparación con los aceros austeníticos y mejorada tenacidad y ductilidad, en comparación con los aceros inoxidable ferríticos. La resistencia de tracción va desde 550 hasta 690 MPa en la condición de recocido, que es aproximadamente dos veces el nivel de resistencia de cada fase por separado. (Magee, 1992)

Los grados dúplex se dividen en cinco grupos basados en su contenido de aleación y a su resistencia a la corrosión (IMOA, 2009):

- Dúplex no enriquecido, se refiere a los grados como el 2304 que no contienen Mo adicional.
- Dúplex estándar, de 22% de cromo con un número equivalente de resistencia de picaduras de corrosión (PREN) < 40 , donde $PREN = \%Cr + 3,3 (\%Mo + 0.5\%W) + 16\%N$. Siendo el 2205, el más ampliamente utilizado.
- Súper Dúplex es por definición un acero inoxidable dúplex con $PREN > 40$. Normalmente, los grados Súper Dúplex tienen 25% cromo o más, como el 2507.
- Híper Dúplex se refiere a los grados dúplex con un $PREN > 45$ como el 2707.

En la tabla 2.2 se muestran propiedades mecánicas límites ASTM A 240 de aceros dúplex seleccionados.

2.2.4. El Acero Dúplex como biomaterial

Los biomateriales metálicos deben cumplir estrictamente con una serie de requisitos, como por ejemplo: inercia química, compatibilidad biológica, cantidad admisible de impurezas, entre otros. (ISO, 1997).

Los aceros inoxidable dúplex son atractivos como materiales para ser implantados como elementos de fijación ortopédica, placas de huesos, entre otros, en seres vivos, gracias a su alta resistencia a la corrosión y bajos costo, en comparación con el acero inoxidable 316L y aleaciones de titanio, preferidos en esta aplicación.

La biocompatibilidad, que ha sido uno de los mayores inconvenientes a solventar de los biomateriales, para el caso del acero dúplex, es de buena aceptación como se concluye en estudio experimental del SAF 2205 realizada en trabajo de investigación de Gómez (Gómez, 2009).

Tabla 2.2. Propiedades mecánicas mínimas ASTM A 240 para aceros inoxidable dúplex. (IMOA, 2009)

GRADO	UNS	RESISTENCIA A TRACCIÓN [MPa]	RESISTENCIA DE FLUENCIA 0,2% [MPa]	ELONGACION %
2304	S32304	400	600	25
2205	S32205	450	655	25
2507	S32750	550	795	15

2.2.5. Fundamentos del Desgaste por Frotamiento

El frotamiento (“fretting”, vocablo del idioma inglés) es un fenómeno complejo, que involucra muchos aspectos tales como la tribología, el contacto mecánico y la ciencia de los materiales.

Las expresiones utilizados para describir el “fretting” pueden ser bastante confusas como desgaste por frotamiento (FW, por fretting wear), fatiga por frotamiento (FF, por fretting fatigue) y corrosión por frotamiento (FC, por fretting corrosion). Generalmente, estos términos son derivados de las condiciones específicas de carga o basados en la observación de los daños (Kapsa, Fouvry, & Vincent, 2005).

Se entiende por frotamiento, según el Glosario de términos ASM (ASM, 1992):

“Comprende los fenómenos de desgaste que se producen entre dos superficies con movimiento relativo oscilatorio de amplitud pequeña. Téngase en cuenta que “fretting” es un término frecuentemente usado para incluir la corrosión por frotamiento y otras formas de desgaste. Este uso no se recomienda debido a la ambigüedad que pueda surgir.

Es causado por un movimiento oscilatorio de amplitud pequeña, generalmente tangencial, entre dos superficies sólidas en contacto. Téngase en cuenta que aquí el término “fretting” refiere sólo a la naturaleza del movimiento sin hacer referencia al desgaste, corrosión u otros daños que puedan resultar.”

Al considerar un contacto de bola sobre plano, pueden distinguirse distintos modos de desgaste en función del tipo de movimiento relativo (Figura 2.1). Todos estos casos pueden encontrarse en situaciones prácticas, pero es más frecuente la aparición de frotamiento tangencial (Kapsa, Fouvry, & Vincent, 2005).

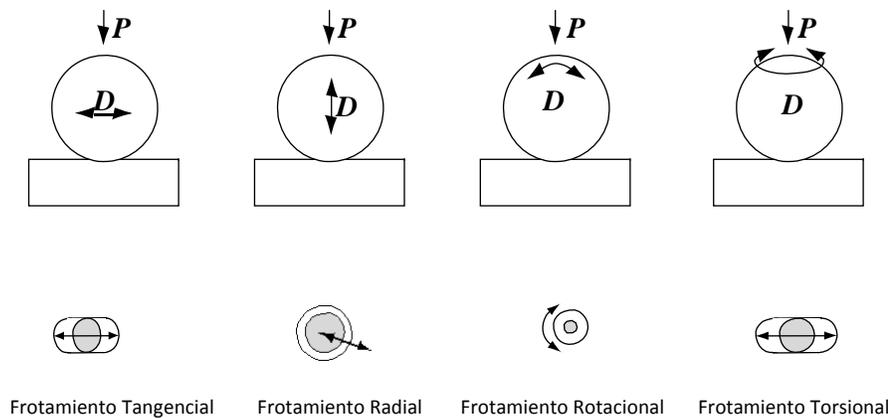


Figura 2.1. Diagrama esquemático de los cuatro modos básicos de frotamiento para un contacto bola sobre plano (Kapsa, Fouvry, & Vincent, 2005)

Daño por frotamiento

Mientras la palabra frotamiento describe bastante bien la oscilación en el contacto, la razón para el desplazamiento no es bien identificada, generalmente. Este inconveniente nos hace pensar en términos de las causas, bien definidas, del frotamiento. Por ejemplo, parece más conveniente considerar el desgaste por frotamiento (FW, por fretting wear) como frotamientos de pequeños desplazamientos que son consecuencia de las vibraciones externas, mientras al frotamiento por fatiga (FF, por fretting fatigue) como resultado de desplazamientos pequeños que sean una consecuencia de la deformación (cíclica) de una de las dos partes en contacto. Y al frotamiento por corrosión (FC, por fretting corrosion), se le suele utilizar cuando una reacción química domina durante el proceso tribológico, y con la participación de deslizamiento de pequeña amplitud. (Kapsa, Fouvry, & Vincent, 2005)

El daño por frotamiento ha sido observado en una variada serie de situaciones prácticas, por ejemplo, juntas remachadas, placas atornilladas, en cables (guayas), en cojinetes de bolas y en implantes biomédicos (Waterhouse, 1992).

Los implantes metálicos en el cuerpo humano son ampliamente utilizados en la cirugía, y sus procesos de corrosión y degradación están siendo investigados extensamente alrededor del mundo. Como con otros componentes estructurales, son posibles mecanismos de falla en implantes ortopédicos: la fractura mecánica, el desgaste y la corrosión, o, más importante aún, las combinaciones de estos factores. Muchos implantes están expuestos a cargas elevadas y desgaste intenso, los cuales, como consecuencia de los movimientos del paciente, son repetidos un inmenso número de veces. El efecto de la degradación, consecuente en los metales, es aumentado por el hecho de que, el fluido corporal en el entorno, es corrosivo. Teniendo en cuenta el alto costo humano de la cirugía de revisión y el hecho de que incluso "pequeñas" cantidades de productos de corrosión, liberados en el tejido del cuerpo son inaceptables, es evidente que la naturaleza y distribución de productos de corrosión, liberados en el cuerpo por implantes ortopédicos sigue siendo un problema importante. Se están desarrollando implantes modulares y la

corrosión y el desgaste por frotamiento son posibles problemas de degradación. (Hoeppe & Chandrasekaran, 1994).

Regímenes del frotamiento

El desplazamiento relativo induce carga tangencial, que puede ser descrita por el ciclo de frotamiento: $Q(t)=f(\delta(t))$ (Figura 2.2). Se identifican dos condiciones de frotamiento: deslizamiento parcial, que se caracteriza por un ciclo elíptico cerrado, asociado a un contacto compuesto zonas de deslizamiento y atascamiento. La condición de desplazamiento bruto, la cual se identifica mediante un ciclo de frotamiento cuadrático disipativo, está relacionada con un deslizamiento completo que se produce en toda la interfaz (Fouvry, Kapsa, & Vincent, 2003).

El coeficiente de fricción cambia durante la carga y esto puede conducir a un cambio de condición de deslizamiento. Entonces, es posible definir distintos regímenes de frotamiento: Régimen de Deslizamiento Parcial (PSR, Partial Slip Regime): cuando se mantiene la condición de deslizamiento parcial durante la prueba; Régimen Mixto de Frotamiento (MFR, por Mixed Fretting Regime): cuando hay una transición de un estado a otro; Régimen de Deslizamiento Bruto (GSR, por Gross Slip Fretting): cuando se mantiene la condición de desplazamiento bruto. En la Figura 2.3 se indica la correlación entre el régimen de deslizamiento y la evolución del daño (Fouvry, Kapsa, & Vincent, 2003).

El agrietamiento se encuentra principalmente en los regímenes de deslizamiento parcial y regímenes mixtos de frotamiento establecidos bajo condición de deslizamiento parcial, considerando que el desgaste es observado para amplitudes grandes en regímenes de desplazamiento bruto. En la Figura 2.3, se señala el mapeo experimental de la respuesta de material (MRFM, Material Response Fretting Mapping). Un defecto importante de este enfoque de asignación es el uso de variables mecánicas como la fuerza normal y la amplitud de desplazamiento que, dependiendo de la geometría y propiedades mecánicas estudiadas, no puede permitir una correlación directa entre situaciones de frotamiento (Fouvry, Kapsa, & Vincent, 2003).

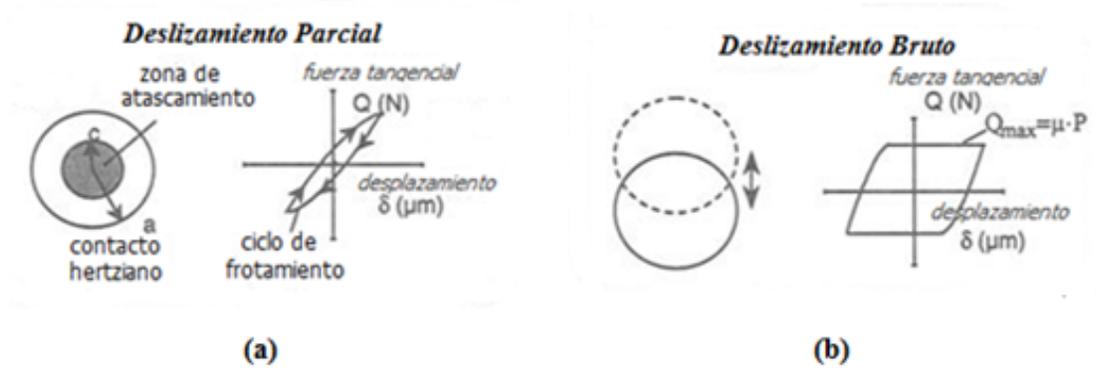


Figura 2.2. Ilustración de las condiciones de deslizamiento por frotamiento (Fouvry, Kapsa, & Vincent, 2003)

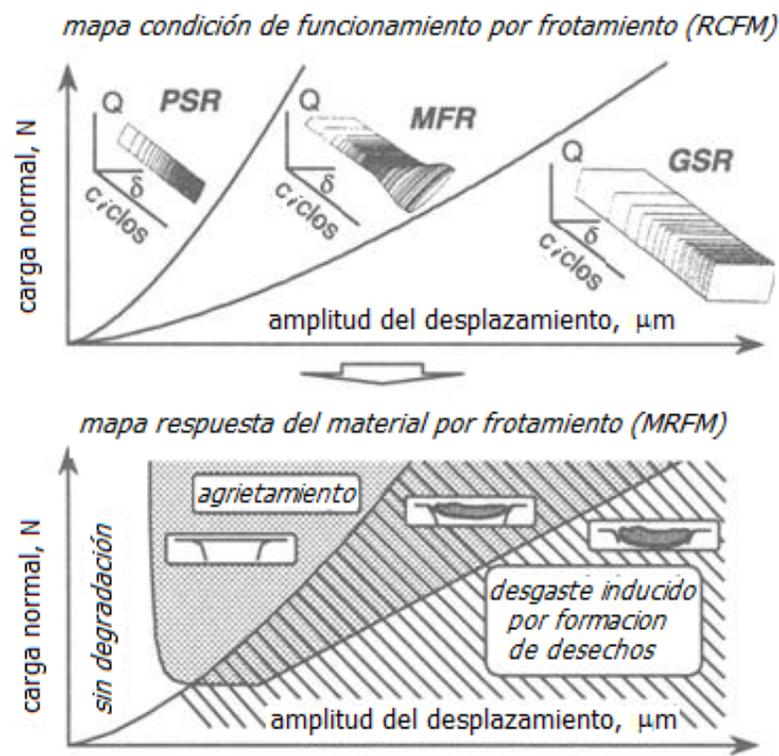


Figura 2.3. Representación de la carta de frotamiento que combina el análisis del régimen de frotamiento (RCFM) con la respuesta del material (MRFM) (Fouvry, Kapsa, & Vincent, 2003)

Parámetros que afecta el frotamiento

Los fenómenos de frotamiento son complejos y pueden ser influenciados por numerosos parámetros. Entre estos, los más importantes son considerados en este aparte.

Naturaleza de los cuerpos en contacto

En los casos de contactos homogéneos (mismo material para los dos cuerpos de deslizamiento), las propiedades de los materiales se han utilizado para describir el agrietamiento inducido por frotamiento. Varias aleaciones de aluminio han sido comparadas bajo los dos regímenes, "deslizamiento parcial" y "mixto", y comportamientos diametralmente diferentes fueron observados. Estos comportamientos pueden explicarse en términos de la resistencia de estos materiales a la nucleación y la propagación de grietas. De manera similar, para una aleación Ti-6Al-4V, la aparición de la grieta dominante fue claramente relacionados con su límite de fatiga. Generalmente, en los casos de desgaste inducido por frotamiento, las partículas se desprenden mucho antes que la iniciación de la grieta por fatiga y parece razonable asociar el dominio de desprendimiento de partículas con el régimen de desplazamiento bruto. Determinación del comportamiento por frotamiento es mucho más complejo en los casos de contacto heterogéneo (Kapsa, Fouvry, & Vincent, 2005).

Naturaleza de la carga

La carga que actúa en contacto de materiales es uno de los principales parámetros. Representa el "motor" de los daños. La carga de contacto parece depender fuertemente del comportamiento normal de contacto, en particular del coeficiente de fricción. Debe considerarse su evolución con los parámetros tribológicas típicos, como la fuerza normal y la amplitud del deslizamiento. La distribución de la presión de contacto, también, es un parámetro importante. Normalmente, los tribologistas consideran que un contacto bola sobre plano conduce a una distribución de presión parabólico. Esto no es siempre el caso en muchas situaciones prácticas. Es de primordial interés considerar la distribución de presión real en el contacto real el cual tiene que ser reproducido durante las pruebas de laboratorio.

En la mayoría de los casos, si tenemos en cuenta que el volumen elemental desgaste local es proporcional a la energía local que se disipó, el perfil de la huella de desgaste representa de hecho un perfil de la distribución de presión. Como a menudo el deslizamiento genera un tercer cuerpo, el efecto de este cuerpo extraño en el contacto debe ser considerado. La distribución de presión puede fuertemente ser afectada y modificada por el fenómeno tribológico y ubicaciones de máxima resultante en la distribución de la tasa de desgaste local modificada. (Kapsa, Fouvry, & Vincent, 2005)

Entorno

Un entorno químicamente activo puede provocar transformación superficial y también puede acelerar el deterioro de materiales en contacto, si el desgaste por frotamiento elimina las capas de superficies protectoras. Los daños inducidos en las superficies del material son sensible a las variables implicadas en el proceso frotamiento. Estas variables pueden clasificarse en tres categorías: las condiciones de contacto (aspectos mecánicos), las condiciones ambientales (aspectos químicos) y las propiedades del material en contacto (aspectos del material). Los mapas de frotamiento también parecen ser una herramienta muy útil en el análisis de los efectos ambientales. La humedad relativa puede modificar la fuerza tangencial necesaria para imponer el desplazamiento y la transición entre el deslizamiento parcial y las condiciones de desplazamiento bruto. Los cambios de propiedad del material son tenidos en cuenta por MRFM y puede mostrar las diferencias debidas, por ejemplo, a la fragilización por hidrógeno. En caso de desgaste inducido por frotamiento, la formación de plaquetas puede impedir que los desechos sean expulsados del contacto y así reducir el desgaste. (Kapsa, Fouvry, & Vincent, 2005)

Frecuencia

La frecuencia de movimiento es un parámetro importante para el comportamiento dinámico de un sistema mecánico. La frecuencia de hecho puede cambiar la amplitud de deslizamiento cuando se activa alguna resonancia o amortiguación. Los MRFM son influenciados por la frecuencia de la carrera. Las frecuencias altas de carrera pueden inducir

calentamiento y así modificar el coeficiente de fricción o propiedades del material. El principal efecto de frecuencia de carrera debe explicarse en términos del concepto de tercer cuerpo. Una vez formado el contacto, es atrapado los desechos. Son necesarios varios ciclos antes de su expulsión y este fenómeno mecánico puede ser influenciado por la velocidad de movimiento (relacionada con la frecuencia). En caso de aceros de baja aleación y aceros inoxidable, pequeños cambios en la frecuencia (de 0,1 a 12,5 Hz) mostraron aumentar el riesgo de nucleación de grietas; la alta frecuencia favorece la expulsión de los desechos y evita así el efecto beneficioso del tercer cuerpo. Al considerar la geometría del contacto, entre más fácilmente es expulsado del contacto el desecho, más fácilmente tienden a nuclear las grietas. Este factor es de especial importancia en aplicaciones industriales debido a la amplia gama de frecuencias (0,01 Hz a varios kilohercios) observado en sistemas reales, y es necesario seguir trabajando para analizar plenamente sus efectos (Kapsa, Fouvry, & Vincent, 2005).

Temperatura

La temperatura de contacto, a menudo erróneamente interpretada como aumento de la temperatura y uno de los principales factores que afectan el frotamiento, se estima sólo de observaciones metalográficas. Por ejemplo, áreas de grabado blanco observadas en cortes transversales se utilizaron como un indicador de temperatura muy alta. Los resultados, basados en el monitoreo de los potenciales eléctricos de la interfaz, indican que el aumento de la temperatura media de contacto es del orden de 20 K, para un acero carbono medio en determinadas condiciones experimentales. Sin embargo, el efecto de la temperatura no puede ser desestimado, ya que el aumento de la temperatura en la interfaz de contacto tiene un efecto significativo sobre los aspectos mecánicos y químicos de procesos de frotamiento de desgaste y de fatiga. Una medición directa de la temperatura de contacto en frotamiento es difícil de realizar debido a la naturaleza del campo de temperatura (tanto en dominios de espacio y tiempo) y debido a las limitaciones de las técnicas de medición. Por lo tanto, están surgiendo modelos teóricos y numéricos como el enfoque más viable y práctico (Kapsa, Fouvry, & Vincent, 2005).

3. Consideraciones Metodológicas

En esta sección describe la metodología empleada, detalles del material de los especímenes de prueba, la configuración experimental, las técnicas utilizadas para medir las variables de prueba, así como también, los detalles del plan de ensayos.

La investigación se desarrolló en cuatro fases: La primera, correspondiente a la revisión de la literatura y definición de las variables del fenómeno físico objeto de estudio. La segunda, en la que se adquirió, preparó y caracterizó el material del espécimen de ensayo. La tercera incluyó el diseño experimental y desarrollo de las pruebas. Una cuarta y última fase para análisis de datos y/o resultados y conclusiones finales. En la figura 3.1 se muestra un esquema de las fases anteriormente descritas.

3.1. Adquisición del material

Una barra de Acero Dúplex SAF 2507 de 30 mm de diámetro y 1000 mm de longitud, fue proporcionada por SANVEN STEEL, C.A., cuyo certificado de inspección del material, se encuentra disponible en anexo A. En este certificado se muestra la caracterización química y propiedades mecánicas típicas, del espécimen empleado en el estudio.

La barra se cortó en cinco discos de 10 mm de espesor mediante corte por electroerosión de hilo, en equipo Marca Charmilles, Modelo Robofil 290 de la Empresa Promecor 2 C.A., ubicada en la Zona Industrial La Quizanda. Mediante el sistema de electroerosión de hilo, se logra mayor precisión y calidad para el corte, sin producir ninguna alteración y con menor desperdicio de material.

Las bolas son de acero AISI 52100 de 6 mm de diámetro, de uso estándar de cojinetes SKF 6202-2Z disponible comercialmente. Se consideró la utilización de este acero como contraparte, principalmente, gracias a su alta dureza, alrededor de tres órdenes de magnitud por encima de la dureza del acero dúplex empleado, lo que permitió no

considerarlo en los cálculos de volumen de desgaste, como se explica más adelante en la evaluación de la huella.

3.2. Preparación de las muestras

En la preparación de las muestras se siguió el procedimiento general empleado para la preparación de muestras para un análisis metalográfico, que se resume en el párrafo a continuación.

Una cara de la superficie plana del espécimen fue desbastada con papel abrasivo (lija) con numeraciones de 180, 240, 320, 400, 600, 1500 y pulidas con partículas de alúmina en suspensión de 3 y 1 micras, en equipos de preparación metalografía Marca Buehler disponible en el Laboratorio de Materiales de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Carabobo (LMAT-UC) y finalmente, se realizó un acabado final con partículas de alúmina en suspensión de 0,05 y 0,01 micras en equipo pulidor marca Buehler, Modelo metarserv 2000, disponible en el Laboratorio de Tribología del Centro de Ciencias de Nuevos Materiales y Corrosión (CEMANCOR) de la Universidad Central de Venezuela. Esta preparación se desarrolló con la finalidad de alcanzar una superficie con la rugosidad promedio (R_a) cerca 0,01 μm , y así obtener un fondo para proveer buen contraste de la huella en el análisis por microscopía. Adicionalmente, el espécimen fue limpiado con acetona y alcohol antes de la realización de la prueba.

Las bolas se extrajeron de su carcasa con un desarmador, luego limpiadas con acetona, alcohol y mediante ultrasonido, a fin de remover el lubricante y finalmente, secadas para eliminar residuos de los solventes utilizados. Se empleó una bola distinta en cada prueba. La rugosidad promedio de las bolas fue establecida de 0,01 μm según norma ASTM G 99-04 (ASTM, 2004).

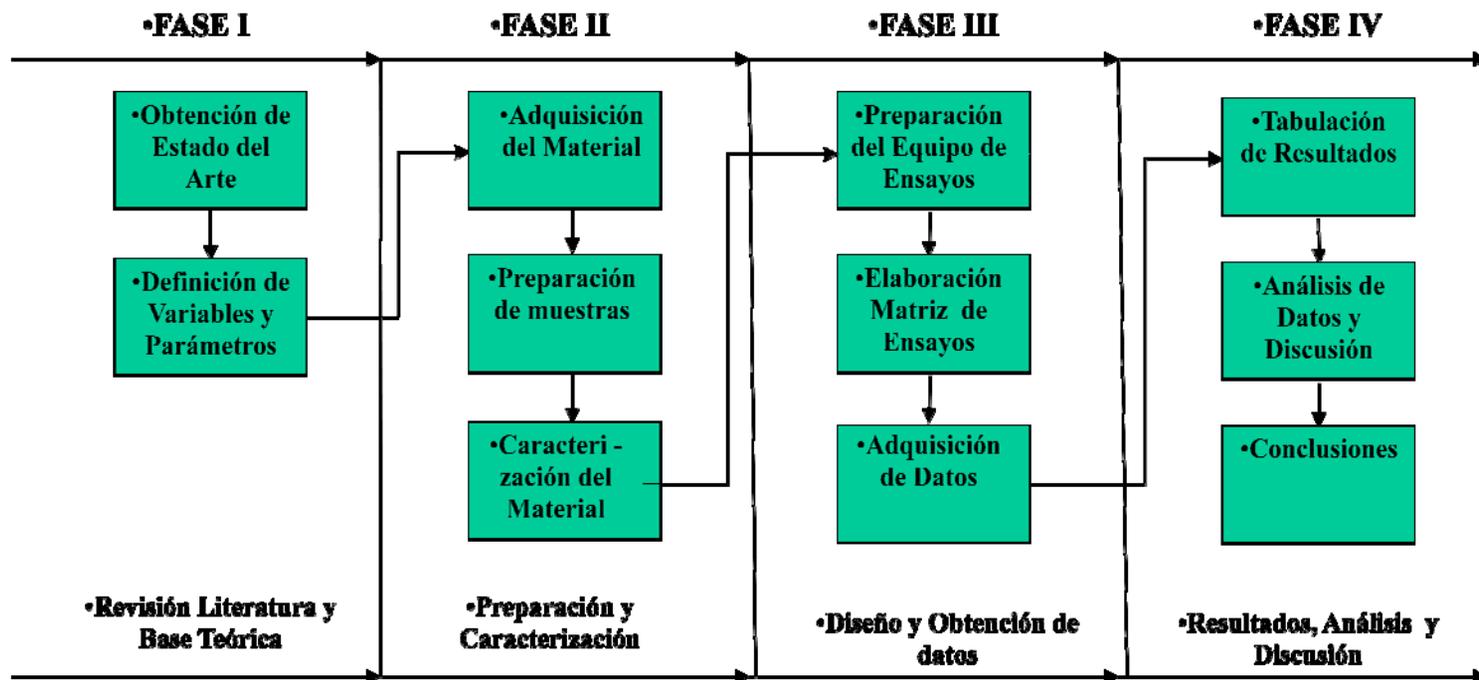


Figura 3.1. Fase del desarrollo de la investigación

3.3. Caracterización del Material

Los discos de acero dúplex fueron caracterizados en su superficie, midiendo la rugosidad promedio R_a , utilizando un rugosímetro Marca Mitutuyo Modelo SJ-201P de precisión de 0,01 μm , disponible en LMAT-UC.

Igualmente, se determinó la dureza del acero dúplex SAF 2507 mediante un durómetro tipo Vickers, Marca Buehler, Modelo Indentamet 1100, con carga de 1 kg, con una precisión de 0,1 HV, disponible en LMAT-UC.

Las demás propiedades fueron obtenidas del certificado de inspección del material suministrado por el fabricante (Sandvik, 2000), disponible en el anexo A.

3.4. Equipo de ensayo

Las pruebas de desgaste por frotamiento fueron desarrolladas en tribómetro tipo bola sobre disco disponible en el Laboratorio de Tribología de CEMANCOR, cuyas características de diseño y construcción se detallan en Hernández y Paiva (Hernández & Paiva, 2003). En este tribómetro, los parámetros que se pueden variar son la carga, frecuencia, y la longitud de la carrera. En la figura 3.2, se muestra un esquema donde se señalan las partes principales. En esta máquina, el disco plano oscila en su soporte y la bola está estacionaria, actuando la carga normal. El espécimen y su contraparte de contacto, se colocan en soportes apropiados para evitar cualquier desplazamiento durante la prueba (ver la figura 3.3).

3.5. Selección de los Parámetros de Ensayos

Para los experimentos se seleccionaron tres parámetros (o variables) y dos niveles de variación (o estados). Los parámetros escogidos para su variación, en consideración de la facilidad de control en el tribómetro empleado, fueron: la carga, la frecuencia, y los ciclos de duración. El parámetro de amplitud se estableció como fijo en los ensayos en un valor de 100 μm , debido a que este es el rango mínimo posible que permite el tribómetro.

Para los niveles de variación se tomó uno alto y otro bajo, con los siguientes valores: la frecuencia de oscilación de 10 Hz y 30 Hz; la carga normal aplicada de 10 N y 70 N, y los ciclos de frotamiento (duración) de 10^4 y 10^5 . Las pruebas se realizaron en condición ambiente (en aire) y sin lubricante. Otros parámetros y condiciones de ensayos se muestran en la tabla 3.1.

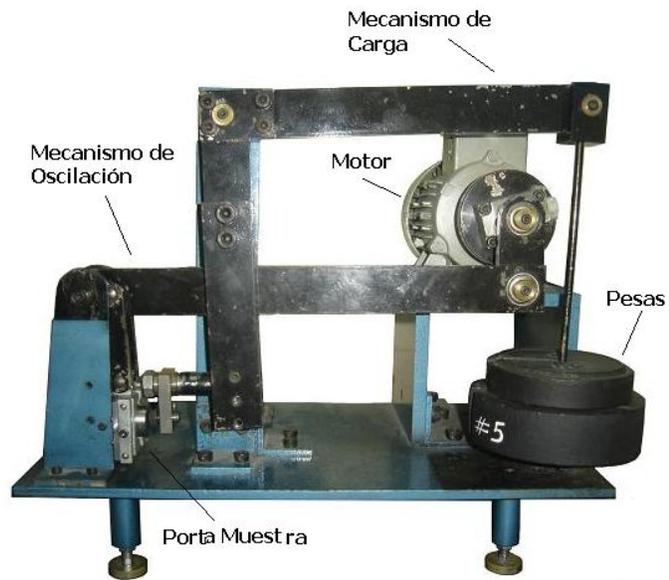


Figura 3.2. Esquema de la máquina para ensayos de desgaste por frotamiento (Hernández & Paiva, 2003)



Figura 3.3. Montaje espécimen para ensayo de desgaste por frotamiento

Tabla 3.1. Condiciones de ensayo de desgaste por frotamiento

SISTEMA TRIBOLÓGICO						
TIPO DE ENSAYO: DESGASTE POR FROTAMIENTO EN DISPOSITIVO BOLA SOBRE DISCO						
VARIABLES OPERATIVAS						
CARGA (N)		FRECUENCIA (Hz)		AMPLITUD (µm)	CICLOS	
10	70	10	30	100	10000	100000
Tipo de movimiento: OSCILATORIO						
ESTRUCTURA DEL TRIBOSISTEMA						
CARACTERÍSTICAS		TRIBOELEMENTO 1	TRIBOELEMENTO 2	ATMÓSFERA		
Tipo de elemento /material		Disco ACERO SAF 2507	Bola ACERO AISI 52 100	AIRE		
Geometría y dimensiones		CILINDRICO PLANO D _{EXT} =30 mm espesor= 10 mm	ESFÉRICO D= 6 mm	No Aplica		
Composición (% peso)		25 Cr 7 Ni 4 Mo 0,23 N 0,02 C	1,35 a 1,65 Cr 0,15 a 0,35 Si 0,25 a 0,45 Mn 0,90 a 1,10 C (ver nota 1)	No Aplica		
Dureza promedio		240 HV	838 HV10 (ver nota 1)	No Aplica		
Rugosidad promedio		0,02 µm	0,01 µm (ver nota 1)	No Aplica		

(1) Valores típicos extraídos de la norma ASTM G 99-04 (ASTM, 2004)

3.6. Diseño Experimental

El diseño experimental se elaboró usando el enfoque de Taguchi (DET). Cuando se compara el DET con el arreglo factorial, el número de pruebas se reduce significativamente y el análisis SN permite obtener la influencia de los parámetros en el comportamiento del desgaste, a un costo más efectivo. Un resumen del procedimiento general de DET, se presenta en el anexo B.

3.6.1. Obtención de la matriz ortogonal DET

Una vez que se han determinado los parámetros que afectan a un proceso que puede ser controlado, deben determinarse los niveles en que deben modificarse estos parámetros. Determinar qué niveles de una variable requiere una comprensión profunda del proceso, incluido el valor mínimo, máximo y actual del parámetro. Por ejemplo, si los ciclos de duración de componente puede variar entre 1×10^4 y 1×10^6 ciclos y se conoce que la duración promedio del componente es de 1×10^5 , podrían ser elegidos tres niveles en 1×10^4 , 1×10^5 y 1×10^6 ciclo. Además, el costo de la realización de experimentos debe considerarse al determinar el número de niveles de un parámetro para incluir en el diseño experimental. Normalmente, el número de niveles para todos los parámetros en el diseño experimental DET se selecciona para ser el mismo con el fin de ayudar en la selección de la matriz ortogonal adecuada (Roy, 1990).

Conocido el número de parámetros y el número de niveles, utilizando la tabla de selección de matriz que se muestra en la figura 3.4, se determina la denominación de la matriz ortogonal (el subíndice representa el número de experimentos que deben completarse). Una vez que se ha determinado el tipo de arreglo, se puede consultar la matriz predefinida creada utilizando un algoritmo desarrollado por Taguchi, logrando que cada variable y valor pueda probarse igualitariamente. Por ejemplo, para esta investigación tenemos tres parámetros (carga, frecuencia, y ciclos) y dos niveles (alto, bajo), de la figura 3.4, puede verse que la matriz adecuada es L4. La matriz L4, se muestra en la figura 3.5. En la

matriz se dan cuatro experimentos diferentes. Los niveles designados como 1, 2, 3 etc. deben sustituirse en la matriz con el nivel real, ver tabla 3.2 para el caso en estudio.

		Número de Parámetros										
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Número de Niveles	2	L4	L4	L8	L8	L8	L8	L12	L12	L12	L12	L16
	3	L9	L9	L9	L18	L18	L18	L18	L27	L27	L27	L27
	4	L'16	L'16	L'16	L'16	L'32	L'32	L'32	L'32	L'32		
	5	L25	L25	L25	L25	L25	L50	L50	L50	L50	L50	L50

Figura 3.4. Selector de Matrices Ortogonales (Roy, 1990)

Parámetros	Niveles
Carga	10, 70 [N]
Frecuencia	10, 30 [Hz]
Ciclos	10^4 , 10^5
3	~2

Matriz

L4

Experiment	P1	P2	P3
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	1	2
4	2	2	1

Figura 3.5. Matriz ortogonal para tres parámetros y dos niveles (Roy, 1990)

En total se planearon cuatro experimentos variando las condiciones de frecuencia de 10 Hz a 30 Hz, la carga de 10 N a 70 N y ciclos de duración de 10^4 a 10^5 , dejando constante la amplitud a 100 μm . Los ensayos fueron realizados por duplicado, con la finalidad de determinar la dispersión de los datos y su influencia.

Tabla 3.2. Matriz Ortogonal de Ensayos

Experimento	Carga [N]	Frecuencia [Hz]	Ciclos
1	10	10	10 ⁴
2	10	30	10 ⁵
3	70	10	10 ⁵
4	70	30	10 ⁴

Además, se desarrollaron dos ensayos adicionales, conservando los parámetros como la amplitud de 100 μm, la frecuencia a 30 Hz, la carga a 70 N para dos ciclos de duración con valores de 10⁵ y 5x10⁵, considerándose estos valores de las variables como una condición severa de operación y así corroborar la tendencia en el comportamiento del desgaste por frotamiento para el volumen y coeficiente de desgaste obtenido.

3.6.2. Análisis experimental SN de los datos

Una vez que se han determinado el diseño experimental ortogonal y las pruebas han sido ejecutadas, la característica del comportamiento medido para cada prueba puede utilizarse para analizar el efecto relativo de los diferentes parámetros.

Para determinar el efecto de cada variable tiene en la salida, la relación señal a ruido, o el número de SN, debe ser calculado para cada experimento llevado a cabo. La ecuación para calcular SN es,

$$SN = 10 \log \frac{\bar{y}_i^2}{s_i^2} \quad (\text{Ec. 3.1})$$

donde

$$\bar{y}_i = \frac{1}{N_i} \sum_{u=1}^{N_i} y_{i,u}$$

$$s_i^2 = \frac{1}{N_i} \sum_{u=1}^{N_i} (y_{i,u} - \bar{y}_i)^2$$

$i =$ número de experimento

u = número de prueba
 N_i = número de ensayos para experimento i

Una vez que estos valores de relación de SN se calculan para cada factor y nivel, son tabulados y el rango R ($R = \text{SN alto} - \text{SN bajo}$) del SN para cada parámetro se calcula y también, es ingresado en la tabla. Cuanto mayor sea el valor R para un parámetro, cuanto mayor el efecto que la variable tiene en el proceso.

3.7. Evaluación de la huella de desgaste

Luego de realizadas las pruebas de desgaste por frotamiento, las superficies desgastadas fueron limpiadas con acetona y alcohol para descartar cualquier desecho del desgaste.

3.7.1. Determinación del Volumen y Coeficiente de desgaste

El volumen desgastado se obtuvo asumiendo que no existe desgaste en la bola y todo el material perdido corresponde solo al disco, esto es posible debido a la amplia diferencia de dureza de los materiales empleados. Se considero que la huella de desgaste en el disco plano producida por la bola es aproximadamente de la forma de un segmento o casquete esférico (ver la figura 3.6). Este volumen fue calculado a partir del perfil, determinado por el diámetro promedio de la huella, medido en dos ejes perpendiculares, y la profundidad de la huella, empleando la imagen digital, obtenida mediante un microscopio óptico Marca Unión Modelo MC 86267, equipado con cámara digital Panasonic Modelo WV CP230 y Tarjeta de Captura de Imágenes, en computador con entorno Windows XP, disponible en LMAT-UC. Las dimensiones fueron medidas utilizando el programa para el procesamiento y análisis de imágenes ImageJ (NIH, 2010). La precisión se estimó en 10 μm .

El volumen de desgaste (V_d) fue determinado mediante las ecuaciones 3.2. y 3.3. (Ruff, 1992)

$$V_d = \pi/6 h (3d^2/4 + h^2) \quad (\text{Ec. 3.2})$$

$$h = 1/2 (D - \sqrt{D^2 - d^2}) \quad (\text{Ec. 3.3})$$

donde

V_d es el volumen de desgaste [mm^3]

h es la profundidad de la huella [mm]

d es el diámetro promedio de la huella [mm]

D es el diámetro de la bola [mm]

El coeficiente de desgaste (K) de cada espécimen de prueba fue obtenido a partir de la expresión proporcionada por Archard (Archard, 1953), expresándola como se indica en ecuación 3.4., adoptando el desplazamiento acumulado para una condición de frotamiento (movimiento oscilante) según ecuación 3.5, esto permitirá la comparación con distintos aceros y otros materiales, sin considerar la dureza, en similares condiciones de operación.

$$K = k_a/H = V_d/SW \quad (\text{Ec. 3.4})$$

$$S = 2N_t \delta \quad (\text{Ec. 3.5})$$

donde

K es el coeficiente de desgaste [m^2/N]

k_a es la constante de Archard, adimensional

H es la dureza del material [N/m^2]

V_d es el volumen de desgaste [m^3]

W es la carga normal aplicada [N]

S es el desplazamiento total acumulado [m]

δ es la amplitud del desplazamiento [m]

N_t es el número total de ciclos de operación

Adicionalmente, el coeficiente de desgaste (K) se determino de manera grafica empleado la razón de proporción lineal del volumen de desgaste versus el producto del desplazamiento por la carga (V_d vs SW) (Magaziner, Jain, & Mall, 2008).

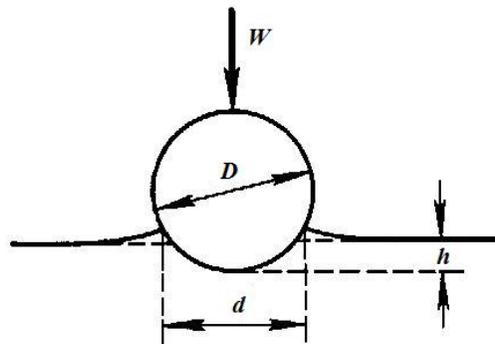


Figura 3.6. Esquema para la determinación del perfil del volumen desgastado

3.7.2. Identificación del Régimen y Mecanismo de desgaste por frotamiento

La huella de desgaste producida en la prueba de frotamiento fue capturada en imágenes, tanto por microscopía óptica (MO) y por microscopía electrónica de barrido (MEB), y analizadas por dispersión de rayos X de (EDX, Energy dispersive X Ray), en Microscopio Electrónico Marca Hitachi Modelo S-2400 disponible en Centro de Microscopía Electrónica de la Escuela de Metalurgia y Ciencia de los Materiales de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela. Estos análisis se realizaron con la finalidad de observar la morfología y así, estimar el régimen y los mecanismos de desgaste por frotamiento.

4. Resultados y Discusión

En esta sección se describen los resultados logrados hasta el presente en esta investigación experimental y se expresan los comentarios, análisis e interpretaciones específicas del estudio realizado que permiten evaluar el comportamiento del acero inoxidable dúplex SAF 2507 ante el desgaste por frotamiento.

4.1. Propiedades del material

Las propiedades del material de ensayo se obtuvieron por intermedio del método y equipos especificados en capítulo 3, sección 3.3.

En la tabla 4.1 se muestra la caracterización de la superficie (la rugosidad) y la dureza del acero dúplex SAF 2507, obtenida en esta evaluación.

Tabla 4.1. Caracterización para el acero inoxidable dúplex 2507 ensayado

RUGOSIDAD R_a [μm]	0,02 \pm 0,01
DUREZA HV 1	240\pm 0,1

La recopilación de datos de la evaluación experimental del material, suponen una resistencia del acero dúplex SAF 2507 al desgaste por frotamiento, mayor que la del acero 316L, como se desprende del modulo de elasticidad reportado en la Tabla 2.1 y la dureza obtenida en la evaluación realizada (Tabla 4.1) y al coeficiente de desgaste determinado (Tabla 4.2).

El coeficiente de desgaste obtenido (Tabla 4.2) para el acero inoxidable dúplex SAF 2507, se estimo comparable cualitativamente al reportado en otras investigaciones para aceros inoxidables dúplex realizadas en tribómetro tipo espiga sobre disco (Szyndelman, 2008) (Renedo, 2010) (Medina & Peralta, 2010), sin embargo su valor cuantitativo, para las

condiciones evaluadas se encuentra en dos órdenes de magnitud por encima del reportado en mapas de frotamiento para aceros en general (Knudsen & Massih, 2005). Estas discrepancias se relacionan con las diferencias en el tipo de tribómetro empleado, la naturaleza de las superficies en contacto, las condiciones del movimiento y la metodología usada para determinar el volumen y coeficiente de desgaste.

4.2. Comportamiento ante el desgaste por frotamiento

A continuación se presenta los resultados de las pruebas realizadas en el tribómetro de simulación del frotamiento de acuerdo a la metodología presentada en el capítulo 3, sección 3.4.

4.2.1 Datos del volumen y coeficiente de desgaste

La tabla 4.2 se listan los resultados experimentales de la evaluación del comportamiento de desgaste por frotamiento del acero dúplex SAF 2507- para las condiciones de operación propuestas en las pruebas diseñadas. En la tabla 4.2 se reportan los datos para el diámetro de la huella, la profundidad de la huella, el volumen de desgaste y el coeficiente de desgaste, tanto de los experimentos realizados según el diseño DET, correspondiente a las pruebas del 1 al 4, como los experimentos adicionales, correspondientes a las pruebas 5 y 6. Todos los experimentos se muestran con dos repeticiones, señalados con los sub índices a y b.

En las figuras 4.1 a 4.3, se muestra el comportamiento del volumen de desgaste como una función de los ciclos de duración, la carga y la frecuencia del frotamiento, donde se puede observar la relación entre estos parámetros.

En la figura 4.4, se muestra el comportamiento del coeficiente de desgaste como una función de los ciclos de duración del frotamiento, donde se observa la relación de esta variable para cada frecuencia y carga probada.

En la figura 4.5, se muestra la determinación grafica del coeficiente de desgaste como una relación de proporción lineal entre el volumen de desgaste y el producto de la carga por el desplazamiento.

Tabla 4.2. Resumen de resultados experimentales del comportamiento de desgaste por frotamiento para el acero dúplex SAF 2507 para una amplitud de 100 μm y demás condiciones de operación que se especifican

Experimento	Carga [N]	Frecuencia [Hz]	Ciclos	Diámetro Huella [μm]	Profundidad Huella [μm]	Volumen Desgaste [mm^3]	Coefficiente Desgaste $\times 10^{-9}$ [m^2/N]
1a	10	10	10000	207,392	1,793	30,282	1,544
1b	10	10	10000	196,899	1,616	24,602	1,254
2a	10	30	100000	215,416	1,934	35,451	0,181
2b	10	30	100000	215,725	1,940	35,249	0,180
3a	70	10	100000	376,515	5,913	329,266	0,240
3b	70	10	100000	346,888	5,018	237,185	0,173
4a	70	30	10000	340,715	4,841	220,739	1,608
4b	70	30	10000	357,998	5,345	269,082	1,960
5a	70	30	100000	334,543	4,667	205,166	0,149
5b	70	30	100000	352,443	5,180	252,756	0,184
6a	70	30	500000	360,467	5,419	276,587	0,040
6b	70	30	500000	349,357	5,090	244,014	0,036

4.2.2 Efecto de los parámetros variados en el desgaste por frotamiento

Como se indico en el capítulo 2, sección 2.2.5, el fenómeno de frotamiento es influenciado por numerosos parámetros. En esta sección se discuten los efectos de la variación del ciclo de duración, la carga aplicada y la frecuencia de oscilación.

Efecto del ciclo de duración sobre el volumen de desgaste

De los datos la tabla 4.2 y de la figura 4.1, se interpreta el efecto de los ciclos de duración sobre el volumen de desgaste. Se observa que el volumen de desgaste incrementa con el incremento de los ciclos de duración del frotamiento en las condiciones de operación evaluadas, esta proporcionalidad en la descrita por la ecuación 3.4, de la sección 3.7.1 del capítulo 3. En particular, para las condiciones de carga de 70 N y la frecuencia de 30 Hz, en el rango de 10^4 a 5×10^5 ciclos, el volumen de desgaste es aproximadamente proporcional al número de ciclos. Al realizar un análisis de tendencia, se asume que un patrón exponencial, es el que mejor ajusta a los datos. Este tipo de proporcionalidad, conduce a estimar que la tasa de desgaste instantáneo es inversamente proporcional al tiempo acumulado.

Efecto de la carga sobre el volumen de desgaste

De los datos de la tabla 4.2 y de la figura 4.2, deduce el efecto de la carga sobre el volumen de desgaste. Se aprecia que el volumen de desgaste incrementa con el incremento de la carga normal en las condiciones de operación evaluadas, esta proporcionalidad valida la ecuación 3.4, de la sección 3.7.1 del capítulo 3. Este comportamiento supone la generación de más desechos de desgaste en el área de contacto por frotamiento.

Efecto de la frecuencia sobre el volumen de desgaste

De los datos la tabla 4.2 y de la figura 4.3, infiere el volumen de desgaste calculado como una función de la frecuencia de oscilación. Se aprecia que para un rango bajo de carga, el volumen de desgaste se mantiene aproximadamente constante para los cambios de frecuencia, sin embargo, para un rango alto de carga volumen de desgaste decrece con

el incremento de la frecuencia de oscilación. Este comportamiento puede deberse a la velocidad de expulsión de los desechos, que tiende a disminuir por la alta velocidad del desplazamiento.

Efecto del ciclo de duración sobre el coeficiente de desgaste

Los efectos discutidos del comportamiento proporcional del volumen respecto a la variación de la carga normal y los ciclos de duración, ratifican la validez de la utilización de la ecuación 3.4, de la sección 3.7.1 del capítulo 3, para determinar el coeficiente de desgaste por frotamiento. Los valores obtenidos para las condiciones evaluadas están disponibles en la de la tabla 4.2.

De la figura 4.4, se desprende el efecto de los ciclos de duración sobre el coeficiente de desgaste. Se observa que el coeficiente de desgaste decrece con el incremento de los ciclos de duración del frotamiento en las condiciones de operación evaluadas, tal como describe la ecuación 3.4, de la sección 3.7.1 del capítulo 3. Por ejemplo, para las condiciones de carga de 70N y la frecuencia de 30 Hz, en el rango de 10^4 a 5×10^5 ciclos, el coeficiente de desgaste es inversamente proporcional al número de ciclos. Al realizar un análisis de tendencia, se tiene que un patrón potencial, es el mejor ajuste a los datos, lo cual induce optimizar el modelo Archard en el parámetro de duración en una potencia de 0,987 para la condición de frotamiento. Para las condiciones evaluadas, los valores del coeficiente de desgaste se sitúan en el rango de $1,96 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{N}$ hasta $3,60 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{N}$. En el caso específico, con las condiciones de carga de 70N, la frecuencia de 30 Hz y en el rango de 10^4 a 5×10^5 , empleando el método gráfico de proporcionalidad lineal (figura 4.5) del volumen versus desplazamiento por carga, se obtiene un valor de coeficiente de desgaste de $0,0033 \text{ mm}^3/\text{mN}$ ($3,3 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$).

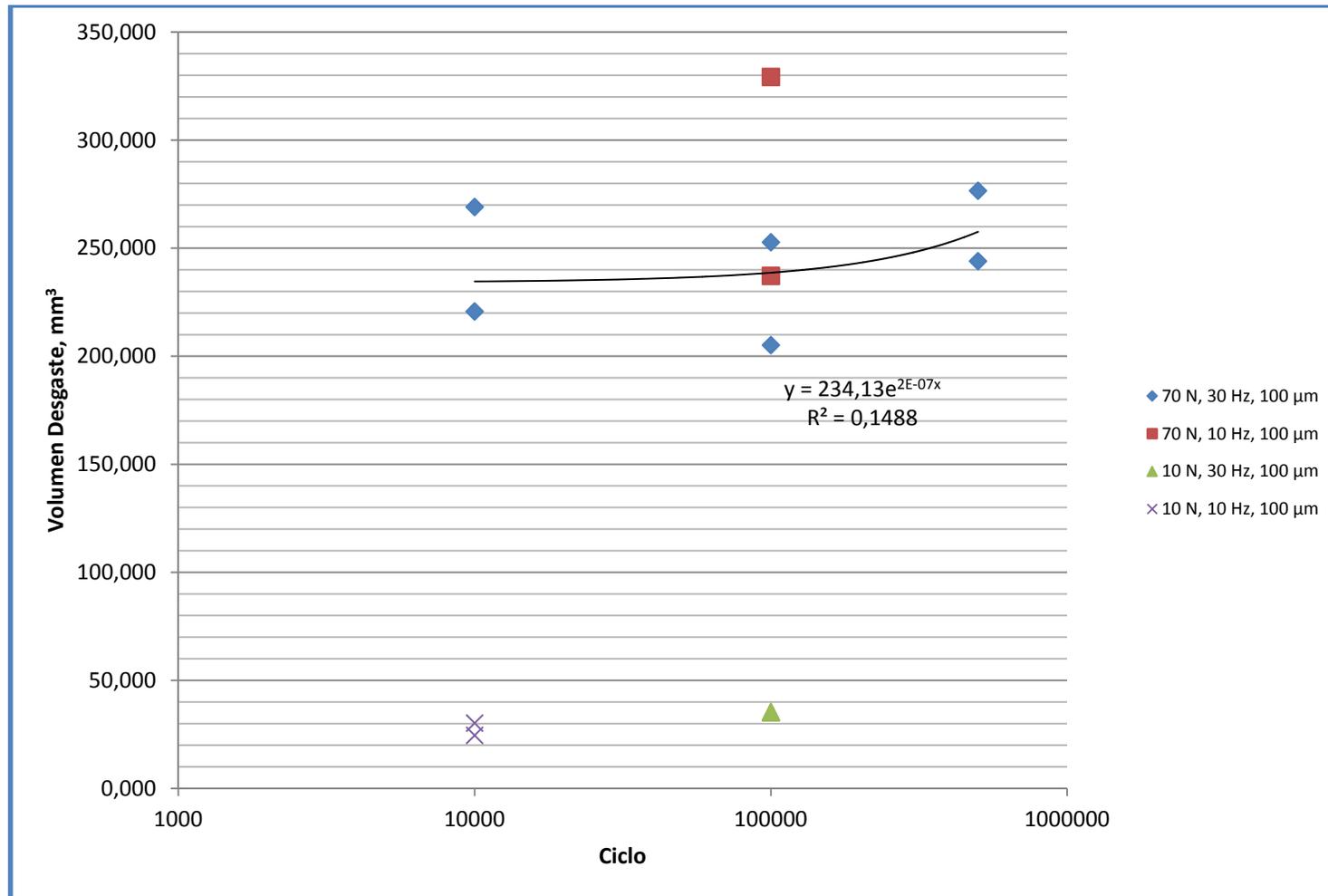


Figura 4.1. Volumen de desgaste por frotamiento para el acero dúplex SAF 2507 como función del ciclo de duración

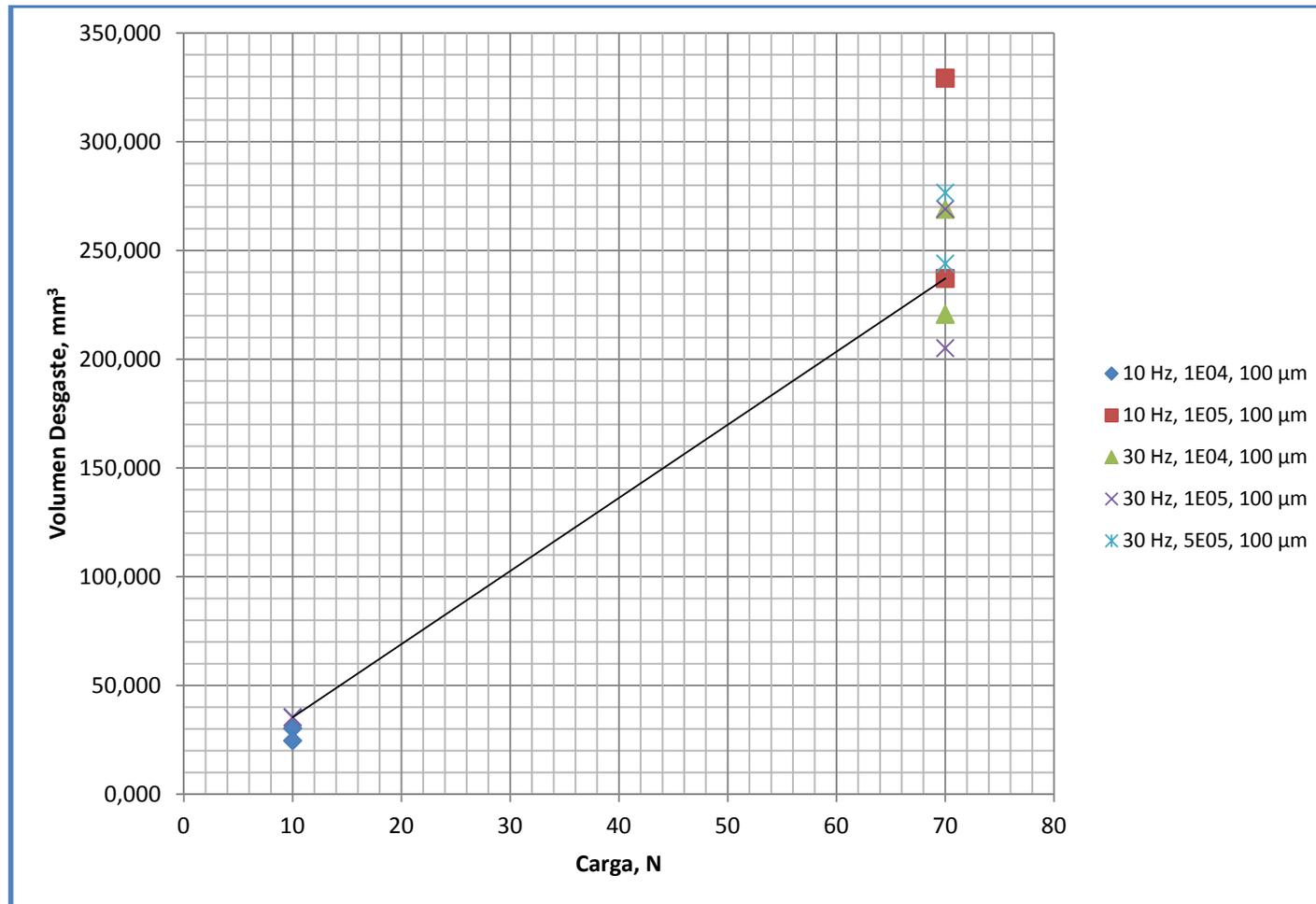


Figura 4.2. Volumen de desgaste por frotamiento para el acero dúplex SAF 2507 como función de la carga normal

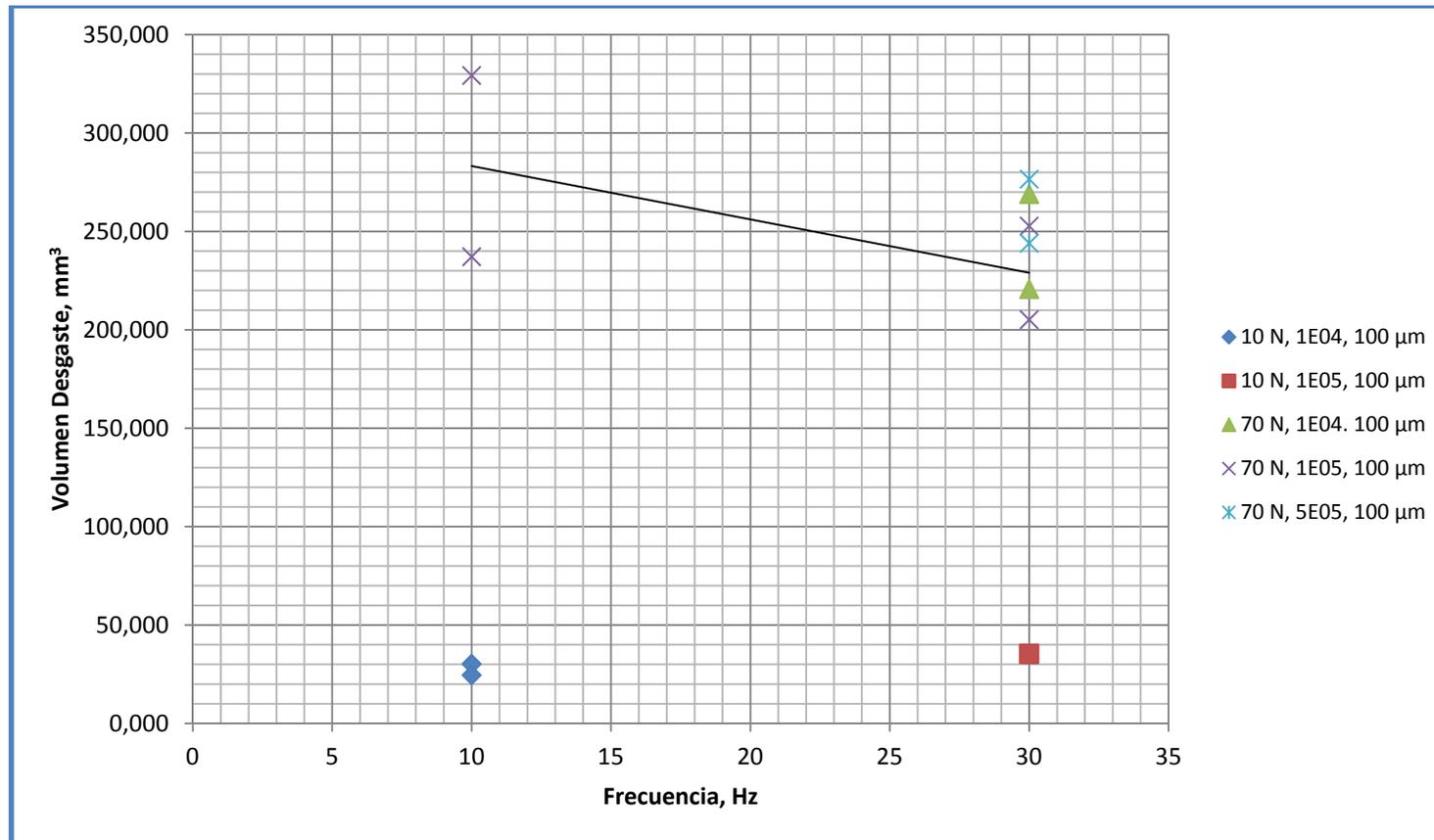


Figura 4.3. Volumen de desgaste por frotamiento para el acero dúplex SAF 2507 como función del clico de la frecuencia

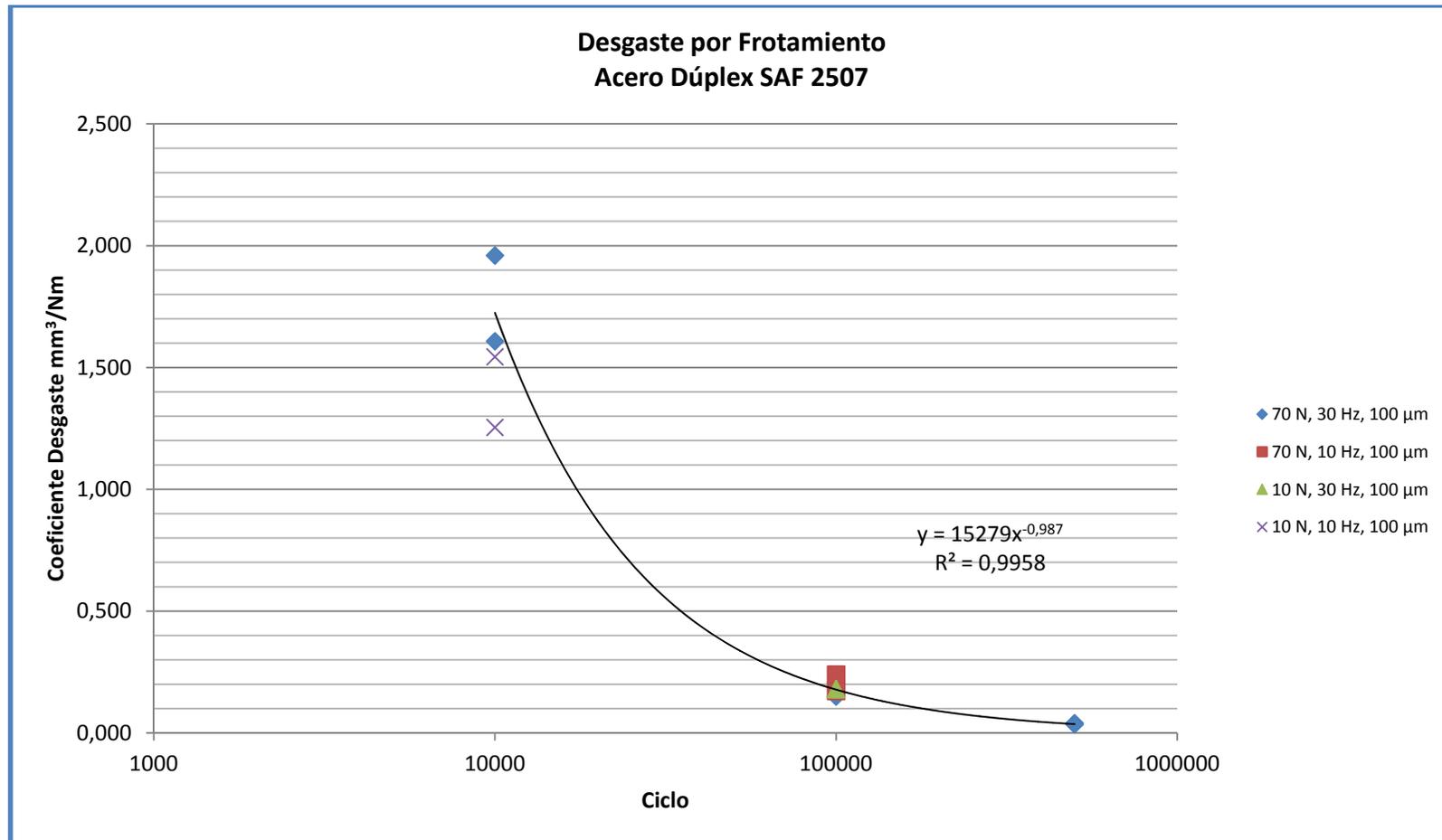


Figura 4.4. Coeficiente de desgaste por frotamiento para el acero dúplex SAF 2507 como función del ciclo de duración

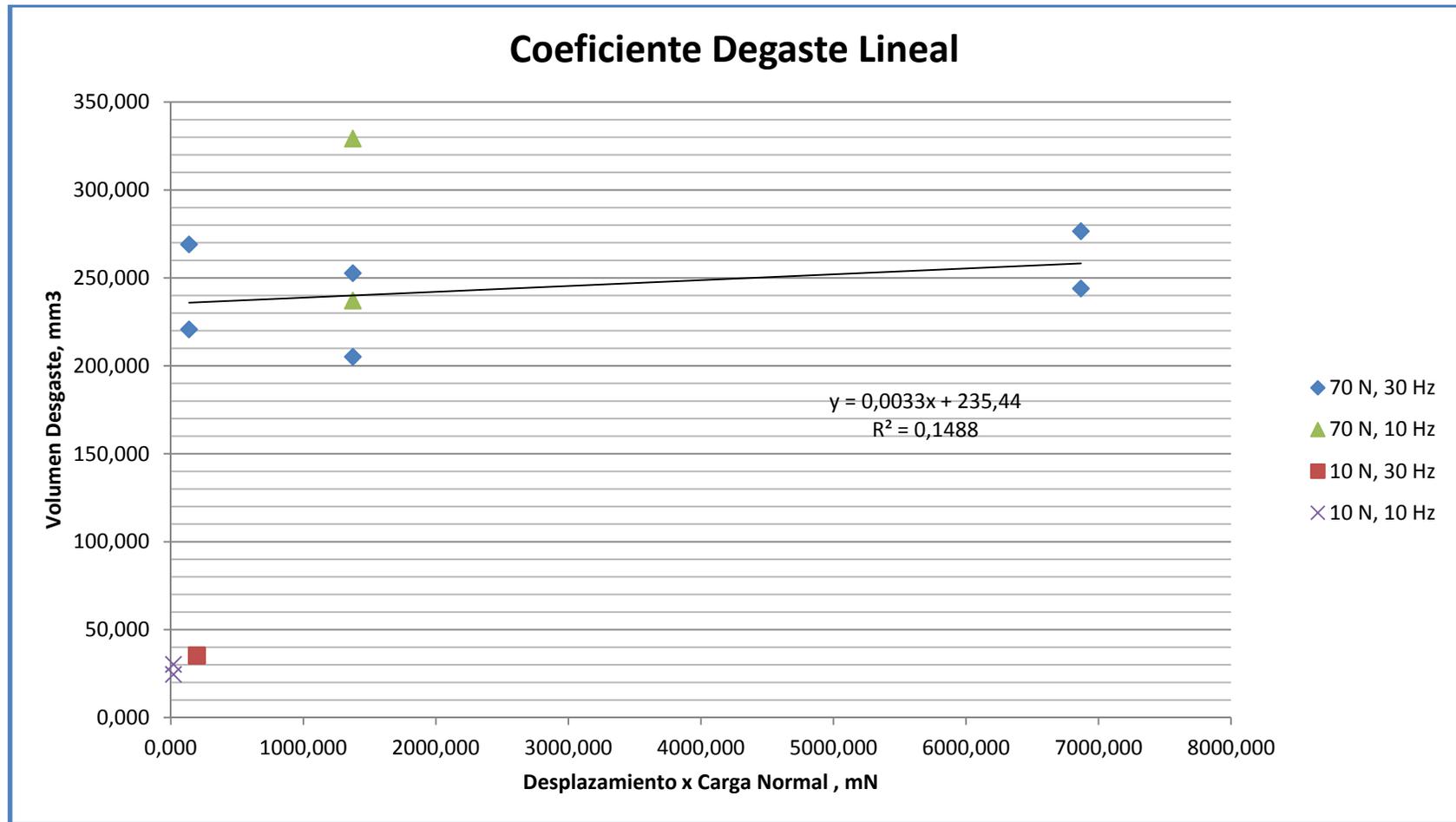


Figura 4.5. Determinación del coeficiente de desgaste por razón de proporcionalidad lineal para el acero dúplex SAF 2507

4.2.3 Análisis de datos mediante Taguchi

El DET permite el análisis de la dispersión de los datos recolectados mediante la determinación de la relación señal a ruido, o número SN (Roy, 1990), y así determinar cuál de los parámetros variados ejerce su mayor influencia. Los detalles del cálculo de número SN para las observaciones realizadas del volumen de desgaste por frotamiento, se disponen a continuación.

En la tabla 4.3 se resumen la matriz ortogonal con los datos para el volumen de desgaste de caso estudiado. En este arreglo se describe los resultados de los experimentos, ejecutados en dos replicas, cada uno considerados para el comportamiento del volumen desgastado por frotamiento.

Tabla 4.3. Matriz ortogonal y resultados del comportamiento del volumen desgastado en frotamiento

VOLUMEN DESGASTE							
EXPERIMENTO	CARGA	FRECUENCIA	CICLO	PRUEBA 1	PRUEBA 2	PROMEDIO	DESVIACIÓN
1	10	10	10000	30,282066	24,602217	27,4	4,0
2	10	30	100000	35,24903	35,45143	35,4	0,1
3	70	10	100000	329,26565	237,1853	283,2	65,1
4	70	30	10000	220,73872	269,08204	244,9	34,2

Seguidamente, se muestra el cálculo del SN para el primer experimento en la matriz mostrada en la tabla 4.3, similar procedimiento se empleo para el resto de pruebas.

$$S_{m1} = \frac{(30,282+24,402)^2}{2} = 1506,1$$

$$S_{T1} = (30,282^2 + 24,402^2) = 1522,3$$

$$S_{e1} = S_{T1} - S_{m1} = 1522,3 - 1506,1 = 16,1$$

$$V_{e1} = \frac{S_{e1}}{N-1} = \frac{16,1}{1} = 16,1$$

$$SN_1 = 10 \log \frac{(1/N)^{(S_{m1}-V_{e1})}}{V_{e1}} = \frac{(1/2)^{(1506,1-16,1)}}{16,1} = 16,6$$

En la tabla 4.4 se señala la relación SN del volumen de desgaste para cada experimento.

Tabla 4.4. Relación SN del volumen desgastado en frotamiento

VOLUMEN DESGASTE								
EXPERIMENTO	CARGA	FRECUENCIA	CICLO	S_m	S_T	S_e	V_e	SN
1	10	10	10000	1506,1	1522,3	16,1	16,1	16,6
2	10	30	100000	2499,3	2499,3	0,0	0,02	47,9
3	70	10	100000	160433,3	164672,7	4239,4	4239,4	12,7
4	70	30	10000	119962,2	121130,7	1168,5	1168,5	17,1

Los datos de la tabla 4.5 es la respuesta SN de cada parámetro. Esta tabla se creó mediante el cálculo de un valor promedio de SN para cada factor. Seguidamente, se indica un cálculo de muestra para el parámetro B (frecuencia), lo otros se obtienen de forma similar:

$$SN_{B1} = \frac{(16,6+12,7)}{2} = 14,649$$

$$SN_{B3} = \frac{(47,9+17,1)}{2} = 32,457$$

El efecto de este factor es calculado determinado el rango. Se indica un cálculo de muestra para el parámetro A (carga), lo otros se obtienen de forma similar.

$$\Delta = Max - Min = 32,457 - 14,649 = 17,808$$

En resumen, los valores SN para el volumen de desgaste obtenido para cada experimento de la tabla 4.2, se encuentran en la tabla 4.3. En la tabla 4.5 se muestra la respuesta SN para el volumen de desgaste basado en la tabla 4.3, resultando de su análisis que la frecuencia es el parámetro que tiene el mayor efecto sobre el volumen de desgaste y el ciclo de duración el parámetro que tiene el menor efecto en el volumen de desgaste.

Adicionalmente, de la tabla 4.5 se desprende que los niveles óptimos de los parámetros evaluados, que orientan a inferir que un mínimo volumen de desgaste y por consiguiente, un menor coeficiente de desgaste, puede obtenerse con la combinación de carga normal de contacto de 70N, una frecuencia de oscilación de 10 Hz y duración de 10^4 ciclos.

Tabla 4.5. Respuesta SN del volumen desgastado en frotamiento

NIVEL	CARGA	FRECUENCIA	CICLO
1	32,24953	14,64923229	16,85318
2	14,85725	32,45754574	30,2536
Δ	17,39227	17,80831346	13,40041
PONDERACION	2	1	3

4.3. Observaciones mediante Microscopia Óptica y Microscopia Electrónica de Barrido

En esta sección se presentan los resultados y la evaluación de la huella tanto las realizadas en el microscopio óptico (MO) como las logradas en microscopio electrónico de barrido (MEB), y así proceder a identificar el régimen y el mecanismo de desgaste por frotamiento.

En las figuras 4.6 a 4.11 se muestran las microfotografías de las huellas de desgaste obtenidas en cada prueba, en una imagen general realizadas mediante MO a una magnificación de 100x, y las obtenidas mediante MEB en magnificaciones de 200x, 300x y 500x. La flecha en el MO indica el sentido del frotamiento. La nomenclatura alfanumérica que identifica cada imagen coincide con los renglones del experimento correspondiente presentado en la tabla 4.2.

En las figuras 4.6 se muestran las imágenes MO y MEB obtenidas a carga normal de 10N, una frecuencia a 10 Hz por 10^4 ciclos de duración, observándose una marca (huella) de deslizamiento con poco daño superficial.

En las figuras 4.7 se muestran las imágenes MO y MEB obtenidas a carga normal de 10N, una frecuencia a 30 Hz por 10^5 ciclos de duración, con una marca de forma de anular (anillo), apreciándose una zona interna sin deslizamiento y otra externa con deslizamiento y daño al material.

En las figuras 4.8 se muestran las imágenes MO y MEB obtenidas a carga normal de 70N, una frecuencia a 10 Hz por 10^5 ciclos de duración, observándose una marca de deslizamiento con poco daño superficial.

En las figuras 4.9 se muestran las imágenes MO obtenidas a carga normal de 70N, una frecuencia a 30 Hz por 10^4 ciclos de duración, observándose una marca de deslizamiento con poco daño superficial.

En las figuras 4.10 se muestran las imágenes MO obtenidas a carga normal de 70N, una frecuencia a 30 Hz por 10^5 ciclos de duración, observándose una marca de deslizamiento con huellas de rayado.

En las figuras 4.11 se muestran las imágenes MO y MEB obtenidas a carga normal de 70N, una frecuencia a 30 Hz por 5×10^5 ciclos de duración, observándose una amplia marca de deslizamiento con huellas de rayado y una incipiente zona anular.

4.3.1. Régimen del desgaste por Frotamiento

Se ha referido la importancia de identificar el régimen de frotamiento antes de intentar explicar el comportamiento del material y tratar de clasificar el material (Stachowiak, 2005), iguales pasos se empleo en este estudio para el análisis del desgaste por frotamiento del acero dúplex SAF 2507.

Primeramente, un análisis general de la evolución del daño, que se evidencian por las microfotografías obtenidas por MO y ME, presentadas en las figuras 4.6 a 4.11, para el rango de parámetros evaluados, indica que la condición de frotamiento se expone como de deslizamiento parcial, al estar caracterizado por zonas de contacto de deslizamiento, así como, por zonas de atascamiento (como se reseño en sección 2.2.5, descrita en la figura 2.2). Estas zonas se pueden apreciar de manera particular en la imagen (a) de las figuras 4.7 y la imagen (d) de la figura 4.8.

Lo anterior descrito, permite inferir la existencia de un Régimen Mixto de Frotamiento (MFR) para las condiciones evaluadas de la amplitud de desplazamiento de $100 \mu\text{m}$, la frecuencia de 30Hz y tanto a carga normal aplicada de 10N y 70N, al completar un duración superior a 10^5 ciclos. Los datos obtenidos permiten suponer la respuesta del material por frotamiento (MRFM) como una mezcla de desgaste inducido por la formación de desechos y agrietamiento (como se señalo la sección 2.2.5 mediante la figura 2.3).

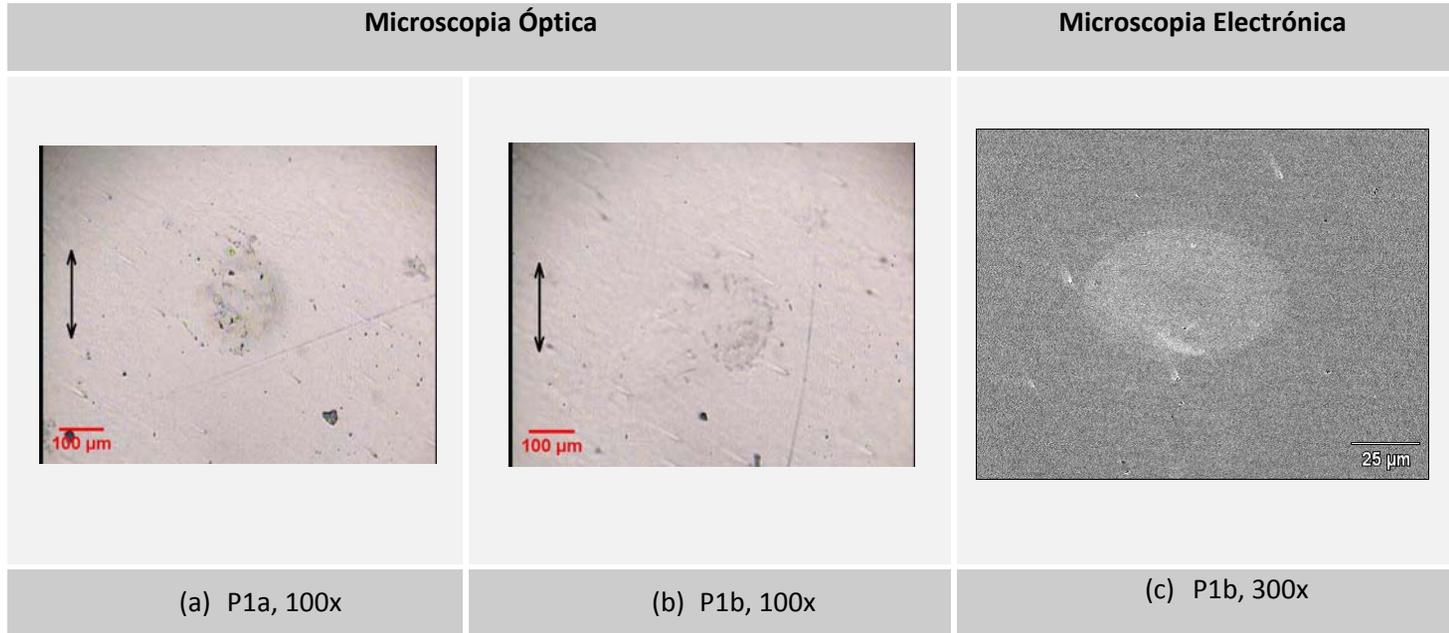


Figura 4.6. Imágenes digitales obtenidas mediante MO y MEB, del desgaste por frotamiento para el acero dúplex SAF 2507 para una amplitud de 100 μm , una carga normal 10 N, una frecuencia de 10 Hz y 10^4 ciclos de duración, a la magnificación según se indica.

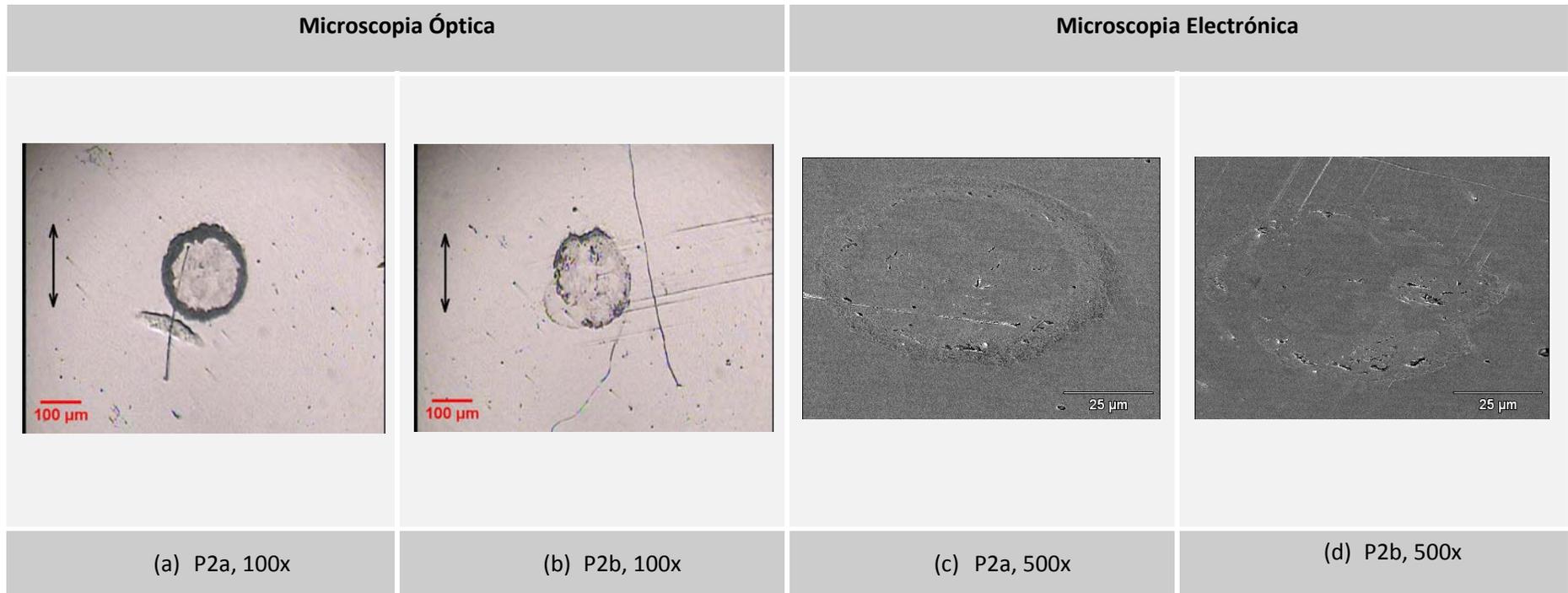


Figura 4.7. Imágenes digitales obtenidas mediante MO y MEB, del desgaste por frotamiento para el acero dúplex SAF 2507 para una amplitud de 100 μm , una carga normal 10 N, una frecuencia de 30 Hz y 10^5 ciclos de duración, a la magnificación según se indica.

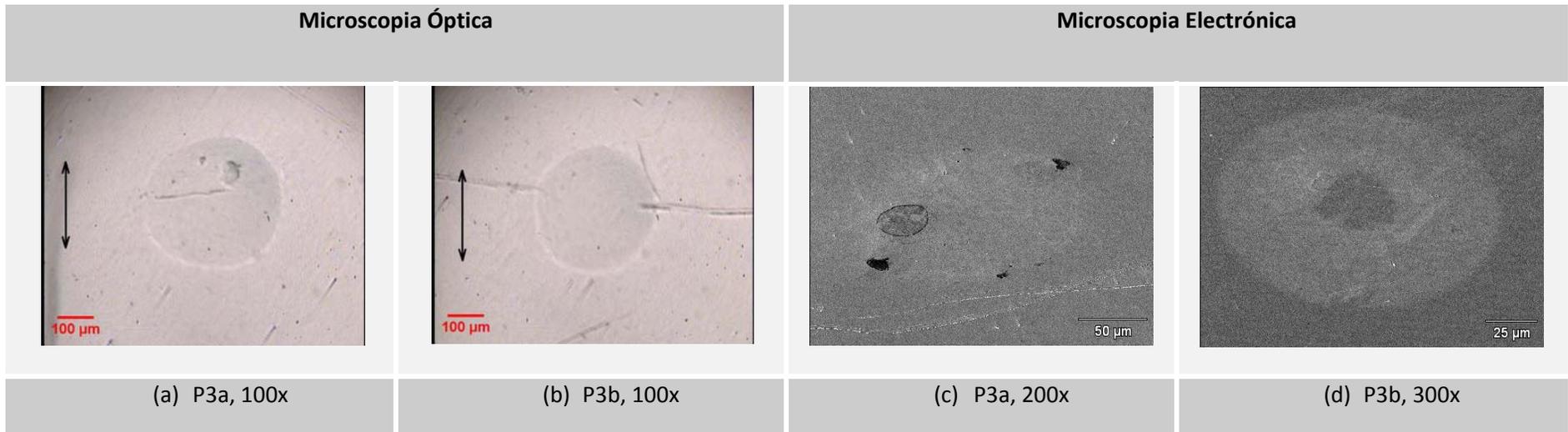


Figura 4.8. Imágenes digitales obtenidas mediante MO y MEB, del desgaste por frotamiento para el acero dúplex SAF 2507 para una amplitud de 100 μm y una carga normal 70 N, una frecuencia de 10 Hz y 10^5 ciclos de duración, a la magnificación según se indica.

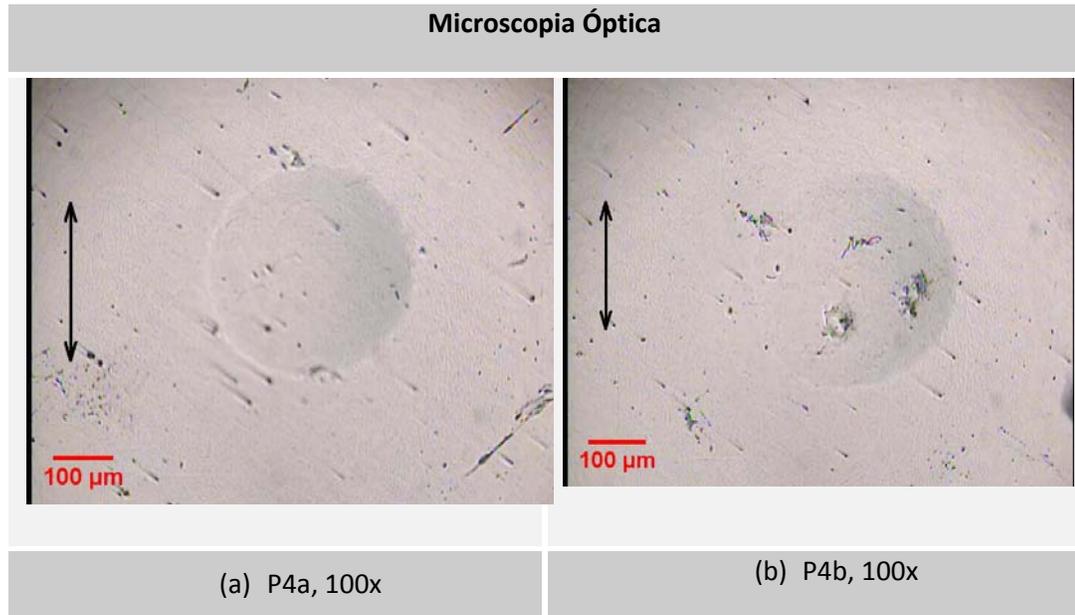


Figura 4.9. Imágenes digitales obtenidas mediante MO, del desgaste por frotamiento para el acero dúplex SAF 2507 para una amplitud de 100 μm y una carga normal 70 N, una frecuencia de 30 Hz y 10^4 ciclos de duración, a la magnificación según se indica.

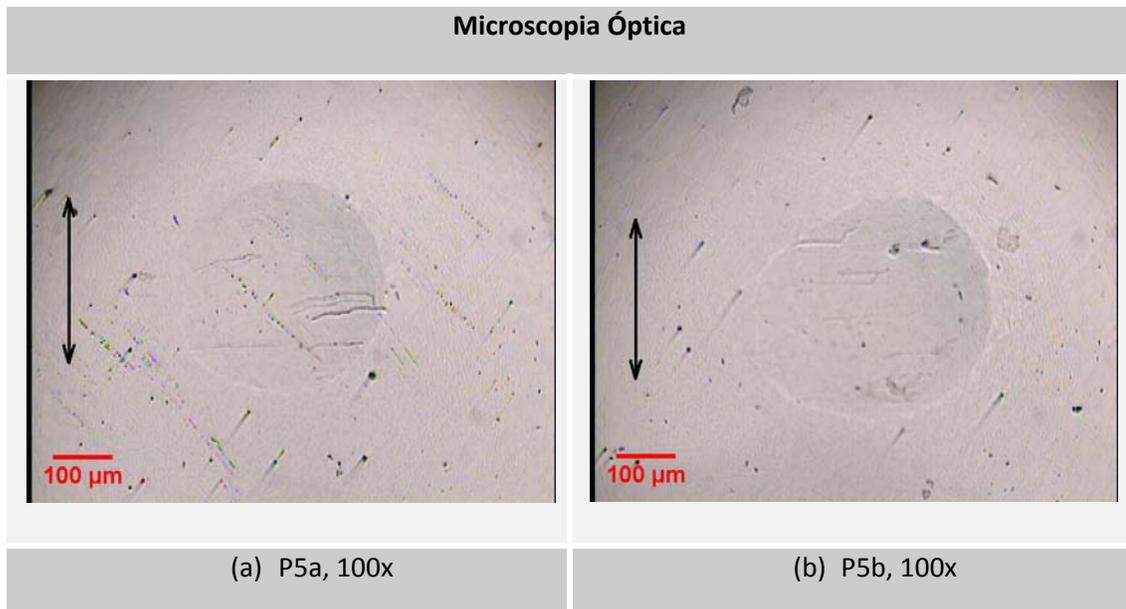


Figura 4.10. Imágenes digitales obtenidas mediante MO, del desgaste por frotamiento para el acero dúplex SAF 2507 para una amplitud de 100 μm y una carga normal 70 N, una frecuencia de 30 Hz y 10^5 ciclos de duración, a la magnificación según se indica.

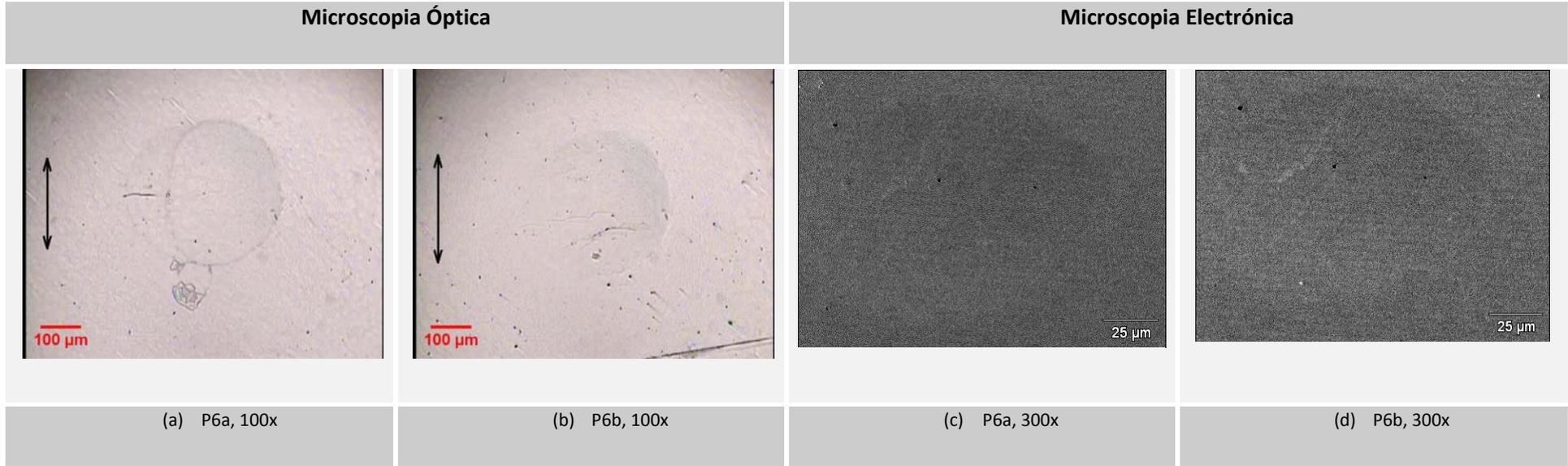


Figura 4.11. Imágenes digitales obtenidas mediante MO y MEB, del desgaste por frotamiento para el acero dúplex SAF 2507 para una amplitud de 100 μm y una carga normal 70 N, una frecuencia de 30 Hz y 5×10^5 ciclos de duración, a la magnificación según se indica.

En las figuras 4.12 a 4.20, se muestran microfotografías de detalles de las huellas obtenidas en MO a magnificaciones de 400x y 1000x, y MEB, a magnificaciones de 1500x, 3000x y 6000x, junto con la grafica de EDX de los puntos de pruebas seleccionadas.

En la figura 4.12 se observa la imagen del detalle en el centro y borde de la huella mostrada en la imagen (a) de la figura 4.6. En el centro (imágenes a, b y c) aparecen agrietamientos y posibles incrustaciones, que fueron analizadas mediante EDX (puntos 1 y 2, en imagen c). El EDX, señala un caracterización típica del material, además de presencia de óxidos (evidenciada por traza del oxígeno en el punto 2), posiblemente ferrosos o silicatos. En el borde se aprecia rayadura, pudiendo indicar el flujo de desechos o partículas de mayor dureza que el material base.

En la figura 4.13 se observa la imagen del detalle en el borde de la huella mostrada la imagen (b) de la figura 4.6. En el borde (imágenes a y b) se aprecia desprendimiento de material y leves agrietamientos en el mismo, indicando el flujo de desechos. El EDX (puntos 1 y 2, en imagen c), señala una caracterización típica del material.

En la figura 4.14 se observa la imagen del detalle en el centro y borde de la huella mostrada en la imagen (a) de la figura 4.7. En el centro (imágenes a, b y c) aparecen agrietamientos que pueden relacionar al efecto de la carga concentrada en esta zona de atascamiento (no hay deslizamiento). En el borde (imágenes d y e) se aprecia desprendimiento de material, ocasionado por el deslizamiento en esta zona donde flujo de desechos es completo fuera del contacto.

En la figura 4.15 se observa la imagen del detalle en el centro y borde de la huella mostrada en la imagen (b) de la figura 4.7. En el centro (imágenes a, b y c) aparecen agrietamientos que pueden relacionar al efecto de la carga concentrada en esta zona de atascamiento. En el borde se aprecia desprendimiento de material,

ocasionado por el deslizamiento en esta zona donde flujo de desechos es completo fuera del contacto. Adicionalmente, se aprecia grietas, que fueron sometidas a análisis EDX (puntos 1, 2 y 4, en imagen e). El EDX, señala una caracterización típica del material, además de presencia de óxidos (evidenciada por traza del oxígeno, mostrado en la grafica del punto 4), posiblemente de proveniente de especies ferrosos o silicatos.

En la figura 4.16 se observa la imagen del detalle en el centro y borde de la huella mostrada en la imagen (a) de la figura 4.8. Tanto, en el centro (imágenes a, b y c) como en el borde (imágenes d y e) se aprecia huellas de rayadura, pudiendo indicar el flujo de desechos o partículas de mayor dureza que el material base. Estas partículas pueden estar relacionadas con incrustaciones o impureza del material originadas en el proceso de manufactura o óxidos propios de la naturaleza de un acero inoxidable.

En la figura 4.17 se observa la imagen del detalle en el centro y borde de la huella mostrada en la imagen (b) de la figura 4.8. Tanto, en el centro (imágenes a y b) como en el borde (imágenes c y d) se aprecia huellas de rayadura. El EDX (punto 1 en imagen b), señala una caracterización típica del material.

En la figura 4.18 se observa la imagen del detalle en el centro y borde de la huella mostrada en la imagen (a) de la figura 4.11. En el centro (imágenes a y b) aparecen rayaduras que pueden relacionarse un flujo o desplazamiento interno de desechos de material, en esta zona de atascamiento. En el borde (imagen c) se aprecia la iniciación del desprendimiento de material, ocasionado por el deslizamiento en esta zona de forma de anillo, donde flujo de desechos es completo fuera del contacto.

En la figura 4.19 se observa la imagen del detalle en el centro y borde de la huella mostrada en la imagen (b) de la figura 4.11. En el centro (imágenes a y b) aparecen rayaduras que pueden relacionarse un flujo o desplazamiento interno de

desechos de material, en esta zona de atascamiento. En el borde (imagen c) aparecen indicios de rayadura por flujo de material, relacionándose con un desplazamiento externo de los desechos.

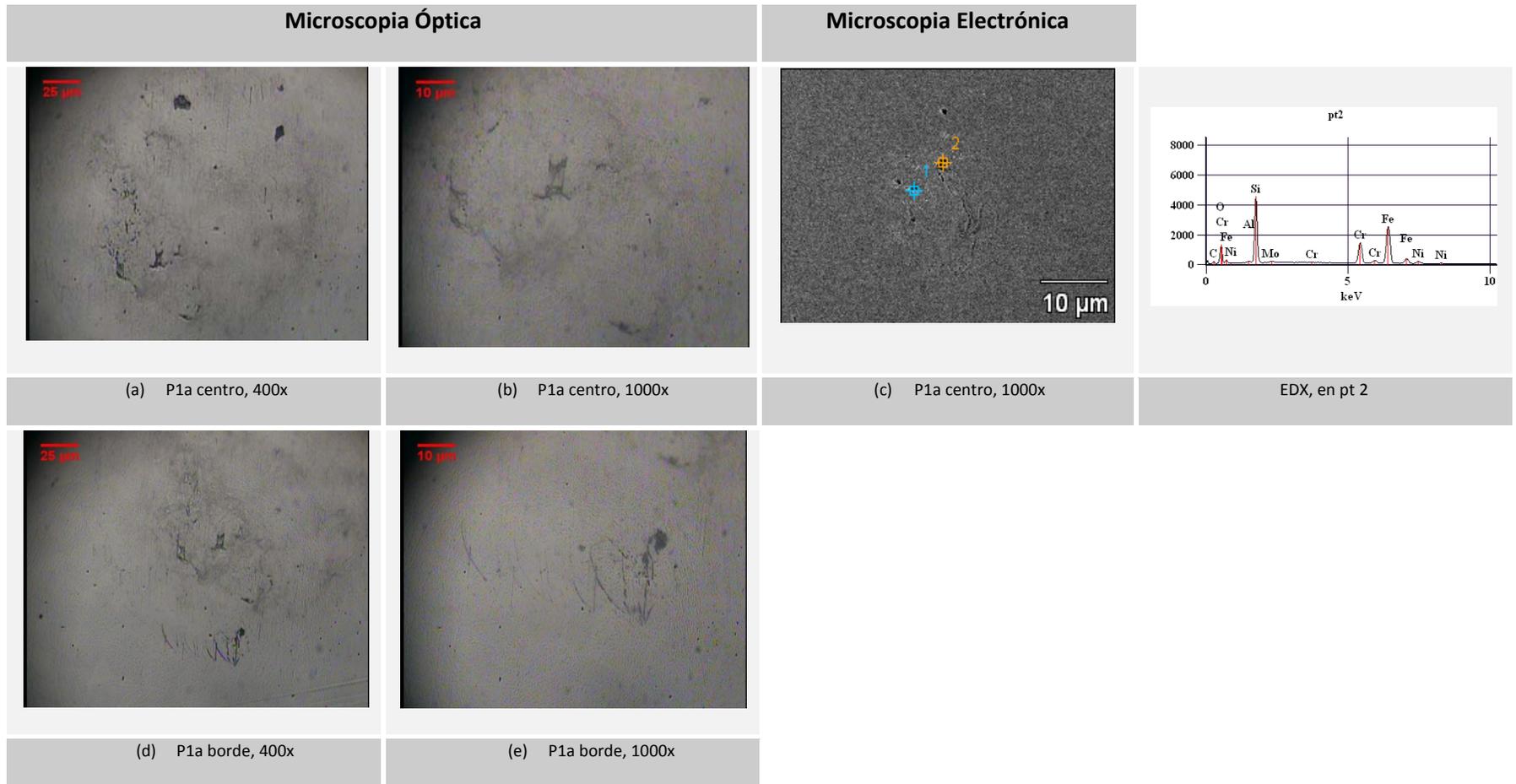


Figura 4.12. Imágenes MO y MEB de detalles en el centro y borde de la huella de desgaste por frotamiento del acero dúplex SAF 2507 para la condición carga normal de 10 N, una frecuencia de 10 Hz y 10^4 ciclos de duración

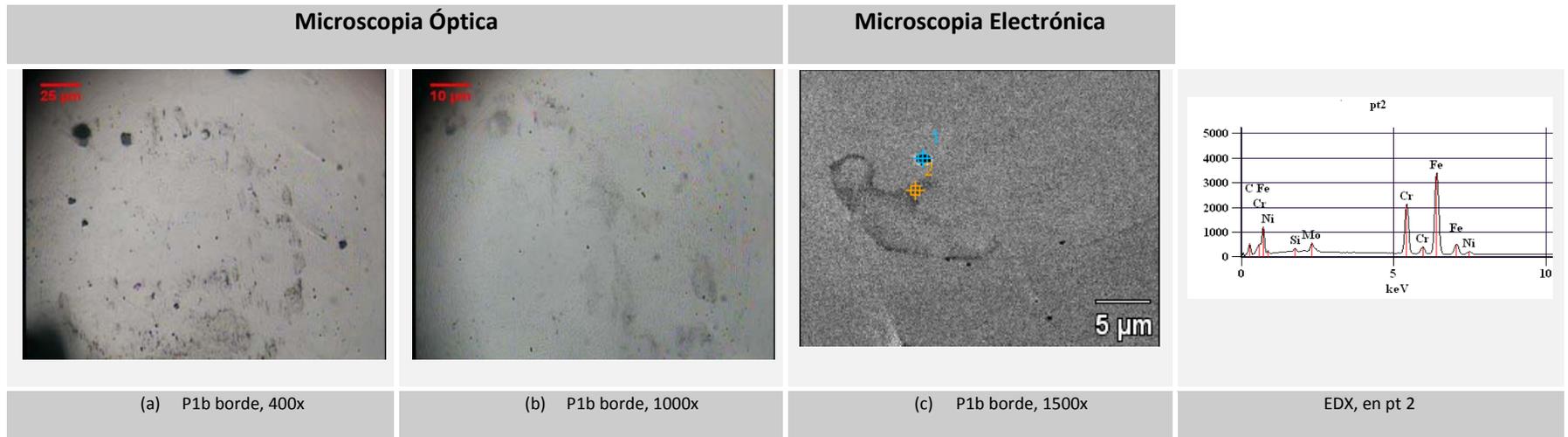


Figura 4.13. Imágenes MO y MEB de detalles en el centro y borde de la huella de desgaste por frotamiento del acero dúplex SAF 2507 para la condición carga normal de 10 N, una frecuencia de 10 Hz y 10^4 ciclos de duración

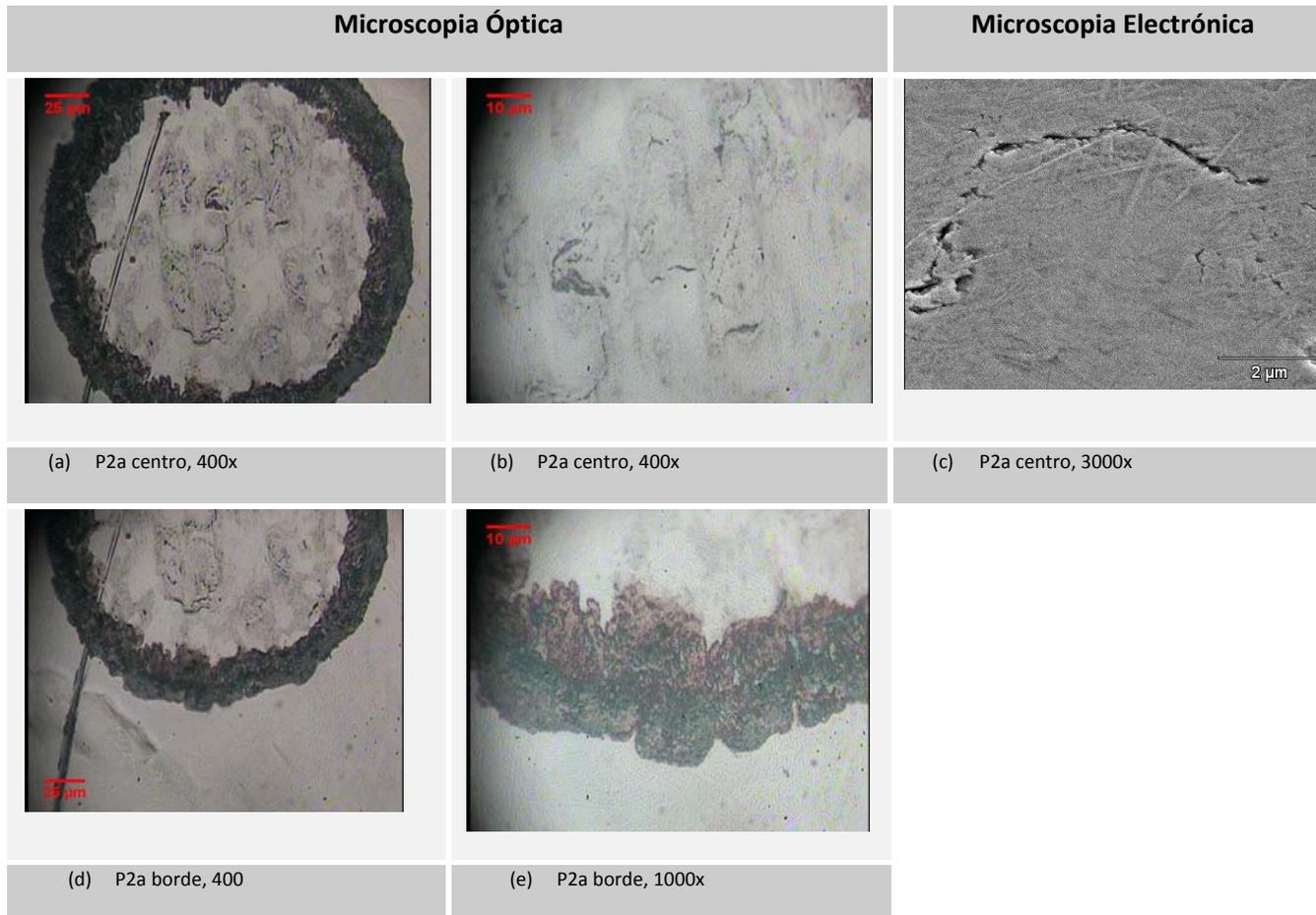


Figura 4.14. Imágenes MO y MEB de detalles en el centro y borde de la huella de desgaste por frotamiento del acero dúplex SAF 2507 para la condición carga normal de 10 N, una frecuencia de 30 Hz y 10^5 ciclos de duración

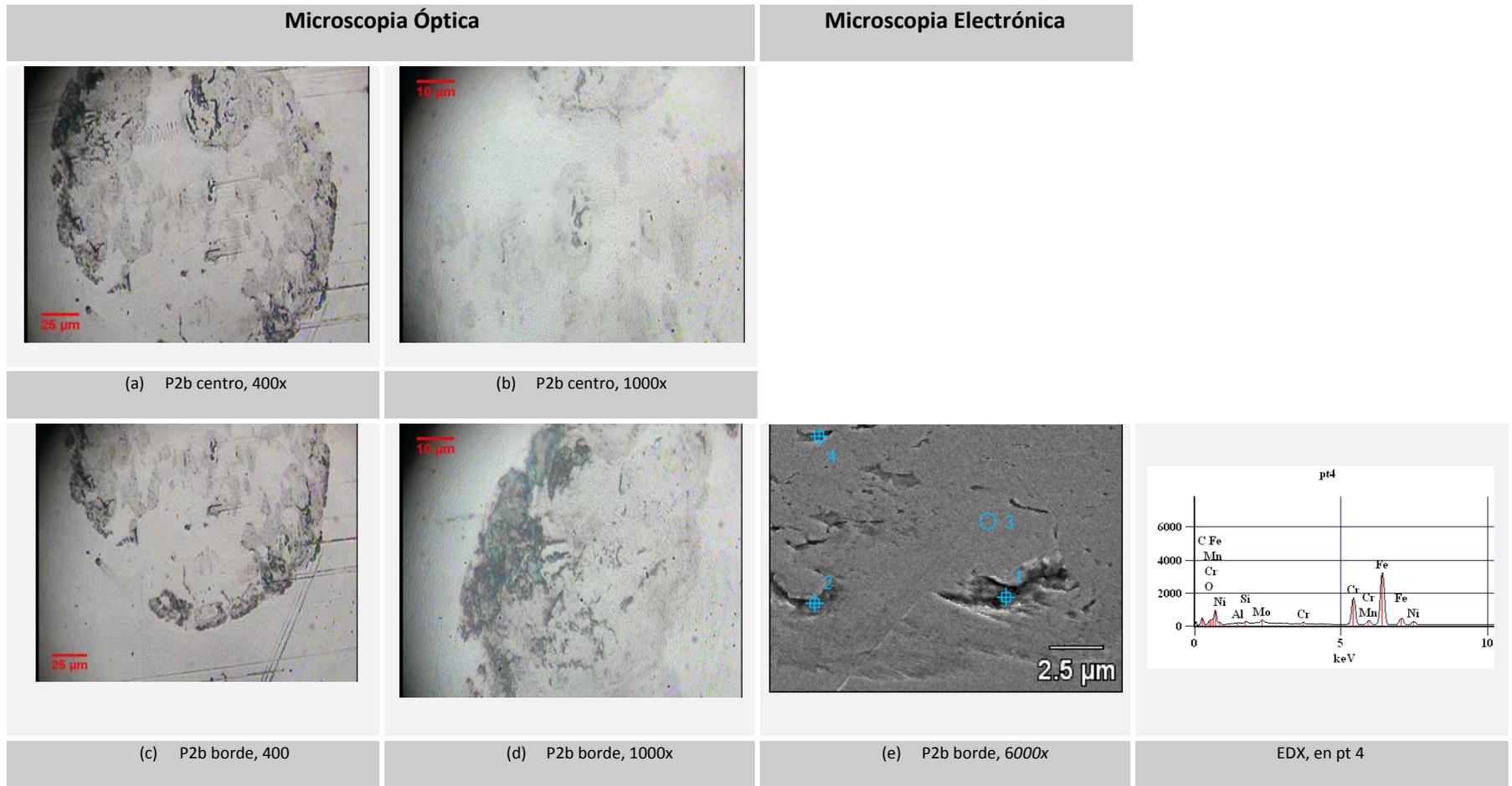


Figura 4.15. Imágenes MO y MEB de detalles en el centro y borde de la huella de desgaste por frotamiento del acero dúplex SAF 2507 para la condición carga normal de 10 N, una frecuencia de 30 Hz y 10^5 ciclos de duración

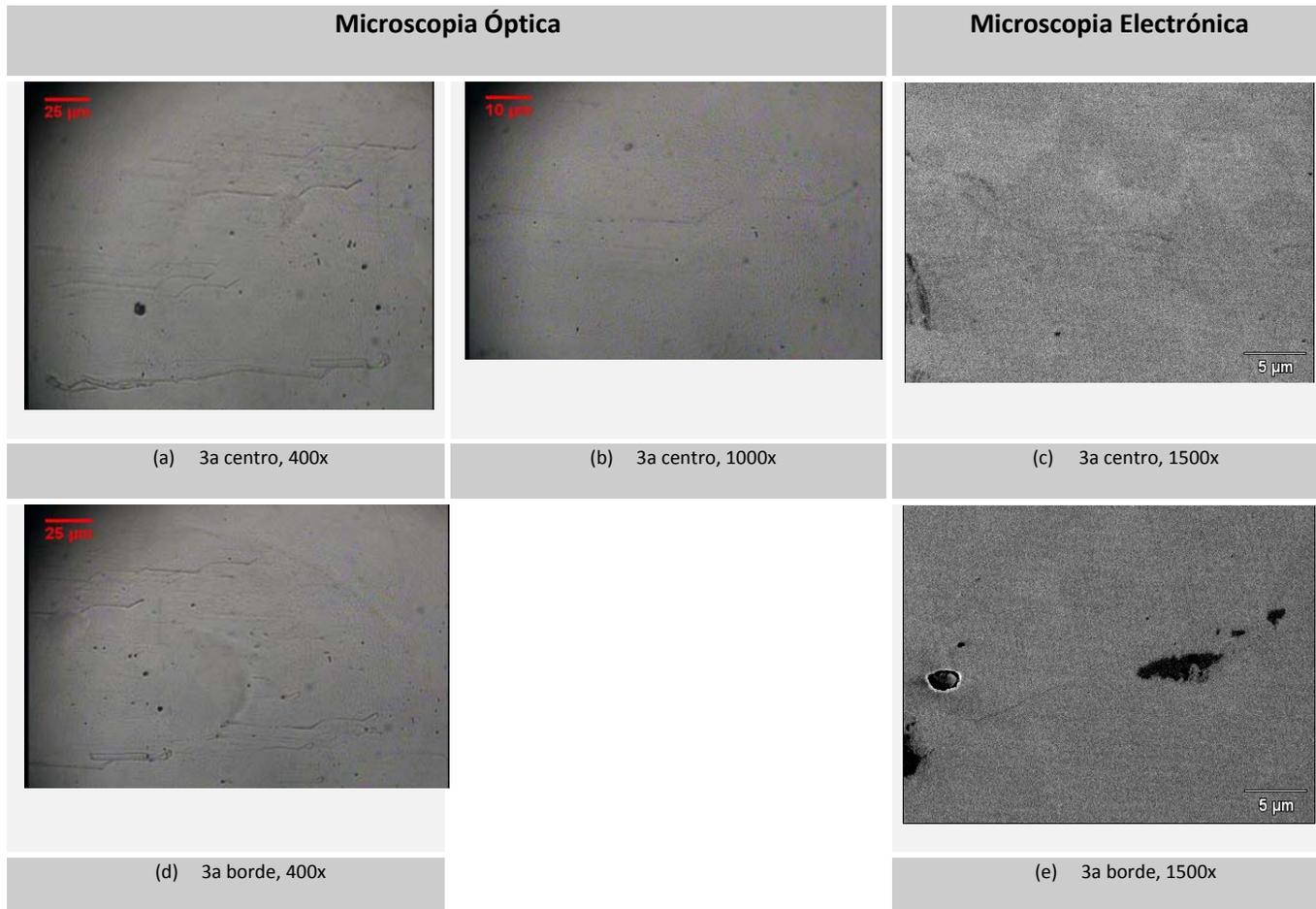


Figura 4.16. Imágenes MO y MEB de detalles en el centro y borde de la huella del desgaste por frotamiento del acero dúplex SAF 2507 para la condición carga normal de 70 N, una frecuencia de 10 Hz y 10^5 ciclos de duración

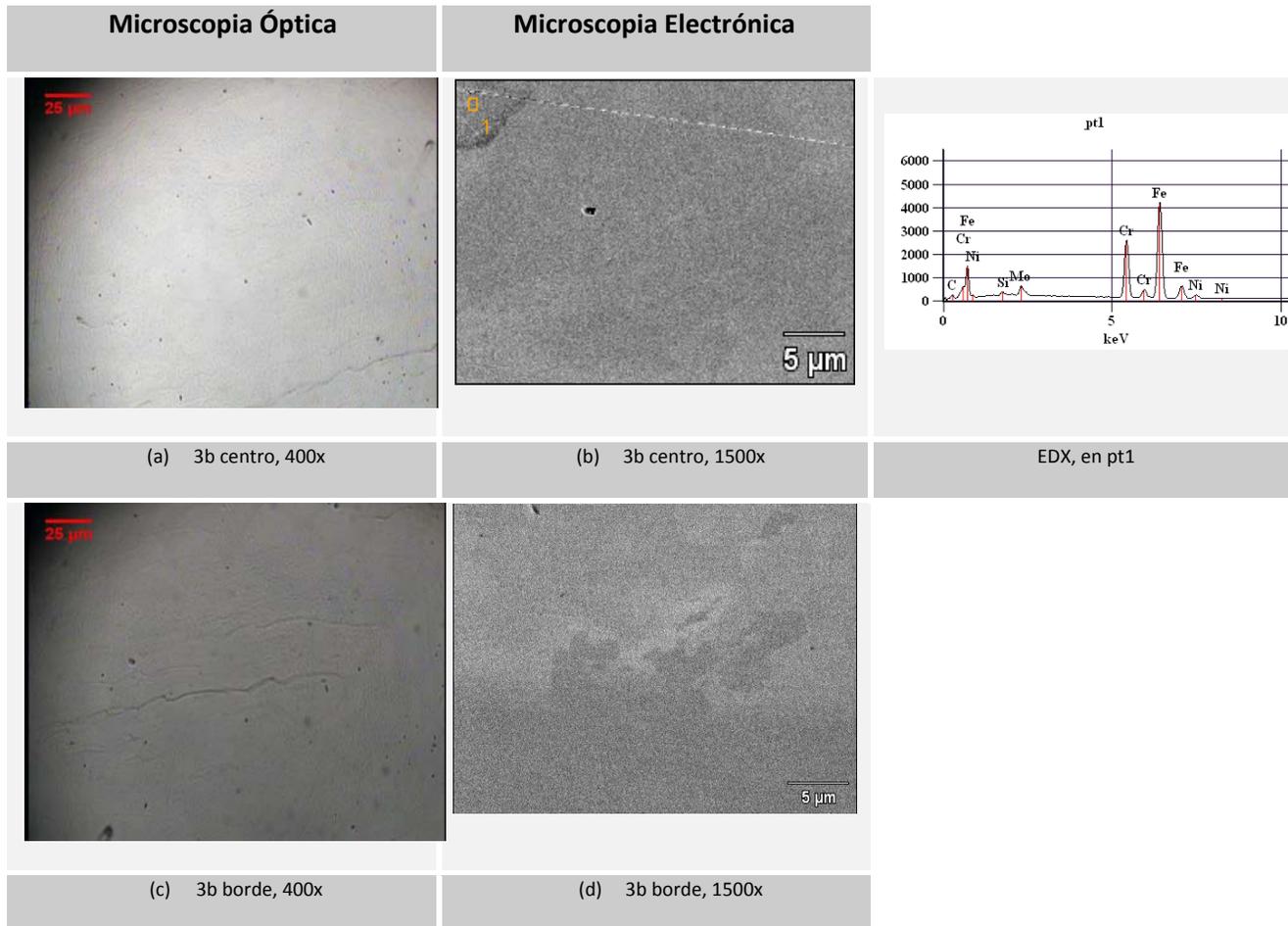


Figura 4.17. Imágenes MO y MEB de detalles en el centro y borde de la huella del desgaste por frotamiento del acero dúplex SAF 2507 para la condición carga normal de 70 N, una frecuencia de 10 Hz y 10^5 ciclos de duración

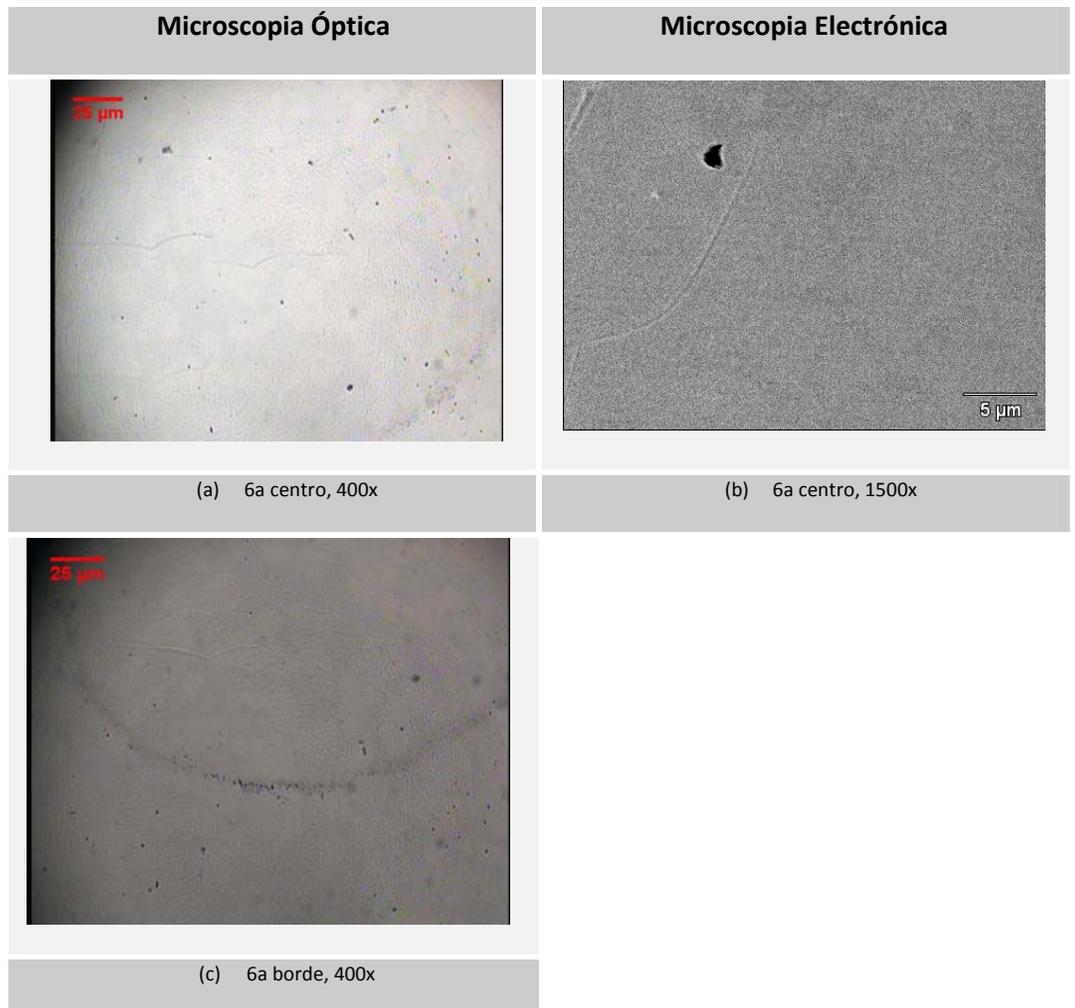


Figura 4.18. Imágenes MO y MEB de detalles en el centro y borde de la huella del desgaste por frotamiento del acero dúplex SAF 2507 para la condición carga normal de 70 N, una frecuencia de 30 Hz y 5×10^5 ciclos de duración

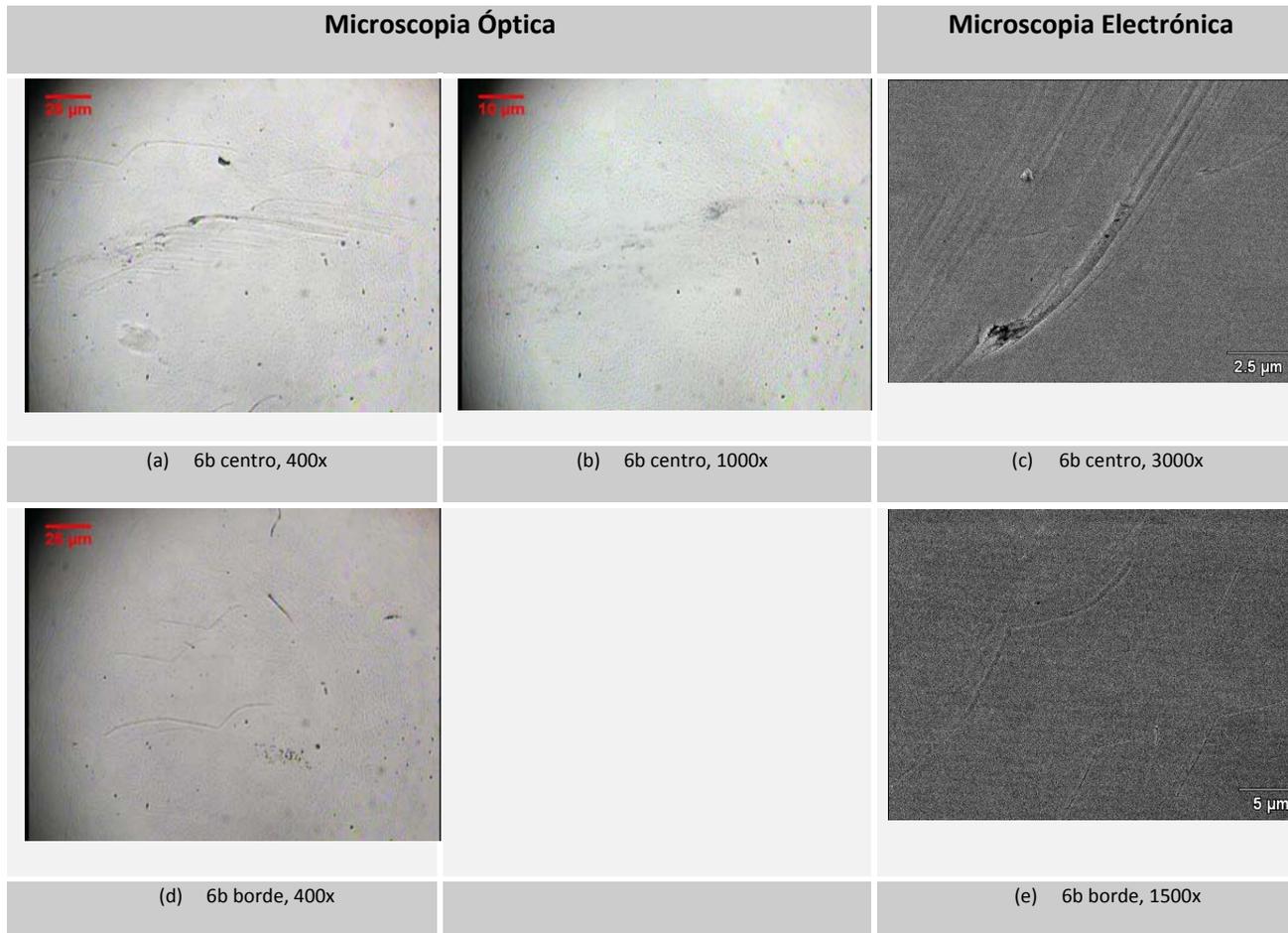


Figura 4.19. Imágenes MO y MEB de detalles en el centro y borde de la huella del desgaste por frotamiento del acero dúplex SAF 2507 para la condición carga normal de 70 N, una frecuencia de 30 Hz y 5×10^5 ciclos de duración

4.3.2 Mecanismo del desgaste por Frotamiento

Respecto a la respuesta de material evaluado ante el desgaste por frotamiento, las imágenes de las microfotografías de detalles obtenidas en el centro y el borde de la huella (ver las figuras 4.12 a 4.20), reportan el desarrollo de varios mecanismos de desgaste que evolucionan durante el intervalo de duración del contacto en la prueba.

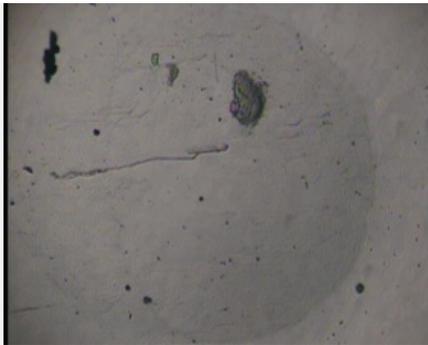
En esta investigación se adoptó la descripción de clasificación de mecanismos de desgaste sugerida por Bayer para el caso de deslizamiento (Bayer, 2004). Esta clasificación refiere que para un movimiento deslizante los mecanismos significativos son: Adhesión, Deformación Cíclica Simple, Deformación Cíclica Repetitiva, Oxidación y Tribopelícula (ibíd., p.12).

Para la carga normal de 10 N a frecuencia de 10 Hz por 10^4 ciclos de duración, se observa adhesión como se aprecia en las imágenes de la figura 4.13, mientras a la frecuencia de 30 Hz por 10^5 ciclos de duración, se evidencian deformación cíclica repetitiva, debido a la presencia de picaduras y grietas, según se nota en las imágenes de la figura 4.14 y 4.15. Por la acción de la carga normal de 70 N, tanto a 10 Hz como a 30 Hz, por 10^4 ciclos y 10^5 ciclos, se observa adhesión, por ejemplo en las imágenes de la figura 4.16 y la figura 4.17, mientras 5×10^5 ciclos se aprecia el comienzo de la deformación cíclica repetitiva (ver la figura 4.18). Además, se identifica un mecanismo de desgaste por deformación cíclica simple (semejante a la abrasión), posiblemente por la presencia de incrustaciones de óxidos en el acero dúplex estudiado, que se demuestran en el análisis de EDX por la presencia de oxígeno, como por ejemplo, en el punto 2 del EDX que se muestra en (c) de la figura 4.12; punto 1 en (f) de la figura 4.13, y los puntos 1, 2, y 4, en (i) de la figura 4.15. En la tabla 4.6 se muestran los valores cuantitativos del análisis EDX de los puntos antes referidos. Estos óxidos pueden actuar como abrasivos, acelerando el desgaste, como se evidencia en las imágenes de la figura 4.19.

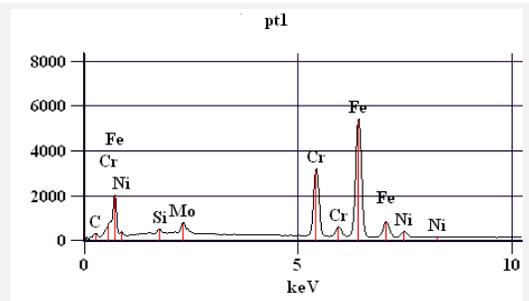
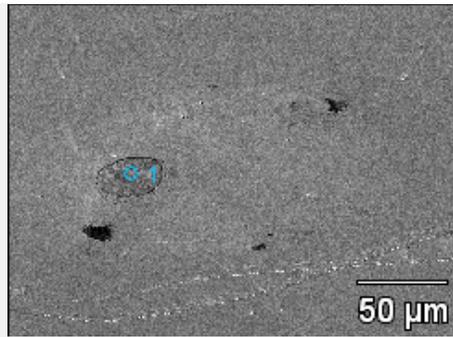
Cabe destacar la observación efectuadas a las imágenes a y b de la figura 4.20, tanto por MO y ME, de las pruebas realizadas con carga normal de 70N, a frecuencia de 10 Hz y a una duración de 10^5 ciclos. Estas imágenes presentan una mancha (también observable en imagen b de la figura 4.17) de coloración muy diferente al material base. La presencia de manchas de coloración distintiva pudiera suponer una la elevación de la temperatura de contacto como consecuencia del esfuerzo concentrado a baja frecuencia de oscilación, según lo señalado en el capítulo 2, sección 2.2.5. El EDX (punto 1), solo señala una caracterización típica del material.

En la tabla 4.6, se presentan los valores cuantitativos, tanto en porcentaje en peso como porcentaje atómico, del análisis EDX de la huellas en los puntos de las pruebas seleccionadas que se indican en la misma. En general, estos valores confirman la caracterización típica en Cr, Ni, Mo, que representa al acero inoxidable dúplex, como se señalo en la sección 2.2.3. En particular, se observa una presencia de Si, algo mayor de la reportada en el certificado de inspección (ver anexo A) y un alto valor en el punto 2 de la prueba P1A, asociado con la existencia de oxígeno, haciendo relevante la presencia de óxido derivado de estas especies. Adicionalmente, se destaca la elevada presencia de Mg, Al, S, Ca en el punto 1 de la evaluación realizada a la prueba P1B, que puede relacionarse con unas impurezas provenientes de la poca calidad del proceso de manufactura.

Microscopía Óptica



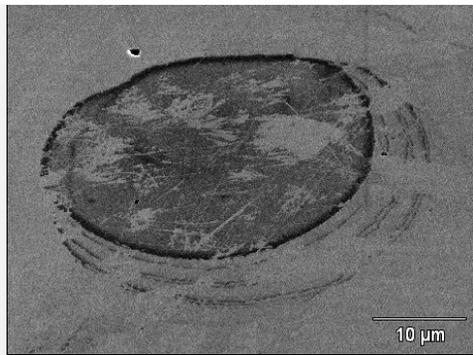
Microscopía Electrónica



(a) P3a, 200x

Accelerating Voltage: 20.0 kV, 200x

EDX, en pt1.



(b) P3a, 400x

Accelerating Voltage: 20.0 kV, 1000x

Figura 4.20. Imágenes MO y MEB de detalles de marca de elevación de temperatura de la huella del desgaste por frotamiento del acero dúplex SAF 2507 para una amplitud de 100 μm, una carga normal 70 N, una frecuencia de 10 Hz y 10⁵ ciclos de duración

Tabla 4.6. Resumen de resultados del análisis EDX de huellas desgaste por frotamiento para el acero dúplex SAF 2507, de los puntos indicados de los experimentos 1, 2, y 3

Weight %

	Mg-K	Al-K	Si-K	S-K	Ca-K	Ti-K	Cr-K	Mn-K	Fe-K	Ni-K	Mo-L
P1A_pt1			1,88				24,31	0,91	63,58	3,00	6,32
P1A_pt2		1,48	30,23				16,37		46,61	2,45	2,86
P1B_pt1	7,18	41,64	1,29	12,51	12,92	0,84	7,37		15,75	0,50	
P1B_pt2			1,53				24,86		64,98	2,84	5,79
P2B_pt1	0,87	1,30	1,42		1,58		25,12		62,83	2,47	4,41
P2B_pt2		1,47	1,64		1,28		21,01	1,06	64,30	4,54	4,69
P2B_pt3			1,45				21,63		67,58	5,01	4,34
P2B_pt4		1,21	1,46				21,18	0,98	66,14	4,89	4,14
P3A_pt1			1,45				23,32		66,10	4,02	5,12
P3B_pt1			1,49				24,93		65,15	2,75	5,68

Atom %

	Mg-K	Al-K	Si-K	S-K	Ca-K	Ti-K	Cr-K	Mn-K	Fe-K	Ni-K	Mo-L
P1A_pt1			3,70				25,89	0,91	63,02	2,83	3,65
P1A_pt2		2,34	45,76				13,38		35,48	1,77	1,27
P1B_pt1	9,69	50,65	1,51	12,80	10,58	0,58	4,65		9,25	0,28	
P1B_pt2			3,02				26,49		64,47	2,68	3,34
P2B_pt1	1,92	2,57	2,71		2,11		25,83		60,15	2,25	2,46
P2B_pt2		2,96	3,16		1,73		21,89	1,04	62,37	4,19	2,65
P2B_pt3			2,85				23,00		66,93	4,72	2,50
P2B_pt4		2,45	2,84				22,22	0,97	64,61	4,55	2,36
P3A_pt1			2,86				24,84		65,56	3,79	2,95
P3B_pt1			2,94				26,56		64,63	2,59	3,28

5. Conclusiones

El propósito de esta investigación fue evaluar el comportamiento de desgaste del acero dúplex SAF 2507 sometidos a condición de deslizamiento por frotamiento. Se llevaron a cabo seis series de pruebas en tribómetro tipo bola sobre disco. Se discutió los efectos de la carga de normal, la frecuencia de deslizamiento y el número de ciclos, para una amplitud fija, sobre la determinación del volumen y el coeficiente de desgaste y se ejecutaron análisis por microscopía óptica y electrónica de barrido, donde se identificó la morfología del desgaste por frotamiento para este acero. De los estudios llevados a cabo se extraen las siguientes conclusiones:

- Los valores del coeficiente de desgaste, se reportan en el rango desde $1,96 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{N}$ hasta $3,60 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{N}$, para las condiciones evaluadas
- Un menor coeficiente de desgaste, puede obtenerse con la combinación de carga normal de contacto de 70N, una frecuencia de oscilación de 10 Hz y duración de 10^4 ciclos
- Se optimiza el modelo Archard en el parámetro de ciclos de duración en una potencia de 0,987 para la condición de frotamiento
- La variación de la frecuencia de oscilación es el parámetro que tiene el mayor efecto sobre el volumen de desgaste y la variación del ciclo de duración es el parámetro que tiene el menor efecto sobre el volumen de desgaste
- Un Régimen Mixto de Frotamiento se identificó como el régimen de frotamiento ensayado.
- Los desechos de desgaste se generan por mecanismos de adhesión, deformación cíclica simple y deformación cíclica repetida. La presencia de óxido puede acelerar estos mecanismos.
- Las pruebas realizadas con carga normal de 70N, a frecuencia de 10 Hz y a una duración de 10^5 ciclos, presenta una elevada temperatura de contacto.

6. Recomendaciones

Los avances logrados en el trabajo presentado, señalan la continuidad de la investigación sobre el comportamiento tribológico del acero inoxidable dúplex estudiado, en las siguientes temáticas:

- Extender la evaluación del comportamiento ante el desgaste por frotamiento del acero dúplex al efecto de cambios en amplitud de oscilación, temperatura y ambiente.
- Realizar medición del volumen desgaste por frotamiento mediante un método directo, como por ejemplo, con el uso del interferómetro óptico.
- Evaluar el comportamiento ante el desgaste por frotamiento del acero dúplex en condiciones diferente de dureza y/ o tratamiento térmico.
- Evaluar el comportamiento ante el desgaste por frotamiento del acero dúplex respecto de la composición química y la microestructura de las fases bifásicas.
- Establecer los mapas de desgaste del acero inoxidable dúplex en condición de frotamiento.

Referencias Bibliográficas

Archard, J. (1953). Contact and Rubbing of Flat Surface. *Journal of Applied Physics* , 24 (8), 981 - 988.

ASM. (1992). *ASM Handbook, Volume 18, Friction, Lubrication, and Wear Technology*. (P. Blau, Ed.) Park, OH: ASM International.

ASTM. (2004). ASTM G99-04 Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus. West Conshohocken, PA, United States: ASTM International.

Bayer, R. (2004). *Mechanical Wear Fundamentals and Testing*. New York: Marcel Dekker.

Fouvry, S., Kapsa, P., & Vincent, L. (2003). Global Methodology to Quantify Fretting Damages. En ASTM, Y. Mutoh, S. Kinyon, & D. Hoepfner (Edits.), *Fretting Fatigue: Advances in Basic Understanding and Applications, ASTM STP 1425* (págs. 17-32). West Conshohocken, PA: ASTM International,.

Glaeser, W. (1992). *Materials for tribology*. Amsterdam: Elsevier Science Publishers.

Gómez, L. (2009). *Estudio de biocompatibilidad del acero dúplex SAF 2205*. Naguanagua: Universida de Carabobo.

Hernández, R., & Paiva, A. (2003). *Contrucción y puesta en marcha de una máquina para la simulación de fretting*. Caracas: Universidad Central de Venezuela.

Hoepfner, D., & Chandrasekaran, V. (1994). Fretting in orthopaedic implants: A review. *Wear* , 173 (1-2), 189-197.

IMOA. (2009). *Practical Guidelines for the Fabrication of Duplex Stainless Steels*. (IMOA, Ed.) Recuperado el 02 de Diciembre de 2010, de International Molybdenum Association (IMOA): http://www.imoa.info/moly_uses/moly_grade_stainless_steels/duplex_stainless_steel.php

ISO. (1997). ISO. *ISO 5832-1:1997 Implants for surgery -- Metallic materials -- Part 1: Wrought stainless steel* . Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization.

Kapsa, P., Fouvry, S., & Vincent, L. (2005). Basic Principles of Fretting. En G. Stachowiak, *Wear – Materials, Mechanisms and Practice* (págs. 317-338). England: John Wiley & Sons Ltd.

- Knudsen, J., & Massih, A. (2005). Evaluation of fretting wear data with the aid of Mechanism-maps. *18th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 18)* (págs. J07-3). Beijing, China: SMiRT.
- Magaziner, R., Jain, V., & Mall, S. (2008). Wear characterization of Ti-6Al-4V under fretting-reciprocating sliding conditions. *Wear*, *264*, 1002-1014.
- Magee, J. (1992). Wear of Stainless Steels. En ASM, *ASM Handbook, Volume 18, Friction, Lubrication, and Wear Technology* (págs. 1444-1479). Park, OH: ASM International.
- Medina, L., & Peralta, G. (Octubre de 2010). Evaluación de las propiedades tribológicas del Acero Duplex. *Trabajo Especial de Grado no publicado*. Bárbula: Universidad de Carabobo.
- NIH. (2010). *ImageJ*. Recuperado el 10 de Enero de 2012, de National Institute of Mental Health (NIMH): <http://rsbweb.nih.gov>
- Renedo, J. (Febrero de 2010). *Comportamiento al desgaste por deslizamiento en aceros inoxidables: ferrítico*. Recuperado el 12 de Octubre de 2010, de Treballs academics UPC: <http://upcommons.upc.edu/pfc/handle/2099.1/9210>
- Roy, R. (1990). *A primer on the Taguchi method*. New York: Van Nostrand Reinhold.
- Ruff, A. (1992). Wear Measurement. En ASM, *ASM Handbook, Volume 18, Friction, Lubrication, and Wear Technology* (págs. 675-691). Park, OH: ASM International.
- Sandvik. (2000). *Sandvik*. Recuperado el 10 de Diciembre de 2011, de <http://www.sandvik.com>
- Stachowiak, G. (2005). *Wear – materials, mechanisms and practice*. England: Wiley.
- Suárez, J., Suárez, I., & Contreras, R. (2001). Comportamiento de 3 Familias de Aceros Inoxidables ante Solicitudes Tribológicas de Abrasión y Erosión. *Rev. LatinAm. Met. Mat.*, *21* (2), 74-80.
- Szyndelman, G. (Febrero de 2008). *Comportamiento tribológico del acero inoxidable dúplex 2205*. Recuperado el 18 de Noviembre de 2009, de Treballs academics UPC: <http://upcommons.upc.edu/pfc/handle/2099.1/4792>
- Waterhouse, R. (1992). Fretting Wear. En ASM, *ASM Handbook, Volume 18, Friction, Lubrication, and Wear Technology* (págs. 449-481). Park, OH: ASM International.

Anexos

Anexo A. Certificado de Inspección SAF 2507

<https://www.extranet.steel.sandvik.com/Certificates/CertView/ShowUni...>



CERTIFICATE No. A/06-560259 Rev 00
Date 2006-03-23 Page 1/2

INSPECTION CERTIFICATE acc to
EN 10 204 3.1

SANVEN STEEL, C.A.
AVENIDA FRANCISCO DE MIRANDA
TORRE LA PRIMERA.PISO 4 OFC 4A
CAMPO ALEGRE/CARACAS 1060
VENEZUELA

Customer References		Sandvik References						
SMT-2006-22-UC	Customer order 2006-03-22	Order No. ABSMT No.	Subs No. ABSMT Dispatch note C.Code 46757/53 284-63430 72					
610-06379	SANVEN							
Material description		Steel/material Designations						
HOT WORKED STAINLESS BAR STEEL		Sandvik	SS					
ANNEALED & STRAIGHTENED		SAF 2507	2328					
PEEL TURNED AND POLISHED		UNS	EN no					
		S32750	1.4410					
Steel making process								
Electric furnace								
Technical requirements								
EN 10088-3:-2005								
EXTENT OF DELIVERY								
It	Product designation	Heat	Lot	Pieces	Kg			
01	MER-SAF2507-20 MA-3200-	507366	92493	5	55.0			
				Total	55.0			
TEST RESULTS								
Chemical composition (weight%)								
Heat	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
507366	0.014	0.33	0.77	0.017	0.0006	25.15	6.96	3.91
	Cu	N						
507366	0.11	0.282						
Tensile test at room temperature								
Lot	Yield strength		Tensile strength		Elongation	Red.of Area		
	MPa	MPa	MPa		%	%		
	Rp0.2	Rp1.0	Rm		A	Z		
92493	629	707	867		36	67		
Hardness test								
Lot	Min	Max						
	HRC	HRC						
92493	21.0	22.0						
Quality assurance - Ulf Svensson/QA-manager Primary Products MTC Service / Certificates								

AB SANDVIK MATERIALS TECHNOLOGY Reg No. 556234-6832 VAT No. SE693000-060901
SE-81181 SANDVIKEN SWEDEN www.smt.sandvik.com mtc_service.smt@sandvik.com



CERTIFICATE No. A/06-560259 Rev 00
Date 2006-03-23 Page 2/2

Following controls/tests have been satisfactorily performed:
- Material Identification.
- Visual inspection and dimensional control.

Heat Treatment:
1100 degrees C/30 min. Quenched in water.

The delivered products comply with the specifications and requirements of the order.

The material is manufactured according to a Quality system, approved and registered to ISO 9001.

The certificate is produced with EDP and valid without signature.

AB SANDVIK MATERIALS TECHNOLOGY Reg No. 556234 6832 VAT No. SE963000-090001
SE-81181 SANDVIKEN SWEDEN www.smt.sandvik.com mtc_service.smt@sandvik.com

Anexo B. Método Taguchi

En este anexo se describe de forma resumida los pasos involucrados en la aplicación del método Taguchi para diseñar experimentos (DET). La teoría y detalles pueden encontrarse en la publicación de Roy (Roy, 1990).

Pasos generales en el método de Taguchi

1. Definir el objetivo de investigación, o más específicamente, un comportamiento a medir del proceso. Esto puede ser el volumen de desgaste.
2. Determinar los parámetros que afectan el proceso. Los parámetros son variables dentro del proceso que afectan el comportamiento a medir, como cargas, frecuencias, etc., que pueden ser fácilmente controlados. Debe especificarse el número de niveles que deben modificarse los parámetros. Por ejemplo, un valor bajo y alto de 10N y 70N para la carga.
3. Crear matrices ortogonales para el diseño de parámetro que indica el número de condiciones para cada experimento.
4. Llevar a cabo los experimentos indicados en la matriz.
5. Completar el análisis de datos para determinar el efecto de los diferentes parámetros en el comportamiento medido.

En la figura B.1 se muestra una representación pictórica de estos y otros pasos posibles, dependiendo de la complejidad del análisis.

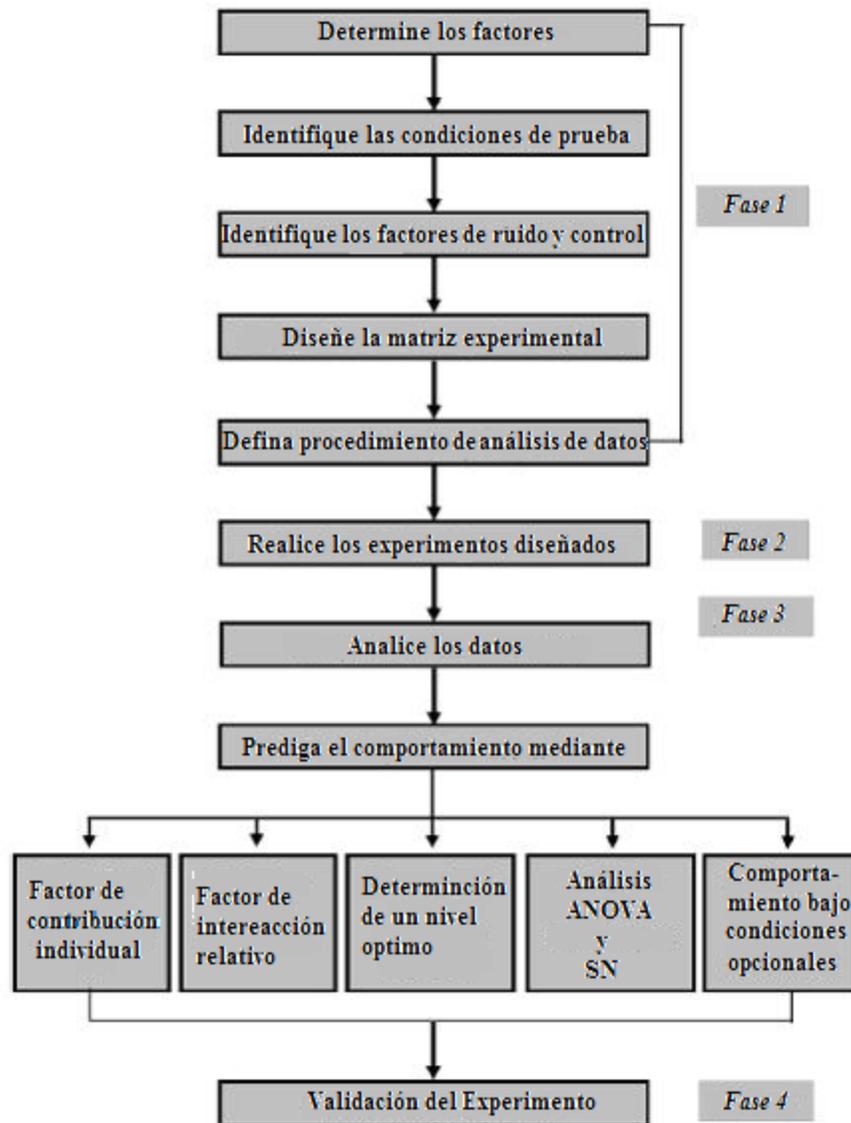


Figura B.1. Pasos del método de enfoque Taguchi (Roy, 1990)