

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

“EVALUACIÓN DEL DESGASTE POR DESLIZAMIENTO Y PROPIEDADES MECÁNICAS DE RECUBRIMIENTO MOLIBDENO-NÍQUEL DEPOSITADOS POR ROCIADO TÉRMICO CON Y SIN TRATAMIENTO TÉRMICO POSTERIOR”

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por los Bachilleres:
Forti M, Carlos A
Rodríguez C, Petter P
Para Optar al Título
De Ingeniero Mecánico

Caracas, 2012.

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

“EVALUACIÓN DEL DESGASTE POR DESLIZAMIENTO Y PROPIEDADES MECÁNICAS DE RECUBRIMIENTO MOLIBDENO-NÍQUEL DEPOSITADOS POR ROCIADO TÉRMICO CON Y SIN TRATAMIENTO TÉRMICO POSTERIOR”

TUTOR ACADÉMICO: Prof. María Rodríguez de Prato
TUTOR INDUSTRIAL: Ing. Andrea Scagni

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por los Bachilleres:
Forti M, Carlos A
Rodríguez C, Petter P
Para Optar al Título
De Ingeniero Mecánico

Caracas, 2012.



ACTA

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

Carlos Alberto Forti Miranda

y

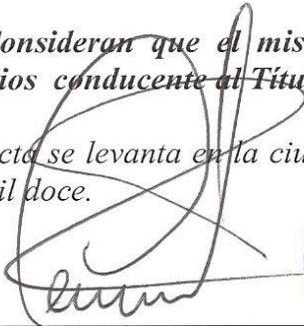
Petter Pastor Antonio Rodríguez Camejo

Titulado

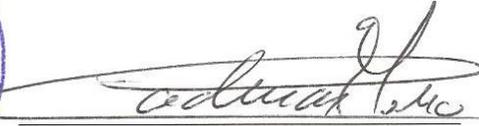
“Evaluación del desgaste por deslizamiento y propiedades mecánicas de recubrimiento molibdeno-níquel depositados por rociado térmico con y sin tratamiento térmico posterior”

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

Acta se levanta en la ciudad de Caracas el primer día del mes de agosto del año dos mil doce.


Prof. Crisanto Villalobos
Jurado




Prof. Pedro Cadenas
Jurado


Prof. María de los A. Rodríguez
Tutora

DEDICATORIA

A Dios, que me dio las fuerzas para lograr la culminación de este trabajo.

A mis padres y demás familiares, por siempre estar a mi lado, por su apoyo incondicional, por siempre creer en mí, por ser mi soporte en momentos difíciles y darme fuerzas para seguir y luchar en pro de alcanzar mis metas.

A la máxima casa de estudio Universidad Central de Venezuela, por formarme como persona y profesionalmente, por todos aquellos momentos buenos y malos.

Carlos Forti

DEDICATORIA

A Dios, por darme salud y vida para seguir adelante.

A mis padres, hermanos y tías, por su apoyo incondicional, por su colaboración y financiamiento de manera continua, por ser mi soporte en momentos difíciles y darme fuerzas para seguir y alcanzar mis metas.

A la Universidad Central de Venezuela, por formarme como persona y profesionalmente, por todos aquellos momentos buenos y malos pero todos importantes porque dejaron una experiencia de vida.

A mi abuelo, que a pesar de no estar presente, sé que de donde esté me cuida, protege, apoya y siempre me desea lo mejor.

Petter Rodríguez.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar a Dios por guiarme e iluminarme siempre en mis pasos, por darme fuerza, fortaleza, sabiduría.

A la Universidad Central de Venezuela, por brindarme la oportunidad de formarme académicamente y formarme de manera íntegra como profesional, por permitirme vivir la experiencia de ser ucevista.

A mi tutor María de los Ángeles, por compartir conmigo sus conocimientos y experiencias profesionales, por brindarme su apoyo en el desarrollo de este trabajo.

A mis padres, mi hermana por estar siempre a mi lado, por brindarme su compañía y apoyo.

A la escuela de Mecánica, por permitirme crecer profesionalmente, y por todos aquellos momentos excepcionales que pasé allí (Turbina).

A la empresa PLASMATEC, profesor Andrea Scagni, Pedro Cadena Crisanto Villalobos, por prestarnos su ayuda profesional cada vez que lo necesitamos.

Al maestro Rondon el mejor de su cátedra. El gran Eleazar y mi entrenador Ángel Chávez por todos los buenos y malos momentos.

A los mejores trabajadores de la ucv, Oneida, Hamyita, Jhonny, Carlitos, Jhon y la super Denis por su gran colaboración y momentos compartidos.

A mis grandes amigos que compartieron conmigo durante la carrera por su apoyo en todo momento, por siempre estar cuando más lo necesitaba, compartir momentos importantes de mi vida, por su ayuda, por todo.

Carlos Forti

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme la fuerza para vivir cada día, por acompañarme en cada instante, protegerme en toda ocasión, y sobre todo por darme la familia que tengo.

A la Universidad Central de Venezuela, por brindarme la oportunidad de formarme académicamente y formarme de manera íntegra como profesional. Por haberme permitido la oportunidad de desarrollar mis criterios y forma de pensar.

A mi tutor María de los Angeles de Prato, por compartir conmigo sus conocimientos y experiencias profesionales, por brindarme su apoyo en el desarrollo de este trabajo.

A mis padres, mi hermana, tías, abuelas, por estar siempre a mi lado, por brindarme su apoyo, ya que sin ello no hubiese podido llegar a donde me encuentro.

A la escuela de Ingeniería Mecánica, por permitirme crecer profesionalmente. Los profesores Cadenas, De Andrea y Villalobos por su apoyo y por estar en los momentos difíciles brindándome una mano amiga.

A Angie, Teresa, Oneida, Carlos y Jhonny por su apoyo y colaboración de manera continúa.

A la empresa PLASMATEC, por prestarnos su ayuda profesional cada vez que lo necesitamos.

A todos mis compañeros de la escuela y de la residencia, por brindarme su amistad y por todos las experiencias compartidas.

Petter Rodríguez.

RESUMEN

Forti M., Carlos A. Y Rodríguez C, Petter P

EVALUACIÓN DEL DESGASTE POR DESLIZAMIENTO Y PROPIEDADES MECÁNICAS DE RECUBRIMIENTO MOLIBDENO-NÍQUEL DEPOSITADOS POR ROCIADO TÉRMICO CON Y SIN TRATAMIENTO TÉRMICO POSTERIOR

Tutor Académico: Prof. María Rodríguez de Prato. **Tutor Industrial:** Ing. Andrea Scagni. Caracas, U. C. V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica. Año 2012, pp 155.

Palabras Claves: ROCIADO, MOLIBDENO, DESGASTE, DESLIZAMIENTO, ABRASIÓN.

Resumen. El presente trabajo se estudia el comportamiento ante el desgaste por deslizamiento y abrasión de un recubrimiento depositado con una aleación base molibdeno-níquel utilizando la técnica de rociado térmico por plasma sobre un sustrato de acero AISI 1020. La evaluación del comportamiento de este recubrimiento frente al desgaste abrasivo se realizó utilizando la norma ASTM G-65. El estudio del desgaste por deslizamiento se realizó según la norma ASTM G-77 en arreglo de bloque sobre anillo utilizando como contraparte una aleación base Cobalto (Stellite 6). Se escogió un diseño factorial 3^2 con la finalidad de evaluar el comportamiento del par tribológico ante las variaciones de carga y velocidad para lo cual se utilizó un programa estadístico (ANOVA). A fin de determinar la influencia del tratamiento térmico sobre la resistencia al desgaste de estos recubrimientos se realizaron dos tratamientos térmicos, el primero en horno de vacío y el segundo mediante una llama oxiacetilénica. La determinación de la dureza estática de los recubrimientos con y sin tratamientos térmico posterior utilizando técnicas de microindentación según la norma ASTM E-384. La microestructura, la superficie y mecanismos de desgaste fueron estudiadas mediante microscopía electrónica de barrido. El recubrimiento sin tratamiento térmico se comportó 55% mejor que los tratados. Este comportamiento probablemente es debido a variaciones en la composición química de los óxidos presentes como consecuencia del tratamiento térmico posterior lo cual incidió desfavorablemente sobre la propiedad lubricante de los mismos. El régimen de desgaste presente en todas las muestras fue severo, las tasas de desgaste fueron superiores a 1.10^{-5} mm³/m. La resistencia a la abrasión presentó un incremento del 68% cuando el recubrimiento fue tratado térmicamente en horno de vacío, este comportamiento fue atribuido a mejoras en la densificación.

ABSTRACT

M. Forti, Carlos A. And Rodriguez C, P Petter

EVALUATION OF SLIDING WEAR AND MECHANICAL PROPERTIES OF MOLYBDENUM-NICKEL COATING, DEPOSITED BY THERMAL SPRAY WITH AND WITHOUT SUBSEQUENT HEAT TREATMENT

Academic Tutor: Prof. Maria Rodriguez de Prato. Industrial Tutor: Ing. Andrea Scagni. Caracas, U. C. V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica. 2012, pp. 155.

Keywords: SPRAY, MOLYBDENUM, WEAR SLIP, ABRASION.

Abstract. This paper studies the behavior under sliding wear and abrasion resistance of a coating deposited with a molybdenum-nickel based alloy using thermal spray technique on a substrate by plasma AISI 1020 steel. Behavioural assessment of the coating against abrasive wear was conducted using the ASTM G-65. The sliding wear study was performed according to ASTM G-77 in block on ring arrangement using as counterpart a cobalt based alloy (Stellite 6). They chose a 32 factorial design in order to evaluate the performance of the tribological pair to changes in load and speed for which we used a statistical program (ANOVA). To determine the influence of heat treatment on the wear resistance of these coatings were two heat treatments, the first vacuum furnace and the second using an oxyacetylene flame. Determining the static hardness coatings with and without subsequent heat treatments microindentation techniques using ASTM E-384. The microstructure and surface wear mechanisms were studied by scanning electron microscopy. The coating without heat treatment behaved 55% better than treaties. This behavior is probably due to variations in the chemical composition of the oxides present as a result of subsequent thermal treatment which adversely impacted lubricating property thereof. The wear rate present in all samples was severe wear rates were higher than 1.10^{-5} mm³ / m. The abrasion resistance showed an increase of 68% when the coating was heat treated in a vacuum oven, this behavior was attributed to improvements in densification.

ÍNDICE GENERAL

ACTA.....	iv
AGRADECIMIENTOS	viii
RESUMEN.....	ix
ÍNDICE GENERAL.....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xv
ÍNDICE DE TABLAS	xvii
INTRODUCCIÓN	18
CAPÍTULO I. EL PROBLEMA	20
1.1. Planteamiento del problema	20
1.2. Objetivo de la Investigación.....	22
1.2.1. Objetivo General.....	22
1.2.2. Objetivo Específico.....	22
1.3. Alcances	23
1.4. Estudios Preliminares o Antecedentes	24
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	29
2.1. Tribología	29
2.2. Fricción.....	32
2.3. Desgaste.....	34
2.4. Gráficas Tribológicas	35
2.4.1. Curvas maestras fricción-tiempo	35
2.4.2. Curva maestra desgaste-tiempo	36
2.5. Clasificación del desgaste.....	38
2.6. Mecanismo de Desgaste	40
2.6.1. Desgaste Adhesivo.....	41
2.6.2. Desgaste Abrasivo	42
2.6.3. Desgaste Corrosivo.....	43

2.6.4. Desgaste por Fatiga Superficial	44
2.6.5. Desgaste por Erosión	44
2.6.6. Desgaste Microoscilatorio (Fretting)	45
2.7. Teoría sobre el desgaste.....	47
2.7.1. Teoría de adhesión	47
2.7.2. Teoría de la delaminación.....	49
2.7.3. Teorías relacionadas con fatiga.....	51
2.7.4. Teoría del desgaste oxidativo	52
2.7.5. Teoría del deterioro cíclico	53
2.8. Efectos de las variables más importantes	54
2.8.1. Carga Normal.....	54
2.8.2. Distancia deslizada o tiempo	54
2.8.3. Velocidad de deslizamiento	56
2.9. Rociado Térmico	56
2.9.1. Aplicación del rociado térmico.....	58
2.9.2. Algunos beneficios de los recubrimientos rociado térmicamente:	59
2.9.3. Limitaciones.....	59
2.9.4. Aspectos fundamentales a considerar en los métodos de deposición por rociado térmico.	60
2.10. Tipos de procesos de rociado térmico	61
2.10.1. Procesos de rociado térmico por combustión:	61
2.11. Procesos de rociado térmico por energía eléctrica:	64
2.11.1. Proceso térmico por arco eléctrico.....	64
2.11.2. Rociado térmico por plasma	65
2.12. Sistema MIG (Metal Inerte Gas)	66
2.12.1. Semi automático	68
2.12.2. Automático.....	68

2.12.3. Robotizado.....	68
2.13. Condiciones operacionales	68
2.13.1. Polaridad	68
2.13.2. Tensión de arco (Voltaje)	69
2.13.3. Velocidad de alimentación del alambre.....	69
2.13.4. Naturaleza del metal base	69
2.13.5. La porosidad	69
2.13.6. Rodillos de arrastre inadecuados	69
2.14. Equipo para la soldadura MIG	70
2.14.1. Generador de soldadura	70
2.14.2. Esquemático del equipo MIG:	70
2.14.3. Beneficios del sistema MIG.....	70
2.15. Diseño Experimental Factorial.....	71
2.16. Análisis de Varianza ANOVA	72
2.17. Método de Superficie de Respuesta	74
2.18. Esfuerzos de Contacto	79
2.18.1. Esfuerzo de contacto de superficies esféricas:.....	79
2.18.2. Esfuerzo de Contacto en superficies cilíndricas	81
CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO	83
3.1. Investigación	83
3.1.1. Investigación Documental	83
3.1.2. Investigación experimental.....	83
3.2. Procedimientos y actividades.	84
3.3. Material	86
3.4. Fabricación de las probetas	87
3.5. Distribución de las probetas.	89
3.6. 3.6 Deposición de los recubrimientos	89

3.6.1. Proceso de soldadura MIG.....	89
3.6.2. Rociado Térmico por plasma.....	91
3.7. Rectificado.....	94
3.8. Tratamientos térmicos	95
3.9. Ensayo de Rugosidad	96
3.10. Ensayo de Dureza	96
3.11. Cálculo de la densidad.....	97
3.12. Ensayo de Abrasión.....	97
3.13. Ensayo de Desgaste por Deslizamiento por arreglo Bloque sobre Anillo.	102
3.14. Determinación del coeficiente de fricción.....	104
3.15. Microscopia Electrónica de Barrido (MEB)	105
CAPÍTULO IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	106
4.1. Microestructura y Composición Química Elemental (EDS).....	106
4.2. Densidad de los recubrimientos	112
4.3. Resultados de Dureza	112
4.4. Evaluación del desgaste por deslizamiento	114
4.5. Evaluación del desgaste por deslizamiento	119
4.5.1. Anova.....	119
4.6. Efectos de los tratamientos térmicos.	124
4.8 Análisis de las superficies de desgaste	128
4.9 Microscopía Electrónica de Barrido para los anillos Stellite 6	135
4.10 Análisis del ensayo de abrasión.....	142
4.11 Microscopía Electrónica de Barrido para los muestras de abrasión.	143
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	148
5.1. Conclusiones	148
5.2. Recomendaciones	151
BIBLIOGRAFÍA	152
ANEXOS	155

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Bomba P3001	21
Figura 1-2. Carcasa de la bomba P3001.....	22
Figura 2-1. Fricción Estática (FE).....	34
Figura 2-2. Fricción Dinámica (FD)	34
Figura 2-3. Curva maestra coeficiente de fricción-tiempo.....	35
Figura 2-4. Curva maestra desgaste-tiempo.....	37
Figura 2-5. Esquema del Desgaste Adhesivo.....	42
Figura 2-6. Esquema del Desgaste Abrasivo	43
Figura 2-7. Esquema del Desgaste por Fatiga Superficial.	44
Figura 2-8. Patrón característico de desgaste de aceros (Desgaste severo)	55
Figura 2-9. Patrón característico de desgaste de aceros (Desgaste suave).....	55
Figura 2-10. Representación Esquemática de la Formación del Recubrimiento en los Procesos de Rociado Térmico.....	58
Figura 2-11. Pasos elementales en un proceso de rociado térmico.....	60
Figura 2-12. Esquema de rociado por llama	62
Figura 2-13. Esquema de rociado hipersónico.....	64
Figura 2-14. Esquema rociado térmico por arco eléctrico	65
Figura 2-15. Esquema rociado térmico por plasma	66
Figura 2-16. Proceso MIG. 1. Dirección de la soldadura 2. Tubo de contacto 3. Hilo 4. Gas protector 5. Soldadura 6 y 7. Piezas a unir.	67
Figura 2-17. Superficie de Respuesta.....	77
Figura 2-18. Gráfica de contornos	77
Figura 2-19. a) Contacto entre superficies curvas, figura. b) distribución de presión. Fuente: Joseph E Shigley 6ta edición.	80
Figura 2-20. a) contacto de superficies cilíndricas b) distribución de presión. Fuente: Joseph Shigley 6ta edición.....	81
Figura 3-1. Diagrama de Flujo del Procedimiento Experimental	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3-2. Dimensiones de la probeta (arriba) y del anillo (abajo) de ensayo Bloque sobre anillo.....	88
Figura 3-3. Dimensiones de la probeta de ensayo de abrasión.	89
Figura 3-4. Fijación de las probetas	91
Figura 3-5. Pre calentamiento de las probetas	92
Figura 3-6. Superficie de las probetas luego del arenado	92
Figura 3-7. Pistola de plasma SG-200 (tomada del catalogo Praxair)	93
Figura 3-8. Proceso de rociado térmico por plasma.....	94
Figura 3-9. Control de temperatura y espesor de las probetas en el rociado	94
Figura 3-10. Horno tubular para tratamientos térmicos Marca Lindberg/Blue	95
Figura 3-11. Aplicación del tratamiento TT Llama	96
Figura 3-12. Rugosímetro	96
Figura 3-13. Máquina de ensayos de abrasión	98
Figura 3-14. Balanza electrónica.....	99
Figura 3-15. Microscopio Electrónico de Barrido	105
Figura 4-1. Micrografías de los recubrimientos Mo-Ni (a y b) a 200 y 500X (c y d) T.T. Vacío a 200 y 500X (e y f) T.T. Llama a 200 y 500X.....	107
Figura 4-2. Micrografía de Mo-Ni con magnificación de 1000X (a y b), Micrografía de vacío con magnificación de 1000X (c y d), Micrografía de llama a 1000X (e y f) En modo de electrones primarios y secundarios.	109
Figura 4-8. Interacción de las variables	123
Figura 4-13. Micrografía de la superficie de desgaste Mo-Ni. Condición singular 44,6; 0,15 m/seg. a) 30X SE y b) 200X BSE.	132
Figura 4-19. Micrografía de la superficie de desgaste anillo contraparte TT Vacío (89 N; 0,2 m/seg) a) 21X SE y b) 50X BSE.	140
Figura 4-20. Pérdidas volumétricas para el ensayo de abrasión para cada tiempo... 143	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1. Diferencia de desgaste suave a severo.....	39
Tabla 2-2. Valores de coeficientes de desgaste k con deslizamiento en seco.....	40
Tabla 2-3. Clasificación del desgaste en la Industria.....	47
Tabla 2-4. Resumen de Análisis de Varianza	73
Tabla 3-1. Composición Química (%) Stellite 6.....	86
Tabla 3-2. Propiedades Mecánicas.....	86
Tabla 3-3. Composición Química del acero AISI 1020.....	87
Tabla 3-4. Propiedades Mecánicas del acero AISI 1020	87
Tabla 3-5. Distribución de las probetas.....	89
Tabla 3-6. Parámetros fijos del proceso de deposición.....	90
Tabla 3-7. Parámetros Fijos de Proceso de deposición.....	91
Tabla 3-8. Parámetros del arenado.....	93
Tabla 3-9. Composición del recubrimiento de goma del disco abrasivo	99
Tabla 3-10. Procedimientos según la Norma ASTM G 65-00.....	100
Tabla 4-1. Densidad de los recubrimientos.....	112
Tabla 4-2. Dureza.....	113
Tabla 4-5. Tasa de Desgaste de los bloques con y sin tratamiento térmico posterior	124
Tabla 4-6. Pérdidas Volumétricas por Abrasión a los 30 min de ensayo	142

INTRODUCCIÓN

En los últimos años se han desarrollado una gran diversidad de recubrimientos cuya formulación o composición obedece a la resolución de un problema específico. El uso de los recubrimientos metálicos es una práctica extendida desde la antigüedad ya que constituye, en general, una solución económica que nos permite disfrutar de las propiedades de un metal, muchas veces caro, utilizando como sustrato masivo un material más económico. Los recubrimientos son empleados frecuentemente para reconstruir piezas desgastadas y así incrementar la vida útil de estructuras, maquinarias y partes, contribuyendo a mejorar la calidad de los productos y disminuir los tiempos de paradas.

En el pasado, a una serie de sustancias, no se sabía su procedencia se les nombraba molybdos, en griego significa “parecido al plomo”. Adentro de estas sustancias se encontraba una que era denominada molibdenita. El científico Carl Wilhelm en el año de 1778, determinó que la molibdenita era simplemente el sulfuro de un metal que hasta la fecha se desconocía. Al oxidar molibdenita con aire y ácido nítrico, obtuvo el óxido del metal, el cual no se comportaba como ninguno de los óxidos metálicos conocidos hasta entonces. En 1782, Peter Jacob Hjelm disminuyó el óxido del metal con carbón y obtuvo el metal en su estado puro, al que llamó molibdeno.

El molibdeno es un metal de transición del Grupo 6 y quinto en la tabla periódica. En su mismo grupo se encuentra el cromo (Cr) y el tungsteno (W). Además brinda una excelente resistencia a la corrosión por vapores de yodo, bromuro, cloruro, hasta ciertos límites de temperatura. Es resistente a la oxidación por varios metales en estado líquido, como el bismuto, litio, potasio, sodio y vidrio.

La superficie es una de las partes de gran importancia en muchos componentes ingenieriles, debido a que es en la superficie de partes y componentes donde la mayoría de las fallas se originan. Se han realizados diversas investigaciones sobre recubrimientos superficiales, tratamientos y el desarrollo de nuevas técnicas para la modificación de superficies.

Actualmente el monitoreo del desgaste constituye uno de los principales objetivos en una gran variedades de industrias, tanto en el diseño mecánico como en las operaciones de mantenimiento lo cual a la final se traduce en disminución de costos por sustitución de piezas irre recuperables y paradas de planta, entre otros.

Los polvos del molibdeno han tomado un lugar preponderante en la formulación de recubrimientos para la proyección térmica, buscando mejorar propiedades de fricción y desgaste de componentes, ejemplos de ellos tenemos engranajes, sincronizadores, anillos de pistones, etc. El molibdeno unido con el níquel y el cromo produce recubrimientos con una alta resistencia a la corrosión.

En otras áreas como la electrónica, recubrimientos con polvos de molibdeno son usados en la producción de celdas solares y en películas delgadas de transistores para pantallas planas. Esto se debe al excepcional ajuste de la expansión térmica que presenta el molibdeno con los sustratos de vidrio o silicio.

El rociado térmico es en la actualidad una técnica de gran importancia en la tecnología de superficies por sus aportes en la protección anticorrosiva de piezas y estructuras, puesto que mediante ella puede lograrse recubrimientos de gran versatilidad.

El presente trabajo de investigación evalúa el desgaste por abrasión y por deslizamiento de recubrimientos molibdeno-níquel depositados por rociado térmicos con y sin tratamiento térmico posterior.

CAPÍTULO I. EL PROBLEMA

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La mayoría de las piezas y componentes que son utilizados en la industria petrolera sufren desgaste severo debido a las condiciones de trabajo a las cuales son expuestos dichos componente. Unos de estos componentes es la bomba modelo P-3001 de desplazamiento positivo rotatorio de dos tornillos que se utiliza en el complejo de procesamiento de crudos Petrocedño (PDVSA). Esta turbomáquina falla debido a que el fluido de trabajo (petróleo) deja el subsuelo con otros elementos como son arena, vapor de agua, metales y otros agentes lo cual aumenta la presión interna de la bomba logrando que el tornillo deflecte y se produzca el contacto con la superficie interna lo que causa el deterioro de la misma. Actualmente este componente es fabricado mediante la aplicación de un recubrimiento electrolítico denominado “Cromo Duro” en la superficie interna de la carcasa y los tornillos de una aleación de base cobalto (stellite 6).

Actualmente, los recubrimientos de cromo por baño electrolítico se utilizan como capas protectoras contra el desgaste, la corrosión y como acabado decorativo. En general, estos recubrimientos se realizan en baños químicos utilizando sustancias tóxicas lo que produce residuos, solución de aire y contaminación de agua. El principal reactivo en estos procesos es el cromo hexavalente (Cr+6). Según la “United States Enviromental Protection Agency EPA” este compuesto es una causa directa del cáncer de pulmón. Por otro lado, diversos centros de investigación europeos y norteamericanos han confirmado que el proceso de cromado por electrodeposición es uno de los principales contaminantes del agua y del aire.

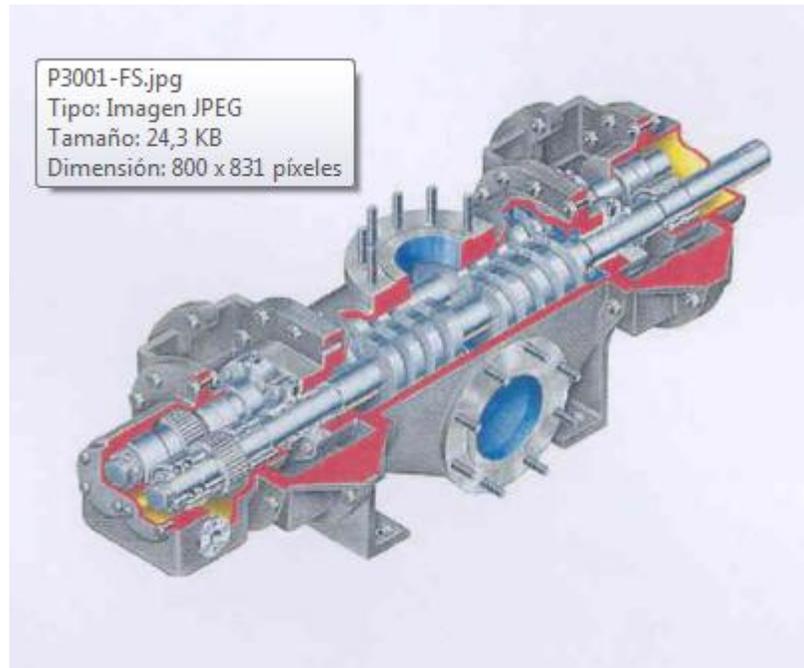


Figura 1-1. Bomba P3001

La recuperación de cromo duro otorgaría una mayor vida útil a la bomba sin embargo, la gran toxicidad de este proceso es la principal desventaja que presenta su utilización para la recuperación de piezas, por ende el presente trabajo de investigación busca encontrar una sustitución adecuada vislumbrada por los recubrimientos molibdeno-níquel depositados por rociado térmicos. Los ensayos seleccionados buscan “simular” los distintos tipos de desgaste presentes durante el movimiento relativo del tornillo dentro de la carcasa cuando la bomba esta operativa, con tal fin se escoge el ensayo de desgaste por deslizamiento en arreglo bloque sobre anillo, además del ensayo de abrasión.



Figura 1-2. Carcasa de la bomba P3001

1.2. OBJETIVO DE LA INVESTIGACIÓN

1.2.1. Objetivo General

Evaluar la resistencia al desgaste por deslizamiento y propiedades mecánicas de un recubrimiento molibdeno-níquel depositado por rociado térmico por plasma con y sin tratamiento térmico posterior.

1.2.2. Objetivo Específico

- Depositar los recubrimientos base molibdeno níquel mediante la técnica de rociado térmico por plasma utilizando los parámetros dados por la empresa Plasmatec Ingenieros.
- Seleccionar el material que hará de contraparte en el ensayo de desgaste por deslizamiento.

- Determinar la resistencia al desgaste por deslizamiento de acuerdo con la norma ASTM G77-98 utilizando un diseño experimental factorial 4^2 con la finalidad de evaluar el comportamiento del material, ante distintas variaciones de carga y velocidad.
- Determinar los valores óptimos de carga y velocidad que otorguen las menores tasas de desgaste por deslizamiento utilizando análisis estadístico de varianza ANOVA.
- Aplicar dos tratamientos térmicos (llama y horno) a las muestras que obtuvieron las menores tasas de desgaste por deslizamiento.
- Determinar la resistencia al desgaste de los recubrimientos con tratamiento térmico posterior y comparar con los obtenidos en el recubrimiento sin tratamiento.
- Determinar el coeficiente de roce dinámico de los recubrimientos en estudio.
- Determinar la resistencia al desgaste por abrasión de acuerdo a la ASTM G65-00 para los recubrimientos en estudio.
- Determinar los mecanismos de desgaste presentes en las superficies de los recubrimientos sometidos a ensayos de abrasión y deslizamiento respectivamente.
- Determinar la dureza en la sección transversal de los mismos mediante el ensayo de micro-indentación de los recubrimientos con y sin tratamiento térmico posterior.
- Evaluar los efectos de los tratamientos térmicos posterior sobre el desgaste por deslizamiento, por abrasión y dureza de recubrimiento Mo-Ni depositados por la técnica de rociado térmico por plasma.

1.3. ALCANCES

- Depositar los recubrimientos base molibdeno níquel mediante la técnica de rociado térmico por plasma utilizando los parámetros dados por la empresa Plasmatec Ingenieros.

- Seleccionar las variables que variarán en el ensayo bloque sobre anillos y utilizar un diseño experimental factorial para dos variables y cuatro niveles (4^2).
- Seleccionar la contraparte que se utilizara para evaluar los recubrimientos en el ensayo de deslizamiento.
- Determinar los valores óptimos de carga y velocidad de deslizamiento en función de la tasa de desgaste obtenida utilizando un análisis estadístico de varianza (ANOVA).
- Seleccionar los parámetros para la realización de un tratamiento térmico en horno y aplicar el tratamiento a los recubrimientos depositados.
- Realizar un tratamiento térmico mediante llama oxiacetilénica al recubrimiento Mo-Ni.
- Realizar los tratamientos térmicos seleccionados a las muestras que obtuvieron los mejores valores de resistencia al desgaste por deslizamiento.
- Calcular el coeficiente de roce y evaluar la influencia del tratamiento térmico posterior.
- Evaluar la resistencia al desgaste por abrasión de acuerdo a la ASTM G65-00 de los recubrimientos con y sin tratamiento térmico posterior a través del volumen desgastado.
- Determinar la dureza de los recubrimientos a través del ensayo de dureza vickers utilizando un microdurómetro.

1.4. ESTUDIOS PRELIMINARES O ANTECEDENTES

Los recubrimientos de molibdeno rociados térmicamente son ampliamente utilizados para combatir la degradación de los componentes y estructuras debido a desgaste mecánico (Laribi 2003) y por lo tanto son extensamente usados en aplicaciones industriales tales como en asientos de válvulas, cojinetes, cigüeñales, ejes de pistones hidráulicos y en general en lugares donde se requiera bastante dureza y precisión. Sin embargo, el comportamiento, las propiedades y la durabilidad de

estos recubrimientos son extremadamente dependientes de las condiciones de rociado. En las últimas décadas se han realizado numerosos estudios los cuales se han centrado en el aumento de la durabilidad y la integridad del revestimiento. Mejora de la adherencia del depósito al sustrato, la reducción al mínimo nivel de los esfuerzos residuales y la disminución de la porosidad son los principales objetivos de estos trabajos.

Los parámetros utilizados para los recubrimientos base molibdeno-níquel depositados por la técnica de rociado térmico por plasma de este trabajo de investigación fueron los recomendados por Conde y Dávila (2007) quienes lograron determinar las condiciones óptimas de aplicación de un recubrimiento base molibdeno-níquel depositado mediante el proceso de rociado térmico por plasma, para lo cual se utilizó un diseño factorial 3^3 con la finalidad de controlar la variabilidad del proceso aleatorio. Se realizaron variaciones en los tres parámetros del proceso, es decir, voltaje, amperaje y tasa de alimentación de polvos obteniendo de esta manera los rangos de las variables estudiadas para los cuales se obtuvieron los menores valores de desgaste abrasivo. Storlaski y Tobe (2001) también realizaron el estudio del efecto de la distancia de rociado en el proceso de rociado por plasma, y determinaron que la resistencia al desgaste de los recubrimientos depende de la distancia de rociado. La dureza de los recubrimientos parece ser un factor predominante frente al desgaste así como también las condiciones de los ensayos, y la configuración geométrica del par tribológico puede incidir dramáticamente sobre el comportamiento de los recubrimientos. Estos mismos investigadores reportaron que entre las características que presenta los recubrimientos de molibdeno el tener una microestructura compacta, una buena cohesión y alta resistencia al desgaste. Guo y colaboradores (2007) estudiaron el rociado de polvos de molibdeno reportaron que las cargas aplicadas y la dureza de la contraparte tienen influencias significativas sobre las propiedades tribológicas de los recubrimientos, para los ensayos de bloque sobre anillos, utilizaron una aleación TiCN y un acero 1045 como sustrato. Reportaron que

el coeficiente de fricción tiene un incremento al inicio luego disminuye a un estado estacionario.

En relación a los efectos con la mezcla o aleaciones de polvos en la resistencia al desgaste de recubrimientos base molibdeno, Hwang et. al. (2004) realizaron un estudio en el cual evaluaron el efecto de las aleaciones con Mo puro (mezcla de polvos con bronce y una aleación aluminio-silicio) sobre la resistencia al desgaste por deslizamiento y el coeficiente de fricción. Se fabricaron siete recubrimientos variando la cantidad de polvos mezclada con el polvo de molibdeno sobre un sustrato de acero de bajo carbono. El análisis microestructural de los recubrimientos mostro que las fases formadas durante el rociado fueron homogéneamente distribuidas en la matriz del molibdeno. Los resultados del ensayo de desgaste revelaron que las tasa de desgaste en todos los recubrimientos se eleva con el aumento de las carga. Los recubrimientos compuestos mostraron una mejor resistencia al desgaste que el recubrimiento de molibdeno puro, aunque la dureza de éste último fue menor.

Jian Liang Li y colaboradores (2008) realizaron un estudio de las propiedades mecánicas y tribológicas de recubrimientos depositados con compuestos de NiCrWAlTi-MoS₂ con la adición de diferentes cantidades de disulfuro de molibdeno (6-20 wt.%) mediante un ensayo de desgaste por deslizamiento con arreglo bola sobre disco a una temperatura de 600°C. Estos investigadores concluyeron que las propiedades mecánicas de los recubrimientos pueden ser mejoradas mediante la adición adecuada de MoS₂, el coeficiente de fricción disminuye con el aumento de la temperatura, carga y velocidad.

Deepark Rajput et. al. (2009) utilizaron mezclas de Cr-CrB₂ y Mo-MoB y las depositaron mediante laser en un acero AISI 4130, reportando unos espesores de 125-150 micras y 100-125 micras respectivamente. Indicaron estos investigadores que el cromo exhibe resistencia a la erosión y el recubrimiento de molibdeno mejoro la

resistencia al desgaste por deslizamiento. Se encontró que existe una correlación débil entre la dureza del recubrimiento y su comportamiento frente al desgaste.

Da Silva y Hoyer (2009) evaluaron el comportamiento frente al desgaste por deslizamiento con la configuración bloque sobre anillo según la norma ASTM G77 de una fundición y un recubrimiento base molibdeno depositado por la técnica de rociado térmico por plasma. Como contraparte se utilizó nylon 6 para ambos materiales, se empleó un diseño experimental factorial 4^2 con la finalidad de evaluar el comportamiento de ambos materiales antes distinta cargas y velocidades, para obtener las condiciones más favorables para cada material evaluado en cuanto a resistencia al deslizamiento se refiere. Se realizaron dos tratamientos térmicos diferentes a los recubrimientos, el primero en un horno de atmósfera controlada de argón a una temperatura de 600°C , el segundo mediante la exposición directa del recubrimiento a una llama oxiacetilénica. Estos recubrimientos fueron evaluados con las condiciones más desfavorables de carga y velocidad determinadas anteriormente. Seguidamente se realizaron estudios de dureza, microscopía electrónica de barrido para la mejor y peor condición arrojada por los ensayos de desgaste, evaluando la microestructura, composición química, porosidad y mecanismos de desgaste presentes en la superficie del material ensayado.

Estos autores determinaron que la aplicación de los tratamientos térmicos posteriores sobre los recubrimientos de molibdeno, mejoraron en 97,75% el comportamiento ante el desgaste de los mismos, superando incluso a la fundición gris. Igualmente se determinó que el desgaste en el recubrimiento se debe a un proceso de abrasión de tres cuerpos debido al desprendimiento de la fase dura del mismo durante el ensayo. El modo de desgaste para la fundición gris se debe a la pérdida de una de las láminas de grafito. Se encontró adicionalmente que no existe correlación entre la dureza y la respuesta ante el desgaste en los recubrimientos evaluados.

Scandian y colaboradores (2009) realizaron estudios del efecto del contenido de molibdeno y cromo en desgaste por deslizamiento. La dureza es menos relevante como parámetro de control de desgaste por el mismo cromo contenido en una matriz de una fase, la dureza incrementa con el contenido de molibdeno y la pérdida de desgaste disminuye.

Luego Cadenas, P., Rodríguez, M. y Staia, M. (2007) investigaron el efecto del tratamiento térmico posterior sobre la resistencia al desgaste por deslizamiento de un recubrimiento base níquel depositado por la técnica de proyección térmica de alta velocidad oxígeno-combustible (HVOF). La resistencia al desgaste por deslizamiento sin lubricación del recubrimiento en estado como rociado así como también tratado térmicamente fue investigada bajo diferentes condiciones tribológicas siguiendo la norma ASTM D2714-88 la cual establece una configuración geométrica bloque sobre anillo. La distancia de deslizamiento se mantuvo constante a un valor de 550m. Para las condiciones evaluadas en este estudio, se encontró que el recubrimiento con tratamiento térmico tiene desde 1,15 veces más resistencia al desgaste, para el menor nivel de carga aplicada y mayor velocidad de deslizamiento y, hasta 50 veces más resistencia al desgaste para el mayor nivel de carga aplicada y mayor velocidad de deslizamiento, comparado con el recubrimiento sin tratamiento térmico.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1. TRIBOLOGÍA

La tribología es la ciencia que estudia las superficies que interactúan con otras superficies. Dentro de esta ciencia se incluye el estudio de la fricción, la lubricación y el desgaste, además de la naturaleza y las consecuencias de la interacción de las superficies entre sí. Puntualmente, la tribología se centra en el estudio de tres fenómenos:

- La fricción entre dos cuerpos.
- El desgaste como efecto natural del fenómeno de fricción.
- La lubricación como medio alternativo para evitar el desgaste.

En sus inicios, la tribología estudió exclusivamente problemas relacionados con el deslizamiento lubricado porque este había sido el único que permitía aplicaciones tecnológicas prácticas. Sin embargo, con la aparición de recubrimientos más duros y resistentes, se desarrolló la tribología sin lubricación. Siendo ésta la rama de la tribología que actualmente está siendo más investigada.

La tecnología de los recubrimientos protectores puede contribuir a la solución de innumerables problemas de desgaste mediante la aplicación de aleaciones diseñadas específicamente para combatir cada uno de los mecanismos de deterioro superficial como la abrasión, corrosión, calor, entre otros. En el presente trabajo se realiza el estudio del par tribológico entre el molibdeno-níquel usando como contraparte una aleación base a cobalto llamada comercialmente stellite 6.

Se considera fricción a la resistencia al movimiento de un cuerpo sobre otro cuerpo, esta juega un gran papel en los procesos y actividades industriales debido a que se presenta en la mayoría de ellas.

Leonardo da Vinci en el siglo XV realizó estudios sobre fricción que fueron descartados en su momento. Con lo cual las leyes empíricas que gobiernan la fricción de cuerpos sólidos fueron nombradas por Guillaume Amontons en 1699 y reestructuradas por Charles-Augustin de Coulomb en 1774, que las sintetizó en las siguientes dos leyes básicas:

1. La resistencia al deslizamiento tangencial entre dos cuerpos es proporcional a la fuerza normal ejercida entre los mismos.
2. La resistencia al deslizamiento tangencial entre dos cuerpos es independiente de las dimensiones de ambos.

En la mayoría de los casos la fricción siempre es asociada con la disipación de energía y un número de estados que pueden ser identificados en el proceso de la pérdida de energía, los cuales son:

Estado uno: la energía mecánica es introducida en la zona de contacto, resultando la formación de un área real de contacto.

Estado dos: la energía mecánica es transformada con el área de contacto, principalmente a través de deformación elástica, deformación plástica, apariciones de surcos y adhesión en las superficies.

Estado tres: la disipación de energía mecánica, la cual se realiza principalmente a través de: disipación térmica (calor), almacenamiento en todo el cuerpo (generación de defectos, grietas, estado de esfuerzos, transformaciones plásticas) y emisiones (acústica y térmica).

El desgaste es un proceso de daño superficial que se produce por efecto del contacto mecánico entre dos materiales, que involucra pérdida y/o daño del material debido al movimiento de las superficies.

Los tipos de movimientos entre los cuerpos en contacto también pueden ser usados para clasificar los diferentes procesos de desgaste. Existen diferentes técnicas las cuales son aplicadas para examinar el desgaste y en contraste a otras pruebas o ensayos mecánicos, no hay una norma general o estándar para examinar o probar el desgaste, pero un número de técnicas han sido ampliamente aceptadas en los laboratorios alrededor del mundo. La razón de la gran variedad de técnicas para examinar el desgaste es por la gran diversidad de sistemas de desgaste que ocurren en la práctica.

Czichos en 1976 realiza un enfoque de sistemas, en el cual considera los factores que influyen en el desgaste, clasificándolos como variables operacionales y variables estructurales.

Dentro de las variables operacionales se encuentran la carga aplicada, la temperatura, la velocidad y el tipo de movimiento. Las variables estructurales del sistema tribológico tenemos las variables relacionadas con las propiedades volumétricas de los dos cuerpos en contacto, como la geometría, las dimensiones, la composición química, la microestructura y la dureza. En las variables estructurales también se consiguen las propiedades superficiales de los dos cuerpos en contacto, como la rugosidad y la microdureza.

Para la evaluación del desgaste se encuentran la tasa de desgaste y la tasa de desgaste específica. La pérdida del volumen de la superficie desgastada por unidad de distancia deslizada es llamada tasa de desgaste, esta tasa tiene unidades de mm^3/m la tasa de desgaste específica es definida como la pérdida del volumen de la superficie

desgastada por unidad de distancia deslizada por unidad de carga normal aplicada y se expresa en unidades de mm³/N.m.

2.2. FRICCIÓN

Se define como la resistencia al movimiento que se ejerce cuando un objeto solido se mueve tangencialmente respecto a la superficie de otro solido. La fricción (μ) es expresada en términos relativos de fuerza como, el cociente entre la fuerza de fricción (F_r) y la carga normal (F_n) a las superficies de contacto, según la Ec. 2-1:

$$\mu = \frac{F_r}{F_n}$$

Ec. 2-1

El termino μ es un coeficiente adimensional, carece de unidades ya que ambos términos están expresados bajo unidades iguales.

En el rozamiento entre cuerpos sólidos se ha observado que son válidos de forma aproximada los siguientes hechos empíricos:

1. La fuerza de rozamiento tiene dirección paralela a la superficie de apoyo.
2. El coeficiente de rozamiento depende exclusivamente de la naturaleza de los cuerpos en contacto, así como del estado en que se encuentren sus superficies.
3. La fuerza máxima de rozamiento es directamente proporcional a la fuerza normal que actúa entre las superficies de contacto.
4. Para un mismo par de cuerpos (superficies de contacto), el rozamiento es mayor un instante antes de que comience el movimiento que cuando ya ha comenzado (estático vs. cinético).

El rozamiento puede variar en una medida mucho menor debido a otros factores:

1. El coeficiente de rozamiento es prácticamente independiente del área de las superficies de contacto.
2. El coeficiente de rozamiento cinético es prácticamente independiente de la velocidad relativa entre los móviles.
3. La fuerza de rozamiento puede aumentar ligeramente si los cuerpos llevan mucho tiempo sin moverse uno respecto del otro ya que pueden sufrir atascamiento entre sí.

Algunos autores sintetizan las leyes del comportamiento de la fricción en los siguientes dos postulados básicos:

1. La resistencia al deslizamiento tangencial entre dos cuerpos es proporcional a la fuerza normal ejercida entre los mismos.
2. La resistencia al deslizamiento tangencial entre dos cuerpos es independiente de las dimensiones de contacto entre ambos.

La segunda ley puede ilustrarse arrastrando un bloque sobre una superficie plana. La fuerza de arrastre será la misma aunque el bloque descansa sobre la cara ancha o sobre un borde más angosto. Estas leyes fueron establecidas primeramente por Leonardo da Vinci al final del siglo XV, olvidándose después durante largo tiempo; posteriormente fueron redescubiertas por el ingeniero francés Amontons en 1699. Frecuentemente se les denomina también leyes de Amontons.

Existen dos tipos de rozamiento o fricción, la fricción estática (FE) Figura 2- y la fricción dinámica (FD) Figura 2-. El primero es la resistencia que se debe superar para poner en movimiento un cuerpo con respecto a otro que se encuentra en contacto. El segundo, es la resistencia, de magnitud considerada constante, que se opone al movimiento pero una vez que éste ya comenzó. En resumen, lo que diferencia a un roce con el otro, es que el estático actúa cuando los cuerpos están en reposo relativo en tanto que el dinámico lo hace cuando ya están en movimiento.

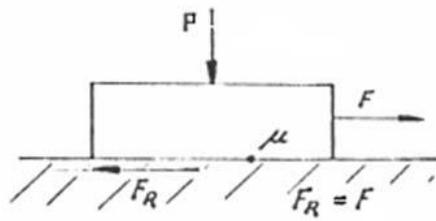


Figura 2-1. Fricción Estática (FE)

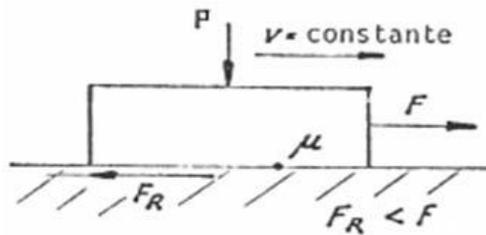


Figura 2-2. Fricción Dinámica (FD)

2.3. DESGASTE

Según la Asociación Americana de Metales (ASTM, 1994), desgaste “es el daño producido a una superficie sólida, que implica generalmente la pérdida progresiva o desplazamiento de material, debido al movimiento relativo entre esa superficie y una sustancia o sustancias de contacto”.

La magnitud del desgaste depende principalmente de las propiedades intrínsecas del material utilizado, de la naturaleza, condición de las superficies en fricción, fuerzas químicas y físicas que actúan en la superficie del material utilizado. Debido a la compleja naturaleza del desgaste, no hay una relación cuantitativa que permita calcular la cantidad de desgaste para ensayos de laboratorio.

El desgaste es una de las principales causas por la cual se hace necesario el mantenimiento industrial. Comparado con los otros dos problemas que ocasionan el

reemplazo de máquinas o componentes: fatiga y corrosión. Entre las consecuencias ocasionadas por el desgaste tenemos:

- Reducción de la eficacia de operación
- Pérdida de la potencia por fricción.
- Incremento del consumo de lubricantes.
- Eventualmente conduce al reemplazo de componentes desgastados.
- Obsolescencia de las máquinas en su totalidad.

2.4. GRÁFICAS TRIBOLÓGICAS

2.4.1. Curvas maestras fricción-tiempo

La curva típica fricción-tiempo de deslizamiento en seco consiste de una presentación simplificada de cuatro estados del coeficiente de fricción Kennard, R.W. 1978 Un ejemplo típico para un sistema metal/metal se muestra en la (Figura 2-1).

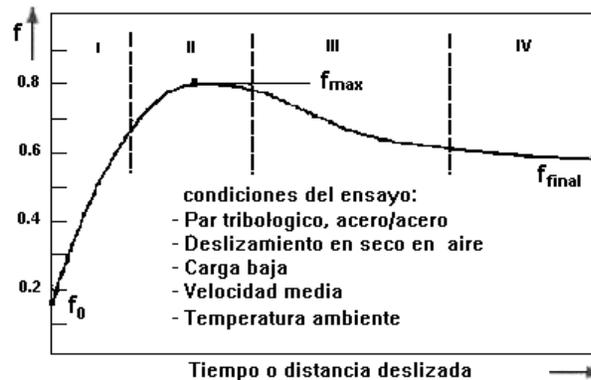


Figura 2-1. Curva maestra coeficiente de fricción-tiempo

El valor inicial del coeficiente de fricción del *estado I*, el cual es usualmente cercano a $f_0 \cong 0.1$ es dependiente de cargas bajas F_n y de la resistencia al corte, no obstante es completamente independiente de las combinaciones de los materiales.

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

En *el estado II*, se produce el máximo valor del coeficiente de fricción ($f_{MAX} \cong 0,3$ a $1,0$ mayormente entre metales). El cual se alcanza cuando ocurre la máxima adhesión interfacial, deformación de las asperezas y partículas de desgaste atrapadas.

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

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

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

2.4.2. Curva maestra desgaste-tiempo

Consiste de tres estados de desgaste, como se muestra en la Figura 2-2:

Estado I, Precede a un periodo de incubación de no desgaste llamado también periodo de rodamiento inicial, durante el estado I, la probabilidad de ocurrencia de los eventos de desgaste elementales decrecerá sí a través de los cambios en la topografía superficial, la tasa de interacción entre las asperezas con la superficie de desgaste decrece.

En el caso más simple de esa auto-acomodación del tribosistema, la cantidad de volumen de desgaste viene dado por una función raíz cuadrada del tiempo:

$$\frac{dW}{dt} \cong \frac{1}{W} \Rightarrow W_{(t)} = \text{Constante} * t^{1/2}$$

Ec. 2-2

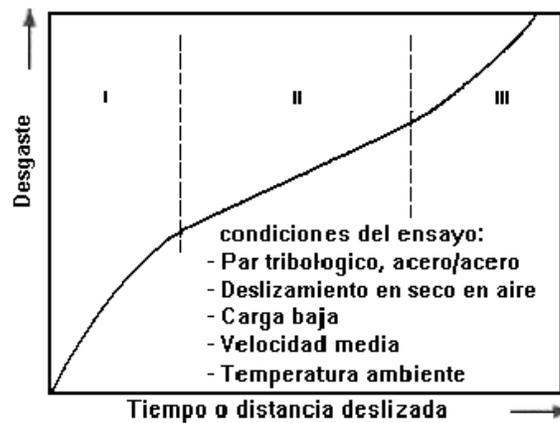


Figura 2-2. Curva maestra desgaste-tiempo

En el estado II, el tribosistema exhibirá un relativo comportamiento lineal en función del tiempo, estable bajo la acción del proceso tribológico. Para aplicaciones de ingeniería el valor de la tasa específica de desgaste tolerable debería estar en el rango de T.D.E < 1E-06 mm³/N.m.

$$\frac{dW}{dt} \cong \text{Constante} \Rightarrow W_{(t)} = \text{Constante} * t$$

Ec. 2-3

En el estado III, Una aceleración del desgaste ocurrirá mediante una acumulación de procesos de desgaste elementales. Un gran incremento en un

intervalo de tiempo causa también un gran incremento en el siguiente intervalo de tiempo.

$$\frac{dW}{dt} \cong W \Rightarrow W_{(t)} \cong e^{Constante*t}$$

Ec. 2-4

En ese caso una auto-aceleración del proceso de desgaste ocurre, lo que conlleva a un daño catastrófico, falla y en consecuencia el sistema colapsa.

2.5. CLASIFICACIÓN DEL DESGASTE

La clasificación más simple de interacciones entre superficies que envuelven una u otra es, el desgaste suave y el desgaste severo. Esta clasificación no está basada realmente en algún valor numérico en particular de la tasa de desgaste. Las diferencias observadas más generales entre los dos regímenes de desgaste suave y desgaste severo entre una gran variedad de sistemas metálicos de deslizamiento son resumidas en la Tabla 2-1.

El punto de inicio común es hasta ahora la ecuación de desgaste de Archard, la cual asevera que la tasa de desgaste TD, es directamente proporcional a la carga F_n en el contacto e inversamente proporcional a la dureza de la superficie D del material menos duro, por lo cual:

$$TD = \frac{k \cdot F_n}{D}$$

Ec. 2-5

Tabla 2-1. Diferencia de desgaste suave a severo

Desgaste suave	Desgaste severo
Resultan superficies muy lisas.	Resultan superficies rugosas. Marcas de superficies profundas más rugosas que la original.
Debris (escombros) muy pequeños, generalmente sólo 100 nm de diámetros.	Debris (escombros) metálicos más largos típicamente por encima de 0,01 mm de diámetro.
Resistencias eléctricas de contacto alta, contacto metálico real pequeño.	Resistencia eléctrica de contacto baja. Se forman juntas metálicas.

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

La tasa de desgaste en la práctica puede anticiparse a la Tabla 2-2 (Archard, J.F y Hirst, W. 1956), la cual provee una indicación de los valores observados del coeficiente de desgaste k para un número de pares tribológicos con deslizamiento en seco, el cual es el caso de esta investigación.

Tabla 2-2. Valores de coeficientes de desgaste k con deslizamiento en seco

Material	K
Acero (acero)	7.0E-03
Latón	6.0E-04
PTEF	2.5E-05
Aleación Cobre-Berilio	3.7E-05
Acero endurecido para herramientas	1.3E-04
Acero perlitico inoxidable	1.7E-05
Polietileno	1.3E-07

El valor numérico de k es siempre menor que la unidad, generalmente un tanto más pequeño. Segundo el rango de los valores para los coeficientes de fricción cae entre 0,18 y 0,80.

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

2.6. MECANISMO DE DESGASTE

Según la ASM, los tipos de desgaste pueden ser clasificados en: desgaste adhesivo, abrasivo, corrosivo, erosivo y desgaste por fatiga superficial.

Otros autores (Brostow, 1979) clasifican los mecanismos de desgaste de manera diferente, la diferencia principal radica en el hecho de considerar el desgaste oxidativo como un mecanismo aislado al desgaste corrosivo, además de no tomar en cuenta el desgaste erosivo como un mecanismo de desgaste principal; mientras que

Shaw (Hartley, 1980) y Burwel (Jastrzebski, 1959) consideran cuatro tipos de desgaste principal: adhesivo, abrasivo, corrosivo y por fatiga superficial.

2.6.1. Desgaste Adhesivo

El desgaste adhesivo comienza cuando asperezas o puntos elevados muy pequeños en superficies móviles hacen contacto entre ellos, generando calor de fricción hasta que uno de los puntos elevados se adhiere al otro y se separa de la superficie original. Así, la superficie que gana material aumenta su rugosidad con el agravante de que cuando el movimiento continúa, (Figura 2-3) se genera desgaste abrasivo contra la otra superficie.

Piezas de maquinaria donde está normalmente involucrado el desgaste adhesivo, son: Sistemas, biela-seguidor, dados de extrusión-alambre, cola de milano-apoyo, engranajes, rodamiento-apoyo y herramientas de corte, son elementos que pueden sufrir desgaste debido a adhesión.

La unión entre las superficies en contacto son destruidas, en caso que la resistencia al corte de la interface sea menor que la resistencia de los dos materiales considerados. Puede suceder que la región adherida tenga mayor resistencia al corte que alguno de los dos materiales o incluso que los dos, por tanto se puede presentar desgarre en uno, o en los dos materiales, permitiendo que uno de ellos sea adherido a la otra superficie del otro o que los dos materiales pierdan la interface.

La tendencia a formar regiones adheridas, depende de las propiedades físicas y químicas de los materiales en contacto, al igual que de los valores de carga aplicados y las propiedades de los materiales que están sobre las superficies, y finalmente de la rugosidad. Generalmente el contacto entre metales es no metálico debido a la presencia de capas absorbidas como óxidos. La adhesión en este caso se da por medio de enlaces débiles o fuerzas de Van der Waals.

Condiciones que hacen posible el desgaste adhesivo:

- Problemas de piezas y montaje: encaje interferencia, superficies rugosas, maquinado inapropiado.
- Problemas de lubricación: bajo nivel de lubricante, lubricante inadecuado, lubricante degradado, lubricante demasiado caliente o demasiado frío, conductos de lubricación mal perforado o atorados.
- Velocidad excesiva.
- Cargas excesivas.

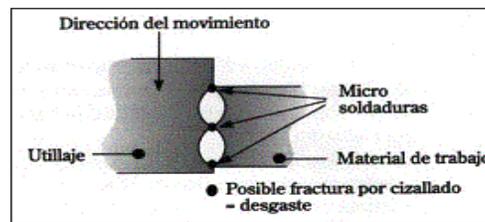


Figura 2-3. Esquema del Desgaste Adhesivo

Fuente: Austenit Sociedad Anónima

2.6.2. Desgaste Abrasivo

El desgaste por abrasión, que es el más común en la industria, se define como la acción de corte de un material duro y agudo a través de la superficie de un material más suave. Tiende a formar ralladuras profundas cuando las partículas duras penetran en la superficie, ocasionando deformación plástica y/o arrancando virutas (Figura 2-4).

Existen básicamente dos tipos de desgaste abrasivo, estos son: desgaste abrasivo de dos cuerpos o de tres cuerpos. En abrasión de dos cuerpos, el desgaste es causado por rugosidades duras pertenecientes a una de las superficies en contacto, mientras que la abrasión a tres cuerpos, el desgaste es provocado por partículas duras sueltas entre las superficies que se encuentran en movimiento relativo. Como ejemplo

de desgaste abrasivo a dos cuerpos, se tiene un taladro penetrando una roca, mientras que a tres cuerpos se puede citar el desgaste sufrido por las mandíbulas de una trituradora al quebrar la roca, o por la presencia de partículas contaminantes en un aceite que sirve para lubricar de los superficies en contacto deslizante.

En este tipo de desgaste no sólo hay material removido sino que hay una gran cantidad de material deformado plásticamente. Las partículas abrasivas pueden ser inclusiones de una superficie o bien partículas sueltas. En general la resistencia a la abrasión aumenta con la dureza.

Factores del desgaste: Montaje incorrecto, Mala alineación, Pieza doblada, Distorsión.

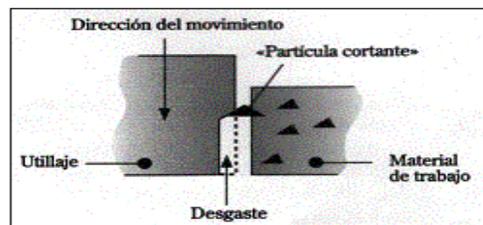


Figura 2-4. Esquema del Desgaste Abrasivo

Fuente: Austenit Sociedad Anónima

2.6.3. Desgaste Corrosivo

El desgaste corrosivo ocurre en una combinación de desgaste (abrasiva o adhesiva) y de un ambiente corrosivo. El índice de la pérdida material puede ser muy alto debido a que los productos sueltos o flojos de la corrosión se desprenden fácilmente por el desgaste y se revela continuamente el metal fresco y que alternadamente puede volverse a corroer rápidamente.

El modelo de desgaste corrosivo se puede explicar de la siguiente manera:

1. Formación de una película de óxido en la superficie. Esta película de óxido puede operar como lubricante, en la mayoría de los materiales no es posible ya que dicha película es muy frágil.
2. Al ser esta capa de óxido frágil queda expuesta a los fenómenos de deslizamiento del sistema, siendo esta removida.

El desgaste corrosivo por varios autores no lo consideran un mecanismo sino que es un colaborador de los otros.

2.6.4. Desgaste por Fatiga Superficial

Este desgaste se observa durante el deslizamiento repetido o rodamiento sobre una pista. Las partículas suspendidas entre dos superficies sometidas a una carga cíclica pueden causar fracturas superficiales que, eventualmente debido a la carga repetida conllevan a la destrucción de la superficie.

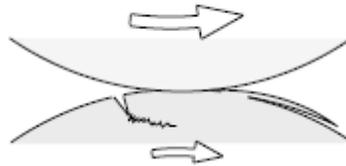


Figura 2-5. Esquema del Desgaste por Fatiga Superficial.

Las superficies de alta dureza y buen acabado superficial, libres de ralladuras, fisuras, y otras imperfecciones reducen considerablemente (Figura 2-5) el desgaste por fatiga superficial.

2.6.5. Desgaste por Erosión

El desgaste por erosión ocurre cuando partículas en movimiento en un fluido chocan con las superficies que lo rodean. La erosión tiene generalmente el aspecto de pequeños hoyos lisos. El ataque puede exhibir un patrón direccional relacionado con

la trayectoria tomada por el corroyente, al igual que por movimientos sobre la superficie del metal.

La erosión en la cual el movimiento relativo es casi paralelo a la superficie erosionada es llamada erosión abrasiva, mientras que la erosión en la cual el movimiento relativo es casi normal a la superficie erosionada es llamada erosión por choque. La erosión prospera en condiciones de alta velocidad de manera frecuente, aparece en bombas, mezcladores y tuberías, particularmente en curvas y codos.

2.6.6. Desgaste Microoscilatorio (Fretting)

Esta forma de deterioro se caracteriza por la pérdida de material de superficies en contacto, bajo la acción de una carga y de movimiento deslizante de amplitud muy pequeña.

Normalmente la apariencia de la superficie es rojiza-marrón (ladrillo) ó gris, con presencia de partículas oxidadas. El desgaste micro-oscilatorio conduce eventualmente a fallas por fatiga y se produce en uniones atornilladas, piezas ajustadas por calado, contactos eléctricos, etc.

Los factores más importantes que influyen en el desgaste micro-oscilatorio son:

- El aumento de la amplitud del movimiento conduce a otros tipos de desgaste y permite la introducción de lubricantes durante el funcionamiento.
- El aumento de la frecuencia de la oscilación hace disminuir el desgaste y se cree que ello tiene relación con factores químicos.
- Por lo general este tipo de desgaste aumenta con el número de ciclos de funcionamiento.

- La carga normal hace variar el desgaste micro-oscilatorio de manera impredecible.
- Disminuciones de la carga normal producen reducción de la amortiguación de las vibraciones y esto ocasiona mayor desgaste.
- Aumentos de la carga normal reducen las vibraciones, pero aumentan el área de contacto y a su vez el desgaste.
- No obstante lo antes expuesto, en general, los aumentos de la Carga Normal hacen aumentar este tipo de desgaste.
- La temperatura ambiental también tiene un efecto diverso, aunque más consistente. A temperaturas muy bajas (- 150 °C) se ha detectado el mayor deterioro y se ha observado que a medida que la temperatura aumenta hasta cero grados centígrados, el desgaste micro-oscilatorio disminuye gradualmente. Con aumentos de temperatura hasta 50 °C, el daño superficial disminuye apreciablemente y por encima de 70 °C comienza de nuevo a aumentar este tipo de desgaste.
- Humedades relativas entre 0 y 50 % reducen el desgaste para la mayoría de los metales. Por encima de 50 %, parejas acero-acero presentan aumentos en la velocidad de desgaste, mientras que la combinación acero-cromo se comporta de mejor manera con decrementos en las velocidades de desgaste.
- Lubricantes sólidos son la mejor opción para este tipo de aplicación; siendo el Bisulfuro de Molibdeno (MoS₂) el de mejores resultados.
- Las atmósferas inertes ó con bajas concentraciones de oxígeno previenen la oxidación de las superficies en contacto y reducen esta forma de desgaste.

Un buen acabado superficial es una buena opción para superficies sometidas a deslizamientos micro-oscilatorios, pero rugosidades muy pequeñas (menores de $0,05\mu\text{m}=50\text{nm}$ c.l.a.) pueden impedir la penetración del lubricante y

harían aumentar el "fretting", la Tabla 2-3 presenta en porcentaje de la importancia del desgaste a nivel industrial.

Tabla 2-3. Clasificación del desgaste en la Industria

Tipo de desgaste	Importancia en la Industria
Abrasión	50%
Adhesión	15%
Erosión	8%
Microoscilatorio Fretting	8%
Químico (Corrosión)	5%

2.7. TEORÍA SOBRE EL DESGASTE

2.7.1. Teoría de adhesión

La teoría adhesiva de la fricción de Tabor en 1973, la cual dio origen a una teoría general del desgaste por adhesión, se basa en que las superficies, aun teniendo el mejor acabado posible y siendo en escala macroscópica en apariencia lisas, en realidad presentan una microtopografía irregular de asperezas en forma de crestas y valles. Cuando dos superficies se colocan una junto a otra bajo la acción de una carga, el contacto solo se produce en las crestas de las asperezas y el área real que soporta la carga es, por esto, mucho más pequeña que el área aparente de contacto.

En las minúsculas regiones donde los dos cuerpos se unen íntimamente, si las dos superficies están limpias, los átomos de ambas se atraen mutuamente y se produce una fuerte adhesión. En el caso que existan contaminantes superficiales tales como óxidos, la adhesión se vería disminuida, pero existiría de todos modos, a causa de las altas presiones que se generan debido al área tan pequeña que soporta la carga.

Estas altas presiones romperían las capas contaminantes y permitirían el contacto directo entre ambas superficies.

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

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

Al producirse el deslizamiento esas zonas pueden ser sometidas a endurecimiento por deformación y el corte puede ocurrir en el material de menor dureza. Esto ocasionaría que se transfieran fragmentos de material de una superficie a la otra; pudiendo estos permanecer por un tiempo relativamente largo en la nueva superficie o viajar repetidamente entre ambas. Mecanismos, como la fatiga y/o la abrasión, serían los responsables del desprendimiento de los fragmentos y de su salida del sistema.

Un mecanismo alternativo propuesto por Archard, J.F., en 1953, es llamado comúnmente Teoría Adhesiva del Desgaste. Este mecanismo se basa en la probabilidad de que en cada encuentro entre las asperezas se produzca una partícula de desgaste. Estas partículas serían de forma hemisférica y de radio igual al de la región de contacto, la cual asumió circular.

La teoría establece que:

$$V.D = \frac{k.F_n.d}{3.D}$$

Ec. 2-6

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

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

2.7.2. Teoría de la delaminación

En 1973, Nam P. Suh lanzó una ampliación y generalización de la teoría de Bowden y Tabor, bajo la designación de teoría de la delaminación. Se lograron así valores teóricos coincidentes con la práctica, explicando fenómenos de desgaste excluidos de las teorías anteriores.

Nah Suh analiza en profundidad:

- La generación y transmisión de fuerzas entre superficies en contacto.
- El comportamiento del material superficial y sub-superficial, en respuesta a las fuerzas externas actuando sobre los puntos en contacto de las superficies.
- El efecto del ambiente que rodea las superficies, sobre sus características, debido a interacción fisicoquímica.

Esta teoría postula que en el contacto entre dos superficies se transmiten fuerzas normales y tangenciales a través de los puntos de contacto. Las asperezas de la superficie menos dura son fácilmente deformadas y fracturadas por los repetidos ciclos de carga, mientras que las asperezas de la otra superficie también son fracturadas, pero a velocidades menores. Como resultado de este proceso se genera inicialmente una superficie relativamente lisa, en la cual la fuerza tangencial ejercida en los puntos de contacto induce deformaciones plásticas superficiales y sub-superficiales.

Estas deformaciones aumentan con cada ciclo de carga y se van acumulando progresivamente. A medida que la deformación sub-superficial progresa se van nucleando grietas a cierta distancia por debajo de la superficie, fuera de la influencia del estado triaxial de esfuerzos de compresión que existe en las cercanías de la región de contacto. (Este estado de esfuerzos no permite la formación de grietas). Una vez que se nuclean las grietas las deformaciones subsecuentes causan su propagación y la unión de grietas vecinas. El crecimiento de las grietas tiende a ser paralelo a la superficie, a profundidades que estarían en función de las propiedades del material y del estado de esfuerzos a que está sometido en esa región. Cuando las grietas alcanzan la superficie se produce el desprendimiento del material, en forma de láminas largas y delgadas.

La teoría de la delaminación involucra los siguientes pasos:

- Fuerzas normales y tangenciales son primeramente transmitidas a través de los contactos de las asperezas, las cuales se deforman alisando la superficie.
- Ocurre deformación plástica en las capas superficiales.
- Se forman grietas paralelas bajo las capas superficiales.

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

2.7.3. Teorías relacionadas con fatiga

Esta teoría de Kragelskii de 1981 y sus colaboradores resalta tres periodos en los procesos de desgaste: la etapa de rodaje, la de estado estable y el desgaste severo.

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

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

De esta manera, cada porción del material blando es sometida a deformaciones repetidas de signo contrario; ocasionando cambios físicos y químicos en él, e induciendo el desprendimiento de partículas por un mecanismo de fatiga. Se considera así al desgaste como un proceso acumulativo, lo cual sería la única

explicación posible al hecho que materiales duros puedan ser desgastados por materiales blandos (caso de pérdida de filo en herramientas).

2.7.4. Teoría del desgaste oxidativo

Quinn, T. et al (1980-1985), quienes explican el régimen de desgaste suave en términos de eventos relacionados con la oxidación de las superficies. El régimen citado sería consecuencia de un balance entre la remoción de las películas superficiales oxidadas y la generación de nuevas capas de óxido, debido a la difusión de oxígeno y/o iones metálicos, a las altas temperaturas que normalmente se alcanzan en las áreas reales de contacto. El desgaste suave siempre sería precedido por un periodo inicial de desgaste severo, conocido como "rodaje", el cual es un proceso transitorio, probablemente con altas deformaciones plásticas en las áreas reales de contacto. El desgaste oxidativo ó corrosivo comenzaría una vez que la capa de óxidos alcance un espesor crítico, más allá del cual se hace mecánicamente inestable. En sus trabajos, los autores citados demuestran que es posible describir las tasas de desgaste suave matemáticamente, en función de las variables operacionales y de las constantes oxidacionales apropiadas. Según ellos, las tasas de desgaste son proporcionales a la carga mientras el tipo de óxido no cambie. Los cambios bruscos de temperatura superficial, por otra parte, irían acompañados de variaciones súbitas de la tasa de desgaste.

El número de asperezas en contacto sería linealmente dependiente de la carga para un rango de velocidad de oxidación determinado y el radio de cada contacto inter-asperidad sería aproximadamente constante para cada combinación de materiales.

Los regímenes de desgaste suave y severo son relacionados por Quinn, mediante los conceptos de desgaste oxidativo y desgaste por delaminación, respectivamente.

2.7.5. Teoría del deterioro cíclico

Este mecanismo de desgaste propuesto por Blau, P.J. (1981), sugiere un proceso de deterioro cíclico superficial, el cual contempla cuatro etapas para la formación de partículas de desgaste. La teoría contempla cuatro etapas para la formación de partículas de desgaste. Inicialmente se produce deformación plástica, lo cual origina una capa altamente deformada.

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

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

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

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

2.8. EFECTOS DE LAS VARIABLES MÁS IMPORTANTES

2.8.1. Carga Normal

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

2.8.2. Distancia deslizada o tiempo

El desgaste aumenta con el tiempo de funcionamiento (Tabor, D. 1977) en casi todos los casos conocidos. En algunas ocasiones se transfieren fragmentos de material de una superficie a otra sin pérdida de peso neta. En otros casos puede ocurrir un apilamiento del material desgastado; ocasionando separación de las superficies (Hirst, W. 1967-1968). Bajo esta condición, si el desgaste es medido basándose en el desplazamiento relativo de los cuerpos, puede ser detectado un desgaste aparentemente negativo. Este efecto podría presentarse debido a elevación de temperatura en el periodo inicial de funcionamiento. Podría suceder, que se eleve la temperatura de tal manera, que se vería compensado el desgaste producido en el proceso por medio de la dilatación de los cuerpos debida a las altísimas temperaturas, por tanto se debe dejar que se establezca la temperatura para después medir el desgaste real.

Archard, J.F. por otra parte, en 1953 había observado una relación lineal del volumen desgastado con el tiempo y en 1957, Welsh, N.C. encontró un comportamiento citado luego por otros autores, donde se observa la relación lineal desgaste-tiempo, pero se diferencian dos patrones característicos. En el desgaste severo, la Tasa de Desgaste comienza siendo alta y permanece constante a lo largo del ensayo (Figura 2-6).

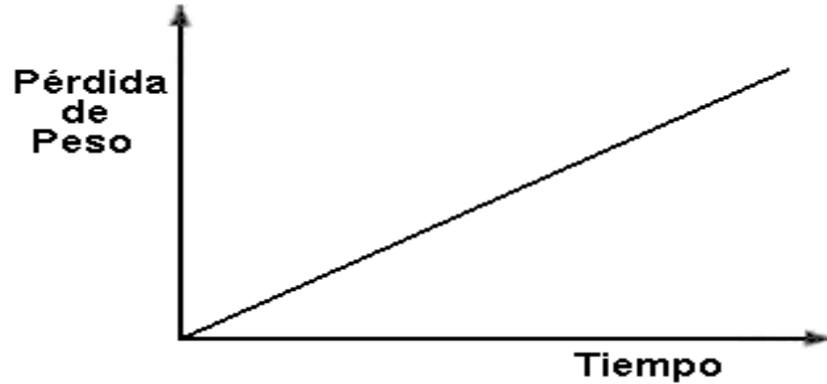


Figura 2-6. Patrón característico de desgaste de aceros (Desgaste severo)

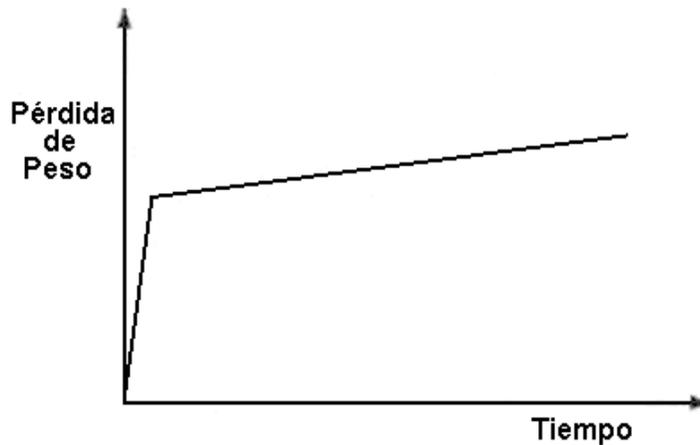


Figura 2-7. Patrón característico de desgaste de aceros (Desgaste suave)

La tasa de desgaste para el régimen suave también es elevada en el período inicial, disminuye significativamente, después de un corto intervalo y se mantiene estable durante un tiempo prácticamente indefinido, observar la (Figura 2-7).

2.8.3. Velocidad de deslizamiento

Si el movimiento es traslación rectilínea, entonces la velocidad no puede ser modificada en el diseño; mientras que cuando el movimiento es rotacional, aumentos o disminuciones de diámetro, implican mayores o menores velocidades de deslizamiento. La velocidad es una variable que puede ser modificada, dentro de ciertos límites, cuando el movimiento es rotacional. Sin embargo los cambios de diámetro conllevan variaciones de área y de presión aparente de contacto.

Según Kragelskii, I.V. (1981), el efecto de la velocidad está relacionado con la tenacidad de los materiales sometidos a desgaste, ya que esa variable determina el tiempo de existencia de un enlace friccional y en consecuencia, la tasa de deformación del material. Una transición de desgaste severo a suave con el aumento de la velocidad, particularmente para acero de 0,64 % de carbono a bajas durezas.

En 1965, Welsh, N.C (1965) reportó la existencia de las cargas de transición, las cuales tienden a disminuir con los aumentos de velocidad. Para (T1), su disminución se debería al menor tiempo disponible para la regeneración de los óxidos superficiales. El decremento de T2 sería consecuencia de menores temperaturas que las necesarias para las transformaciones de fase; causa principal del cambio de desgaste severo a suave.

2.9. ROCIADO TÉRMICO

Los procesos de rociado térmico presentan gran versatilidad en la deposición de recubrimientos, siendo los mismos usados para protección de componentes contra desgaste abrasivo, adhesivo, erosivo, fatiga superficial y corrosión, además de funcionar como barrera térmica. El rociado térmico es un nombre dado a un grupo de procesos usados para la deposición de revestimientos metálicos o no metálicos en varios tipos de sustratos que incluyen desde aceros hasta plásticos. El material de revestimiento puede estar en forma de polvo, barra, cordón o alambre.

Para la deposición de los recubrimientos se utilizan pistolas, que generan la cantidad de calor necesaria para fundir el material y acelerarlo hacia el sustrato por medio de gas comprimido, luego las partículas chocan contra la superficie formando capas delgadas que se conforman y adhieren a las irregularidades de la superficie. En la Figura 2-8 se presenta un esquema de la estructura característica de un recubrimiento por rociado térmico típicamente conformado por el sustrato, partículas fundidas, partículas no fundidas, óxidos y poros.

La microestructura y propiedades del recubrimiento dependen del proceso de solidificación y sinterización de las partículas. El criterio básico en el proceso de rociado térmico es que las partículas rociadas estén completamente fundidas, cosa que no sucede del todo en la práctica, como consecuencia partículas en estado semifundido y sin fundir se presentan en la estructura del recubrimiento, generándose defectos. Los recubrimientos depositados por rociado térmicos tienden a presentar cierta porosidad debida a celdillas de aire atrapadas en la estructura del recubrimiento. Un recubrimiento que presente fallas en el proceso de proyección puede presentar varios problemas en su microestructura como: defectos de adherencia, defectos de coherencia, grietas dentro de las láminas y poros.

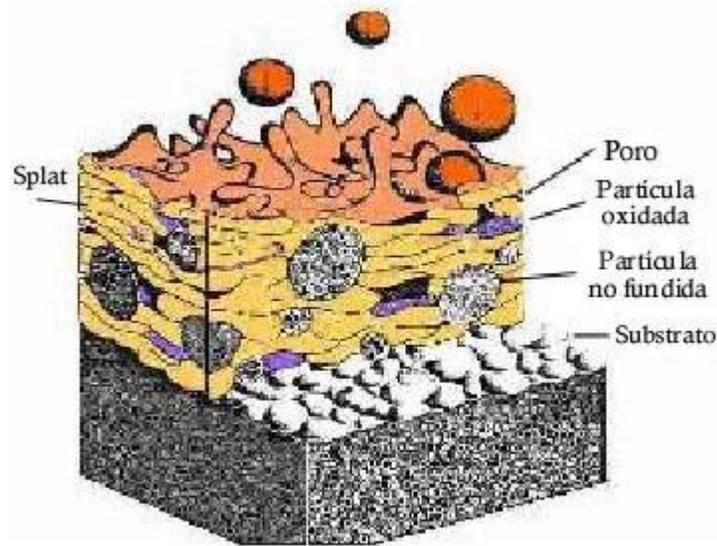


Figura 2-8. Representación Esquemática de la Formación del Recubrimiento en los Procesos de Rociado Térmico.

La porosidad presente en el recubrimiento, la cual puede variar desde un mínimo de 1% hasta un 20% (Conde y Dávila 2007). Dependiendo de las condiciones de rociado, también pueden aparecer partículas no fundidas que por alguna razón no alcanzaron la temperatura de fusión y fueron incorporadas al recubrimiento (Figura 2-8). Estas partículas generalmente interrumpen la continuidad del mismo y disminuyen su fuerza cohesiva. En el caso contrario, cuando la energía térmica durante el proceso de rociado es muy alta, las partículas del material a ser depositado, pueden llegar a evaporarse antes de impactar en el sustrato.

2.9.1. Aplicación del rociado térmico

Los recubrimientos rociados térmicamente comprenden el uso para la restauración dimensional de piezas desgastadas, barreras térmicas, conductores térmicos, protección electromagnética, etc. Estos recubrimientos son esencialmente usados por muchas industrias, incluyendo la aeroespacial, agraria, automotriz, industrias primarias de metales, minería, refinerías, químicas y biomédicas.

Algunos materiales son capaces de efectuar una unión altamente adhesiva, aún en substratos lisos o hasta pulidos. Esos materiales son llamados capas de base de unión y pueden ser aplicados solos o como una fina capa de base (entre 80 y 200 μ m) para otros materiales de revestimiento externo.

2.9.2. Algunos beneficios de los recubrimientos rociado térmicamente:

- Mecánicos: aumento de solicitudes mecánicas.
- Térmicos: desarrollo de nuevas aleaciones metálicas y no metálicas.
- Necesidad de aumentar la vida útil de partes y piezas, generar economía.
- Tendencia de efectuar recubrimiento a piezas antes de entrar en servicio, recubrir nuevamente después del desgaste.
- Resistencia al desgaste, erosión y adhesión.
- Resistencia a la corrosión atmosférica y soluciones químicas.
- Resistencia a altas temperaturas.
- Resistencia a los metales fundidos.
- Resistencia a la cavitación.
- Barreras térmicas.
- Rugosidad controlada para tracción optima.
- Anti-adherencia para fácil limpieza.
- Control de tolerancias.
- Conductividad eléctrica.

2.9.3. Limitaciones

El rociado térmico tiene una serie de limitaciones desde el punto de vista de capacidad de soportar carga puntual, impacto o comportarse como barrera protectora con la corrosión. Tanto los recubrimientos y equipos utilizados son costosos, por ello,

se debe de tener en cuenta estas limitaciones y las diferencias inherentes de cada proceso de rociado térmico para obtener recubrimientos adecuados para cada aplicación.

2.9.4. Aspectos fundamentales a considerar en los métodos de deposición por rociado térmico.

Los procesos de rociado térmico difieren básicamente en tres aspectos fundamentales:

1. Material de alimentación
2. Método de calentamiento aplicado
3. Método de proyección del material sobre el sustrato.

El material de alimentación puede ser incorporado al proceso en forma de polvo (por medio de una tolva), alambre y barra cerámica (mediante el uso de rodillos). En la (Figura 2-9), Se muestran los pasos para llevar a cabo un proceso de rociado térmico.



Figura 2-9. Pasos elementales en un proceso de rociado térmico

El calentamiento del material consiste en la preparación del mismo para ser proyectado a través de una corriente de gas a alta presión. El sistema que se utiliza para generar la energía necesaria se obtiene de la energía térmica de un proceso de combustión o un arco eléctrico capaz de semi-fundir las partículas del material a ser

rociado. El calentamiento debe ser homogéneo por ser un factor que determina las propiedades del recubrimiento.

Tanto la proyección, como el impacto de las partículas sobre el sustrato determinan las características finales del recubrimiento, además para obtener un recubrimiento aceptable en cuanto a calidad, se debe controlar la formación de poros e inclusiones de óxidos.

De acuerdo a la velocidad que adquieran las gotas semi-fundidas del material a ser rociado, el proceso puede ser clasificado como supersónico (se alcanzan velocidades mayores a la velocidad del sonido), o subsónico (velocidades menores a la velocidad del sonido).

2.10. TIPOS DE PROCESOS DE ROCIADO TÉRMICO

2.10.1. Procesos de rociado térmico por combustión:

Este grupo se refiere a los procesos de rociado térmico en los que el material de alimentación es calentado en una cámara de combustión a la cual convergen una serie de inyectores con la finalidad de proporcionar combustible y oxígeno, estos se dividen según la velocidad que alcanza la partícula del recubrimiento en el momento de ser proyectada sobre el sustrato.

- Rociado térmico por llama.
- Rociado térmico por detonación.
- Rociado térmico en frío.
- Rociado térmico hipersónico.

2.10.1.1. Rociado térmico por llama

En este proceso la velocidad de la partícula es inferior a la velocidad del sonido lo que lleva a este proceso a ser el más simple y versátil de todos. La ventaja principal es la de poder procesar fácilmente el material de alimentación en forma de polvo, lo cual ofrece una opción en la producción de capas de distintos materiales con bajo costo (Figura 2-10).

En el proceso de rociado térmico por llama se funde el material (polvo o alambre) a través de la descarga de energía química como resultado de un proceso de combustión. El proceso de combustión consiste en quemar un gas combustible (a veces líquido) en presencia de oxígeno (o aire comprimido). El gas combustible usado comúnmente para el rociado térmico por llama, es el acetileno debido a su alta temperatura de combustión (3100 °C). Otros gases combustibles como el propano, hidrógeno o gas natural también se usan. El aire comprimido se usa de ayuda en la proyección de las partículas. Si la oxidación de las partículas proyectadas es un problema, gas inerte comprimido como argón o nitrógeno son usados para proteger las partículas fundidas.

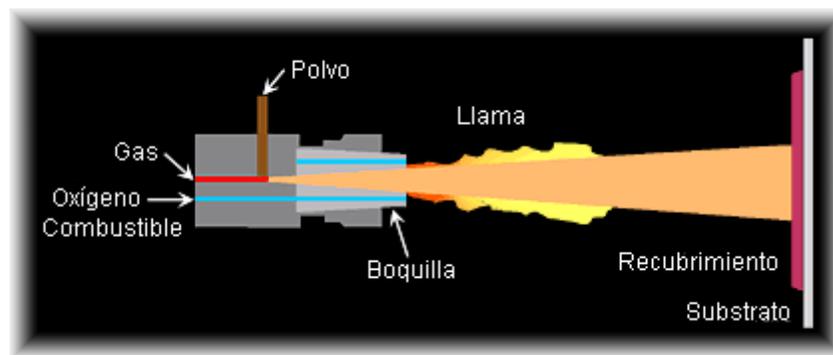


Figura 2-10. Esquema de rociado por llama

2.10.1.2. Rociado térmico por detonación

Es quizá el proceso más complejo operacionalmente. Una mezcla de materiales de gas combustible, oxígeno y material de depósito en polvo convergen en la cámara de la pistola para que al ser inyectada la presión se produzca una fuerte detonación cerrada. La onda de choque resultante acelera las partículas a más de 731 m/seg (2400 ft /seg) y produce temperaturas superiores a los 4000°C (7232°F). El proceso es cíclico y puede repetirse 4 u 8 veces por segundo, con intervalos donde se aplica refrigerante nitrógeno. Cada detonación deposita una densa capa de material adherente de varios micrones de espesor y alrededor de 2,54 centímetros (1 pulg.) de diámetro. La detonación produce una amplia contaminación auditiva. El equipo genera ruido en exceso, superior a 150 decibeles (dB) por lo que dicho ruido debe ser extraído acústicamente.

2.10.1.3. Rociado térmico hipersónico

A comienzos de la década de 1980 el ingeniero Browning Witfi eld, utilizando la tecnología de los motores de cohetes, presentó un novedoso método de aspersión de metal en polvo. El procedimiento se denominó HVOF (Figura 2-11), como un acrónimo del término en inglés, y utiliza una combinación de oxígeno con diversos gases combustibles incluido el hidrógeno, propano, propileno de hidrógeno e incluso el queroseno. Gracias a la alta fuerza cinética que se obtiene por la explosión súbita del gas, las micropartículas se desplazan a velocidades superiores de mach 1 (340,3 m/s, 1.225,08 km/h—velocidad del sonido), logrando temperaturas de 2300°C aproximadamente (4172°F). Utiliza materiales ferrosos, compuestos cerámicos y polímeros.

La extrema velocidad que adquiere el recubrimiento entrega inmejorables resultados, la porosidad de la capa es menor al 2 por ciento.

La desventaja de la HVOF se concentra en la alta pérdida del depósito por la evaporación de las partículas y su dispersión en el aire. Por ello los procesos de control están siendo encaminados a disminuir dichos factores aplicando la técnica en un medio sin oxígeno atmosférico, es decir al vacío.

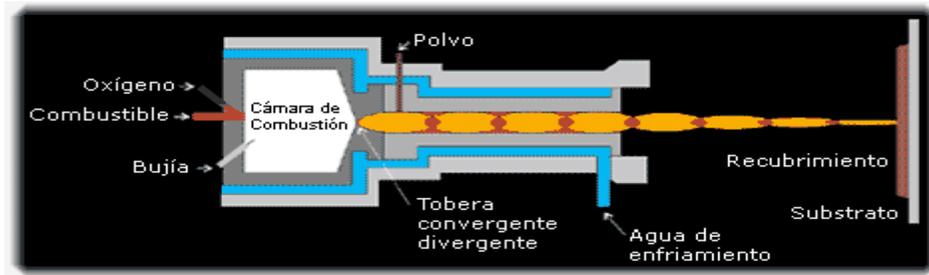


Figura 2-11. Esquema de rociado hipersónico

2.11. PROCESOS DE ROCIADO TÉRMICO POR ENERGÍA ELÉCTRICA:

2.11.1. Proceso térmico por arco eléctrico

Los recubrimientos o capas que se logran a través de este proceso son normalmente más densos y de una mejor calidad en comparación con procesos equivalentes por combustión, este proceso es eficaz e idóneo, tanto como para la proyección de recubrimientos en áreas de grandes dimensiones como para alta productividad.

El proceso de rociado térmico por arco (Figura 2-12) utiliza un par de alambres eléctricamente conductores (electrodos) que se funden a través de un arco eléctrico. Los alambres se alimentan en forma continua y automáticamente a un punto enfrente de una nariz atomizadora.

Una diferencia de potencial de 15 a 50 voltios es aplicada, formándose un arco eléctrico, fundiéndose el alambre a temperaturas superiores a los 5000 °K; el calor que se genera funde las puntas de los alambres y el material semifundido es atomizado y propulsado por una corriente o chorro de aire comprimido o gas inerte

impactando al sustrato a grandes velocidades, solidificándose rápidamente y formando la capa del recubrimiento.

El gas atomizado normalmente es aire comprimido pero también puede hacerse con aleaciones rociados se oxidan produciendo una gran cantidad de óxidos metálicos en la capa rociada. Debido a esto, la capa es más dura y más difícil de maquinar que una capa de material original.

La temperatura del arco mayormente excede las temperaturas de fusión de los materiales rociados, dando como resultado partículas súper calientes, es decir, que la temperatura de las partículas son sumamente altas, y pueden en algunos casos producir interacciones metalúrgicas localizadas o zonas de difusión.

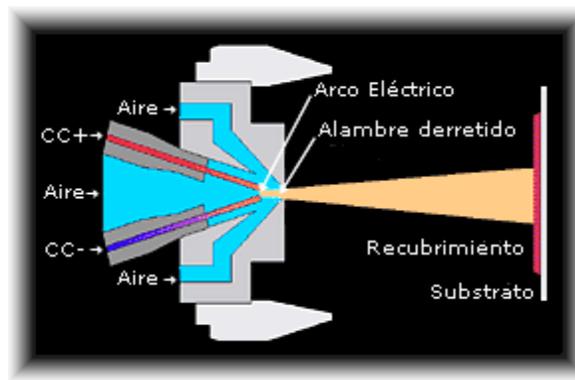


Figura 2-12. Esquema rociado térmico por arco eléctrico

2.11.2. Rociado térmico por plasma

Este tipo de proceso ofrece una gran flexibilidad en cuanto a parámetros de control, versatilidad, resistencia a la corrosión de sus recubrimientos, por ataque químico, y además, pueden recubrirse materiales con punto de fusión muy altos.

El rociado térmico por plasma, es un proceso que utiliza un arco eléctrico de corriente continua (DC) para generar un flujo de plasma gaseoso parcialmente

ionizado a muy altas temperaturas que actúa como la fuente de calor para el proceso de rociado, Conde y Dávila (2007).

A medida que el plasma inestable vuelve a su estado gaseoso original, se libera gran cantidad de energía térmica, alcanzándose temperaturas de entre 5000 y 8000 °C según Burns y Bradley (1967). Es allí donde se inyecta el material de alimentación (en forma de polvo) a la cámara de gas, donde se funde y se proyecta a altas velocidades y temperaturas, a través del pequeño orificio en el extremo de la pistola, para formar un chorro de gas caliente. A pesar de las altas temperaturas que se alcanzan dentro de la cámara de plasma, el sustrato o superficie a recubrir sólo eleva su temperatura hasta unos 200 °C ver (Figura 2-13), generando así recubrimientos de calidad mediante la combinación de altas temperaturas, un medio de rociado relativamente inerte y altas velocidades de partícula, sin embargo en comparación con el proceso de rociado por HVOF, este proceso genera recubrimientos de menor calidad.

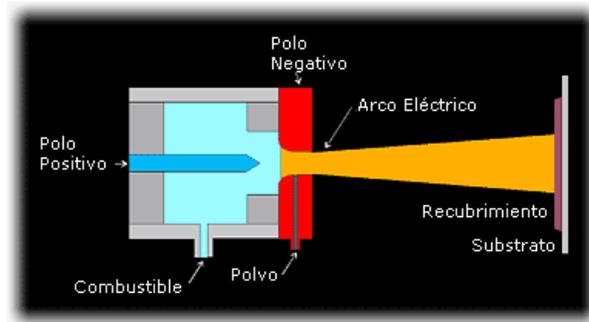


Figura 2-13. Esquema rociado térmico por plasma

2.12. SISTEMA MIG (METAL INERTE GAS)

Este sistema está definido por la AWS como un proceso de soldadura al arco, donde la fusión se produce por calentamiento con un arco entre un electrodo de metal de aporte continuo y la pieza, donde la protección del arco se obtiene de un gas

suministrado en forma externa, el cual protege de la contaminación atmosférica y ayuda a estabilizar el arco.

El proceso MIG está definido como un proceso de soldadura, donde la fusión, se produce debido Al arco eléctrico, que se forma entre un electrodo (alambre continuo) y la pieza a soldar. La protección se obtiene a través de un gas, que es suministrado en forma externa.

A continuación podemos observar los elementos más importantes que intervienen en el proceso:

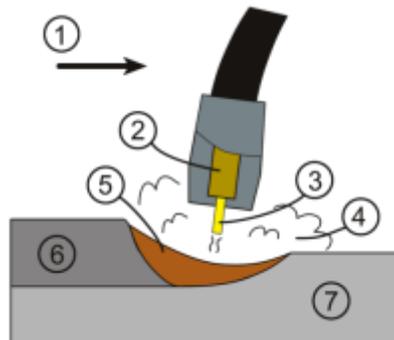


Figura 2-14. Proceso MIG. 1. Dirección de la soldadura 2. Tubo de contacto 3. Hilo 4. Gas protector 5. Soldadura 6 y 7. Piezas a unir.

El proceso puede ser:

2.12.1. Semi automático

La tensión de arco (voltaje), velocidad de alimentación de alambre, intensidad de corriente (amperaje) y flujo de gas se regulan previamente. El arrastre de la pistola de soldadura se realiza manualmente.

2.12.2. Automático

Todos los parámetros, incluso la velocidad de soldadura, se regulan previamente, y se aplican en forma automática.

2.12.3. Robotizado

Este proceso de soldadura, se puede robotizar a escala industrial. En este caso, todos los parámetros y las coordenadas de localización de la unión a soldar; se programan mediante una unidad específica para este fin. La soldadura la realiza un robot al ejecutar la programación.

2.13. CONDICIONES OPERACIONALES

El comportamiento del arco, el tipo de transferencia del metal a través del mismo, la penetración, forma del cordón, etc., están condicionados por una serie de parámetros entre los que se destacan:

2.13.1. Polaridad

Afecta al tipo de transferencia, penetración, velocidad de fusión del alambre, etc. Normalmente, se trabaja con polaridad inversa (DC+).

2.13.2. Tensión de arco (Voltaje)

Este parámetro puede regularse a voluntad desde la máquina soldadora y resulta determinante, en el tipo de transferencia.

2.13.3. Velocidad de alimentación del alambre

En este proceso no se regula previamente, la intensidad de corriente (amperaje), sino que ésta, por el fenómeno de autorregulación, resulta de la velocidad impuesta al alambre.

2.13.4. Naturaleza del metal base

Presenta una notable influencia, sobre el tipo de transferencia del metal, penetración, aspecto del cordón, proyecciones, etc.

2.13.5. La porosidad

Dentro de los efectos típicos a saber, se encuentra la porosidad. Esta se debe en general, a deficiente protección gaseosa (exceso y/o insuficiencia) durante la operación de soldadura. El gas tiene por misión proteger el electrodo de alambre en fase de fusión y el baño de soldadura, delo acceso de aire.

2.13.6. Rodillos de arrastre inadecuados

Los rodillos de arrastre son elementos de la unidad de alimentación de alambre. El caso más simple del sistema es aquel que lleva un solo rodillo de arrastre y otro de apoyo presionado por un resorte regable contra el primero.

2.14. EQUIPO PARA LA SOLDADURA MIG

2.14.1. Generador de soldadura

Los generadores más adecuados para la soldadura por el procedimiento MIG son los rectificadores y los convertidores (aparatos de corriente continua). La corriente continua con polaridad inversa mejora la fusión del hilo, aumenta el poder de penetración, presenta una excelente acción de limpieza y es la que permite obtener mejores resultados.

En la soldadura MIG, el calor se genera por la circulación de corriente a través del arco, que se establece entre el extremo del hilo electrodo y la pieza. La tensión del arco varía con la longitud del mismo. Para conseguir una soldadura uniforme, tanto la tensión como la longitud del arco deben permanecer constantes.

2.14.2. Esquemático del equipo MIG:

1. Una maquina soldadura.
2. Un alimentador que controla el avance del alambre a la velocidad requerida.
3. Una pistola de soldar para dirigir el alambre al área de soldadura.
4. Un gas protector para evitar la contaminación del baño de fusión.
5. Un carrete de alambre del tipo y diámetro especificado.

2.14.3. Beneficios del sistema MIG

1. No genera escoria.
2. Alta velocidad de deposición.
3. Alta eficiencia de deposición.
4. Fácil de usar.
5. Rapidez de deposición.
6. Alto rendimiento

2.15. DISEÑO EXPERIMENTAL FACTORIAL

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

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

En el modelo básico de un diseño experimental factorial (X^Y), la base (X) es un número entero ≥ 2 que representa los niveles o valores que toman las variables, y el exponente (Y) es un número entero o fraccionario, en algunos casos, también ≥ 2 que significa el número de variables a evaluar. Cada ensayo involucra un mínimo de 3 replicas para garantizar significancia estadística. Así, un diseño 2^3 involucra 3 variables en 2 niveles cada una, lo que equivale a 12 ensayos y 4 condiciones de prueba. Un diseño 3^2 , por su parte, es el equivalente a 2 variables con 3 niveles de prueba cada una, lo que serían 27 ensayos y 9 condiciones de prueba. Los diseños

más comunes son los que involucran menos corridas ó ensayos, como 2^3 , 2^2 y 3^2 e incluso 3^3 . Para un mayor número de variables y niveles de prueba, el número de corridas hace que el estudio sea significativamente prohibitivo en términos de tiempo y costos.

2.16. ANÁLISIS DE VARIANZA ANOVA

Es un método estadístico utilizado para determinar la similitud o diferencias entre dos o más grupos de datos. Si disponemos de medidas cuantitativas continuas, que se puede suponer como procedentes de una distribución de probabilidad normal, y queremos comparar dos grupos (dos tratamientos), la prueba estadística que se utiliza es un contraste de medias basado en la t de Student, y cuando se dispone de más de dos grupos, la prueba a emplear es el análisis de la varianza ANOVA.

Se descompone la variabilidad total de los datos de dos fuentes de variación: la debida a los grupos de datos y la debida a la presencia dentro de cada grupo de datos. Matemáticamente, la suma de cuadrados total, SST, puede descomponerse como el total de dos sumas de cuadrados:

$$SS_T = SS_R + SS_E$$

Ec. 2-7

La suma de cuadrados debido a la regresión, SSR, mide la variación entre los resultados individuales y la media de cada grupo de resultados, siendo su formula la descrita por la siguiente ecuación:

$$SS_R = \sum_{U=1}^N (\hat{Y}_U - \bar{Y})^2$$

Ec. 2-8

Siendo \hat{Y}_U el valor observado en la u-ésima corrida.

SSE, o suma de cuadrados residual, mide las desviaciones entre la media de cada grupo de datos y el resultado medio global.

$$SS_E = \sum_{U=1}^N (Y_U - \bar{Y}_U)^2$$

Ec. 2-9

Los análisis de varianza se expresan en tablas que permiten resumir los datos obtenidos y las distintas varianzas calculadas como se muestra a continuación.

Tabla 2-4. Resumen de Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Varianza
Residuo	SS _E	N-k	SS _E /(N-k)
Regresión	SS _R	k-1	SS _R /(k-1)
Total	SS _T	N-1	SS _T /(N-1)

La varianza de residuo se conoce como MSW, o Mean Square Within, y viene dada por el cociente entre SSR y los correspondientes grados de libertad, donde k es el número de grupos de valores y N el número total de muestras. La varianza de regresión se denomina MSB, o Mean Square Between.

Como se asume antes de generar un análisis de varianza que: a) Cada conjunto de datos es independiente del resto y b) Los resultados para cada conjunto deben seguir una distribución normal, la ecuación de regresión ajustada se prueba usando el valor F como valor estadístico de prueba, el cual corresponde a la relación entre las medias de cuadrados:

$$F = \frac{MS_E}{MS_I}$$

Ec. 2-10

Este valor se compara, usando una distribución normal de probabilidades con un criterio de dos colas y en intervalo de confianza predefinido, lo que permite aceptar o rechazar la hipótesis si el valor obtenido está fuera ó dentro de los límites de la distribución.

2.17. MÉTODO DE SUPERFICIE DE RESPUESTA

La Metodología de Superficies de Respuesta (RSM) es un conjunto de técnicas matemáticas utilizadas en el tratamiento de problemas en los que una respuesta de interés está influida por varios factores de carácter cuantitativo. El propósito inicial de estas técnicas es diseñar un experimento que proporcione valores razonables de la variable respuesta y, a continuación, determinar el modelo matemático que mejor se ajusta a los datos obtenidos. El objetivo final es establecer los valores de los factores que optimizan el valor de la variable respuesta.

El valor real esperado, η , que toma la variable de interés considerada está influido por los niveles de k factores cuantitativos, X_1, X_2, \dots, X_k , esto significa que existe alguna función de X_1, X_2, \dots, X_k (que se supone continua en $X_i, \forall i = 1, \dots, k$) que proporciona el correspondiente valor de η para alguna combinación dada de niveles:

$$\eta = f(X_1, X_2, \dots, X_k)$$

de tal forma que la variable respuesta puede expresarse como:

$$Y = \eta + \varepsilon = f(X_1, X_2, \dots, X_k) + \varepsilon$$

Ec. 2-11

Donde ε es el error observado en la respuesta.

La relación $\eta = f(X_1, X_2, \dots, X_k)$ existente entre η y los niveles de los k factores puede representarse a través de una hipersuperficie (subconjunto de un espacio euclídeo $(k+1)$ -dimensional) a la que llamaremos superficie de respuesta.

Una superficie de respuesta tridimensional consiste en representar la gráfica de contornos de la superficie, en la que se trazan las denominadas líneas de contorno, que son curvas correspondientes a valores constantes de la respuesta sobre el plano X_1X_2 (plano cuyos ejes coordenados vienen dados por los niveles X_1 y X_2 de los factores). Geométricamente, cada línea de contorno es una proyección sobre el plano X_1X_2 de una sección de la superficie de respuesta al intersecar con un plano paralelo al X_1X_2 . La gráfica de contornos resulta útil para estudiar los niveles de los factores en los que se da un cambio en la forma o altura de la superficie de respuesta.

La existencia de gráficas de contorno no está limitada a 3 dimensiones a pesar de que en el caso en que haya más de 3 factores de influencia no es posible la representación geométrica. No obstante, el hecho de poder representar gráficas de contorno para problemas en que haya 2 o 3 factores permite visualizar más fácilmente la situación general.

Terminología utilizada:

Factores: Son las condiciones del proceso que influyen la variable de respuesta. Estos pueden ser cuantitativos o cualitativos.

Respuesta: Es una cantidad medible cuyo valor se ve afectado al cambiar los niveles de los factores. El interés principal es optimizar dicho valor.

Función de respuesta: Al decir que un valor de respuesta Y depende de los niveles x_1, x_2, \dots, x_k de k factores, $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k$, estamos diciendo que existe una función matemática de x_1, x_2, \dots, x_k cuyo valor para una combinación dada de los niveles de los factores corresponde a Y , esto es $Y = f(x_1, x_2, \dots, x_k)$.

Función de respuesta predicha: La función de respuesta se puede representar con una ecuación polinomial. El éxito en una investigación de una superficie de respuesta depende de que la respuesta se pueda ajustar a un polinomio de primer o segundo grado. Supongamos que la función de respuesta para los niveles de dos factores se puede expresar utilizando un polinomio de primer grado:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 \cdot x_2$$

Ec. 2-12

Donde β_0, β_1 y β_2 son los coeficientes de regresión a estimar, además x_1 y x_2 representan los niveles de ξ_1 y ξ_2 respectivamente. Suponiendo que se recolectan $N \geq 3$ valores de respuesta (Y), con los estimadores b_0, b_1 y b_2 se obtienen β_0, β_1 y β_2 respectivamente. Al remplazar los coeficientes de regresión por sus estimadores obtenemos:

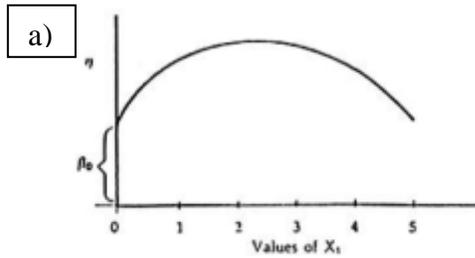
$$\hat{Y} = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2$$

Ec. 2-13

\hat{Y} Representa el valor estimado de Y dado por x_1 y x_2 .

Superficie de respuesta: La relación $Y = f(x_1, x_2, \dots, x_k)$ entre Y y los niveles de los k factores $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k$ representa una superficie. Con k factores la superficie está en $k+1$ dimensiones. Por ejemplo cuando se tiene $Y = f(x_1)$ la superficie esta en dos dimensiones como se muestra en la Figura 2-15a, mientras que si tenemos

$Y=f(x_1, x_2)$ la superficie está en tres dimensiones, esto se observa en la Figura 2-15b.



Superficie de respuesta en dos dimensiones.

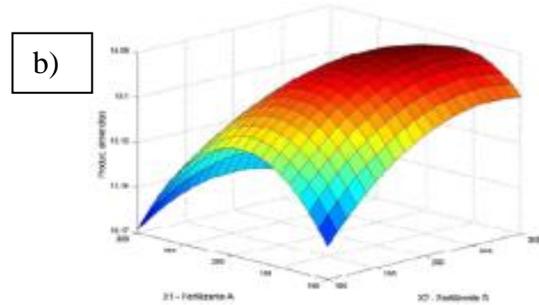


Fig 1.1.- Superficie de respuesta tridimensional en la que se observa la producción esperada de almendras (Y) en función de las cantidades de fertilizante A (X₁) y fertilizante B (X₂) utilizadas.

Figura 2-15. Superficie de Respuesta

Gráfica de contornos: La gráfica de contornos facilita la visualización de la forma de una superficie de respuesta en tres dimensiones. En ésta las curvas de los valores iguales de respuesta se grafican en un plano donde los ejes coordenados representan los niveles de los factores. Cada curva representa un valor específico de la altura de la superficie, es decir un valor específico de \hat{Y} . Esto se muestra en la Figura 2-16. La gráfica contenida en esta figura nos ayuda a enfocar nuestra atención en los niveles de los factores a los cuales ocurre un cambio en la altura de la superficie.

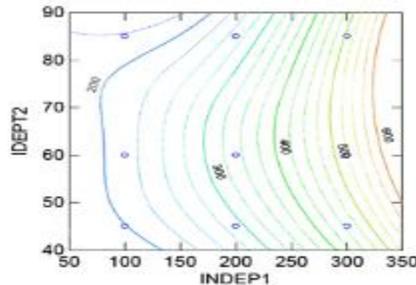


Figura 2-16. Gráfica de contornos

Polinomios de Primer y Segundo Orden: Generalmente se desconoce la relación entre la respuesta y las variables independientes, por ello requerimos un modelo que aproxime la relación funcional entre Y y las variables independientes. Este modelo provee las bases para un nuevo experimento que nos lleva hacia un nuevo modelo y el ciclo se repite. Si la respuesta se describe adecuadamente por una función lineal de las variables independientes se utiliza el modelo de primer orden.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \epsilon$$

Ec. 2-14

Los parámetros del modelo se estiman mediante el método de mínimos cuadrados, y evaluando la significancia de la curvatura con el análisis de varianza, se decide si para el ajuste de la respuesta basta un polinomio de primer orden:

$$\hat{Y} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_k x_k$$

Ec. 2-15

O, por el contrario, un ajuste de segundo orden:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j}^k \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon$$

Ec. 2-16

Suponiendo que se desea maximizar la respuesta, el máximo (si es que existe), será el conjunto x_1, x_2, \dots, x_k tal que las derivadas parciales:

$$\frac{\partial \hat{y}}{\partial x_1} = \frac{\partial \hat{y}}{\partial x_2} = \dots = \frac{\partial \hat{y}}{\partial x_k} = 0$$

Ec. 2-17

2.18. ESFUERZOS DE CONTACTO

Cuando dos cuerpos con superficies curvas se presionan entre sí, el contacto puntual o lineal cambia a un área de contacto, y los esfuerzos que se desarrollan en los dos cuerpos son tridimensionales. Los problemas del esfuerzo de contacto se originan en el contacto de una rueda y un riel, en el árbol de levas y los balancines, en los dientes de engranes acoplados y en la acción de los cojinetes de bolas. Las fallas usuales se ven como grietas, picaduras, o desconchando en la superficie del material.

Los casos más comunes y que se consideran en esta investigación son los de esferas y cilindros en contacto. Los resultados que se presentan fueron obtenidos por Hertz y por tanto, con frecuencia se les conoce como esfuerzos hertzianos.

2.18.1. Esfuerzo de contacto de superficies esféricas:

Cuando dos esferas solidas con diámetros d_1 y d_2 se presionan con una fuerza F , se obtiene un área circular con un radio a .

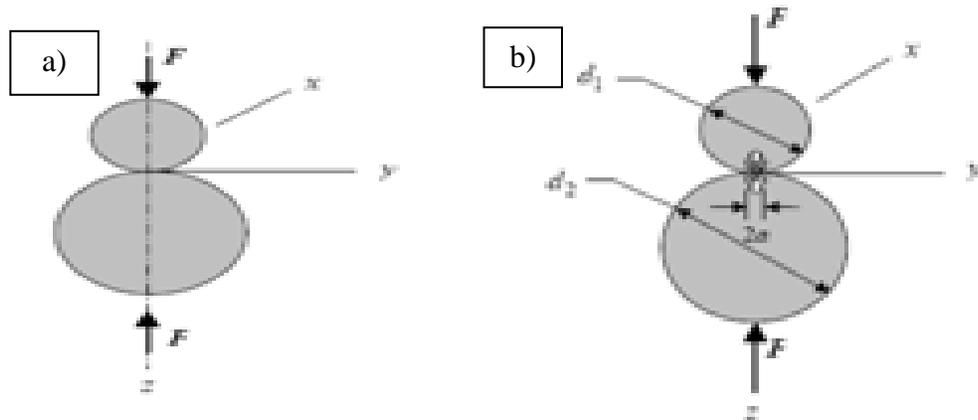


Figura 2-17. a) Contacto entre superficies curvas, figura. b) distribución de presión. Fuente: Joseph E Shigley 6ta edición.

Si se designa E_1, ν_1, E_2, ν_2 como las constantes elásticas respectivas de las dos esferas, el radio a está dado por la ecuación:

$$a = \sqrt[3]{\frac{3F}{8} \frac{\frac{1-\nu_1}{E_1} + \frac{1-\nu_2}{E_2}}{\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2}}}$$

Ec. 2-18

La presión dentro de cada esfera tiene una distribución semi-elíptica, la presión máxima ocurre en el centro del área del contacto y corresponde a:

$$P_{max} = \frac{3F}{2\pi a^2}$$

Ec. 2-19

Las ecuaciones anteriores son perfectamente generales y también se aplican para el contacto de una esfera y una superficie plana, o entre una esfera y una superficie esférica interna. Para una superficie, se usa $d = \infty$. Para una superficie interna, el diámetro se expresa como una cantidad negativa.

2.18.2. Esfuerzo de Contacto en superficies cilíndricas

Cuando los elementos de contacto son dos cilindros de longitud l y diámetros d_1 y d_2 . El área de contacto es un rectángulo angosto de ancho $2b$ y longitud l , y la distribución de la presión es elíptica.

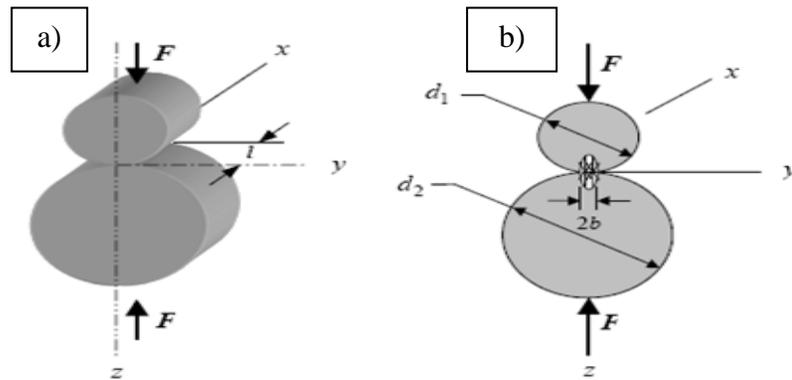


Figura 2-18. a) contacto de superficies cilíndricas b) distribución de presión.
Fuente: Joseph Shigley 6ta edición.

El semiancho b está dado por la Ec. 2-20:

$$b = \sqrt{\frac{2F \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2}}{\pi l \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)}}$$

Ec. 2-20

La presión máxima corresponde a $P_{max} = \frac{2F}{\pi b l}$

Las ecuaciones anteriores se aplican a un cilindro y una superficie plana, como un riel, haciendo $d=\infty$ para la superficie plana. Las ecuaciones también se aplican en el contacto de un cilindro y una superficie cilíndrica interna; en este caso d se hace negativo.

CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO

3.1. INVESTIGACIÓN

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

3.1.1. Investigación Documental

Recopilación de material escrito, documentos, trabajos anteriores relacionados con la investigación, que son la base de los procedimientos que se realizan y los experimentos que se aplican.

3.1.2. Investigación experimental

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

La investigación experimental constó de los siguientes pasos:

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

3.2. PROCEDIMIENTOS Y ACTIVIDADES.

1. Realización a través de libros, documentos, manuales, publicaciones en internet, la revisión bibliográfica de todo lo referente a recubrimientos molibdeno níquel, el proceso de rociado térmico por plasma, ensayo de desgaste en arreglo bloque sobre anillo, ensayos de abrasión, y diferentes tipos de desgaste, obteniendo así el sustento teórico de las actividades realizadas.
2. Selección de los parámetros para la deposición de los polvos de aleación molibdeno níquel para su proyección mediante la técnica de rociado térmico por plasma a las probetas.
3. Determinación del número de probetas para ensayo de abrasión y desgaste por deslizamiento
4. Compra del material, para las probetas y la arena para el ensayo de abrasión.
5. Fabricación de las probetas para el ensayo de desgaste por deslizamiento, desgaste por abrasión, todo esto siguiendo las normas respectivas para cada ensayo.
6. Vulcanizado de los discos de acero pertenecientes a la máquina de ensayos de abrasión.
7. Realización del proceso de granallado antes del depósito de los recubrimientos, para lograr que tengan una mejor adherencia con el sustrato.
8. Deposición del recubrimiento de molibdeno-níquel para los bloques, mientras la contra parte del par tribológico se depositó por soldadura con una aleación de Cobalto con los parámetros establecidos.
9. Realización de los ensayos de dureza y rugosidad.
10. Determinación de la densidad de los recubrimientos por el método de inmersión.
11. Realización de los tratamientos térmicos, el primero en horno de vacío y el segundo utilizando llama oxiacetilénica.
12. Realización de los ensayos de abrasión y desgaste por deslizamiento (arreglo bloque sobre anillo).

13. Evaluación de la microestructura a las diferentes probetas mediante Microscopía Electrónica de Barrido.
14. Análisis e interpretación de los resultados obtenidos en los diferentes ensayos realizados.
15. En función de los análisis obtenidos extraer las conclusiones correspondientes.

La Figura 2- contiene un diagrama de flujo del procedimiento experimental a seguir.

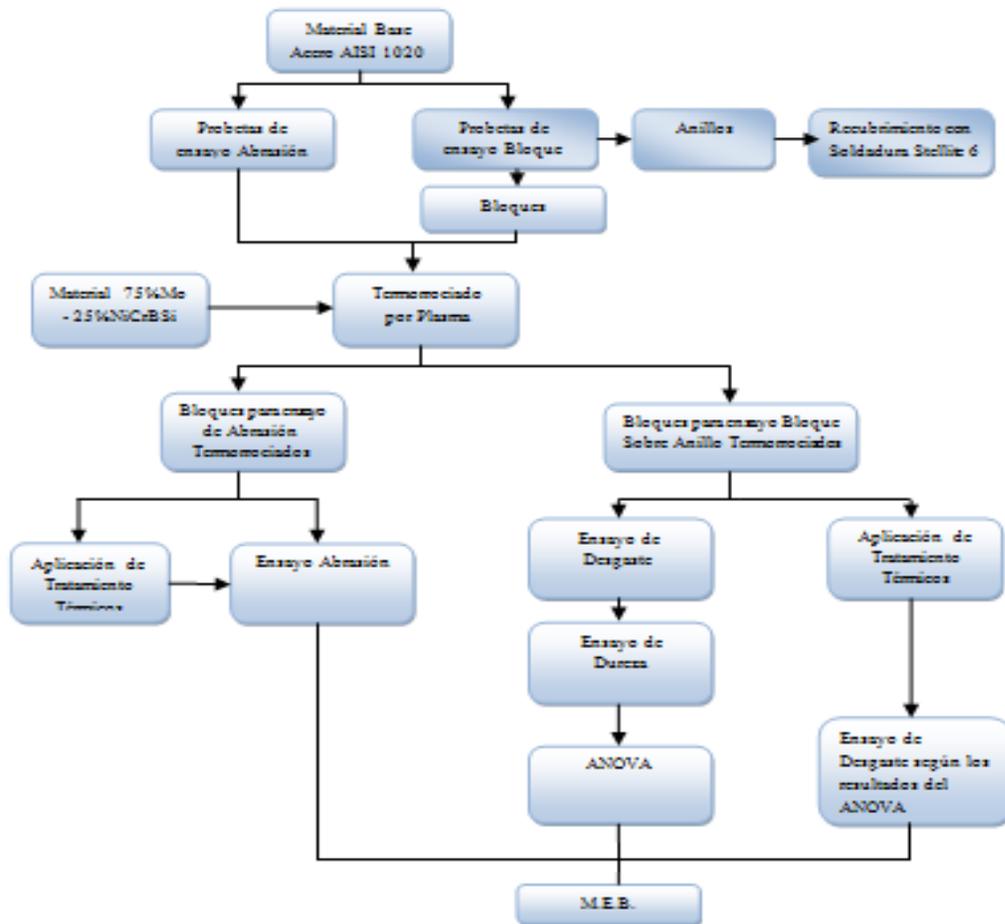


Figura 3-1. Diagrama de Flujo del Procedimiento Experimental

3.3. MATERIAL

El material a utilizar en este trabajo de investigación para la deposición de recubrimientos es una aleación base molibdeno-níquel cuya composición es 75%wt.Mo–25% wt.NiCr, generado por la mezcla mecánica de ambos polvos. Para los anillos se utilizó una aleación base cobalto (comercialmente conocida como Stellite 6) cuya composición química se y propiedades mecánicas se presentan en las Tabla 3-1 y Tabla 3-2, respectivamente.

Tabla 3-1. Composición Química (%) Stellite 6

Co	Cr	W	C	Otros	Rango de Fusión
Base	27-32		0.9-1.4	Ni, Fe, Si, Mn y Mo	1285-1410 °C

Tabla 3-2. Propiedades Mecánicas

Propiedades	Rangos
Dureza	380-490 HV
Resistencia a la tracción	130 Kpi (896 Mpa)
Límite de la fluencia	70 ksi (483 Mpa)
Elongación	5%

El sustrato seleccionado fue acero AISI 1020. Las propiedades mecánicas y composición química se muestran en las siguientes Tabla 3-3 y la Tabla 3-4.

Tabla 3-3. Composición Química del acero AISI 1020

% C	% Mn	% P	% S	% Si	% Cu	% Al	% Mo	% Ni	% Cr
0,26	9,99	0,04	0,05	0,4	0,2	0,999	0,005	0,15	0,15

Tabla 3-4. Propiedades Mecánicas del acero AISI 1020

Esfuerzo de Fluencia	Esfuerzo Ultimo a la Tracción
250 Mpa	400-550 Mpa

3.4. FABRICACIÓN DE LAS PROBETAS

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

Para la fabricación de los bloques para el ensayo de desgaste por deslizamiento se usó una pletina de acero AISI 1020 la cual fue cortada partiendo de las dimensiones originales de la pletina (25,4x6,35x762mm) de longitud hasta llevarlas a las dimensiones indicadas en la norma ASTM G77-98 (6,35x15,75x9,76mm) ver Figura 3-2.

En cuanto a los anillos se partió de un cilindro macizo (tocho) de acero AISI 1020 de 31,75mm de diámetro el cual fue recubierto con soldadura (en la empresa Plasmatec Ingenieros C.A) utilizando Stellite 6 como material de aporte y posterior rectificado hasta llevarlo al diámetro especificado en la norma (35mm).

El cilindro macizo se perforó en un torno con brocas de 10, 18, 22 y 25mm a todo lo largo de las barras de 15cm ya recubiertas. Debido a la dureza del material no fue posible cortar los anillos con inserto de carburo de tungsteno por lo que se debió

adaptar un disco abrasivo para realizar el corte en un torno. Se procedió a mecanizar el cono interno del anillo en un torno de control numérico y finalmente realizar los cortes con el disco abrasivo (ver Figura 3-2).

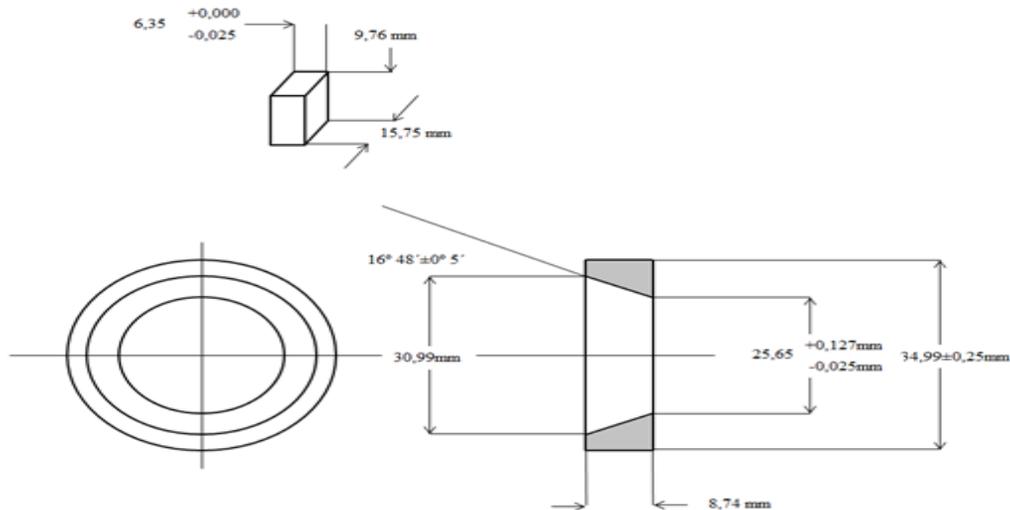


Figura 3-2. Dimensiones de la probeta (arriba) y del anillo (abajo) de ensayo Bloque sobre anillo.

La norma exige que la altura final de las probetas sea 10,16mm, teniendo en cuenta la altura que agregaría el recubrimiento luego de ser depositado en la probeta, se redimensionó la altura de la probeta restándole 0,4mm.

Para los bloques del ensayo de abrasión se usó una lámina de acero AISI 1020 la cual fue cortada según especifica la norma ASTM G65-00 (ver Figura 3-3) para que pueda ajustarse a las exigencias de la máquina para este tipo de ensayos.

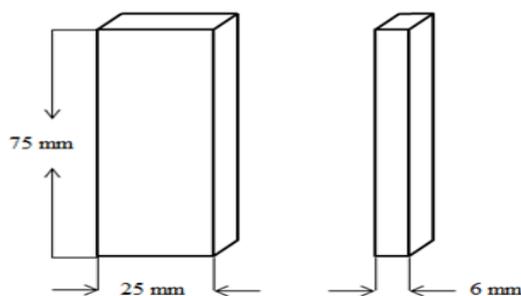


Figura 3-3. Dimensiones de la probeta de ensayo de abrasión.

3.5. DISTRIBUCIÓN DE LAS PROBETAS.

Se obtuvieron un total de 68 probetas, las cuales fueron distribuidas de la siguiente manera: 10 para ensayos de abrasión de las cuales 5 fueron para aplicación de tratamientos térmicos y 58 probetas para ensayos de desgaste por deslizamiento de las cuales se destinaron 10 probetas para los tratamientos térmicos posteriores. En la Tabla 3-5 se observa la distribución de las probetas.

Tabla 3-5. Distribución de las probetas

Ensayos	Mo-Ni	TT Vacío	TT Llama	Total
Deslizamiento	48	5	5	58
Abrasión	5	3	2	10

3.6. 3.6 DEPOSICIÓN DE LOS RECUBRIMIENTOS

3.6.1. Proceso de soldadura MIG

Para la realización de la soldadura se debe mantener un arco entre un electrodo de hilo sólido continuo y la pieza a soldar. Tanto el arco como el baño de soldadura se protegen mediante un gas inerte. El proceso de aplicación de soldadura

con deposición de material Stellite 6 se realizó en la empresa Plasmatec C.A. con los parámetros indicados en la Tabla 3-6. El equipo utilizado para la aplicación de la soldadura continua con arco protegido por argón fue un Micro Wire marca Termal ARC.

Previo a la deposición del material de aporte se preparó la superficie de los cilindros macizos (tochos) para lo cual se fijaron en un dispositivo de rotación y se ajustaron en los extremos. Luego fueron limpiados con un solvente industrial, para garantizar una superficie libre de grasas. Posteriormente se procedió a precalentar las muestras a una temperatura de aproximadamente 80°C por un tiempo de aproximadamente un minuto con la finalidad de eliminar la humedad y el solvente remanente en la superficie.

Una vez controlados los parámetros deseados, se inició la deposición del material de aporte (Stellite 6) sobre las muestras. La soldadura se aplica a intervalos regulares para evitar los dobleces de la pieza. Es decir, cada cierto tiempo (un minuto) o cada distancia de cordón depositado se deja reposar por espacio de 3 minutos para evitar que las altas temperaturas produzcan deflexiones en el cilindro macizo o tocho. Una vez se haya completado el proceso de soldadura la pieza se deja enfriar lentamente, para lo cual la misma se coloca en un recipiente con óxido de aluminio por espacio de 24 horas o hasta lograr que llegue a temperatura ambiente.

Tabla 3-6. Parámetros fijos del proceso de deposición

Temperatura de precalentamiento del sustrato (°C)	80-100
Presión del gas primario Argón (MPa)	0,5
Diámetro del alambre (mm)	1,2
Amperaje (A)	180-200
Voltaje (V)	20

3.6.2. Rociado Térmico por plasma

El rociado térmico por plasma se realizó utilizando los parámetros de deposición que cuales se presentan en la Tabla 3-7.

Tabla 3-7. Parámetros Fijos de Proceso de deposición

Temperatura de precalentamiento del sustrato (°C)	70-80
Distancia de rociado (mm)	80-100
Presión del gas primario Argón (MPa)	0,5
Presión del gas secundario Helio (MPa)	0,5
Tasa de alimentación (gr/min)	60
Amperaje (A)	800
Voltaje (V)	36

Antes de realizar el proceso de rociado las probetas fueron fijadas mediante puntos de soldadura a una pletina de acero (ver Figura 3-4), para evitar que se desprendieran durante el proceso.



Figura 3-4. Fijación de las probetas

Después de estar fijadas se limpiaron con un solvente industrial para asegurar una superficie libre de grasas luego se procedió a un precalentamiento de las muestras

a una temperatura de aproximadamente 70°C por un tiempo de aproximadamente un minuto. Este precalentamiento tiene como objetivo eliminar la humedad y el solvente remanente en la superficie a rociar (ver Figura 3-5).



Figura 3-5. Precalentamiento de las probetas

Posterior al precalentamiento se realizó el arenado (ver Figura 3-6), último paso de la preparación superficial de las probetas. Este procedimiento se llevó a cabo con un equipo de proyección de arena abrasiva (en este caso se trató de alúmina) la cual se impactó contra el sustrato con los parámetros indicados en la Tabla 3-8 hasta lograr la rugosidad requerida para lograr una buena adherencia substrato-recubrimiento.



Figura 3-6. Superficie de las probetas luego del arenado

Tabla 3-8. Parámetros del arenado

Tamaño del grano	0,3 mm - 1 mm
Presión del aire	0,3 MPa – 0,4 MPa
Distancia de rociado	150 mm - 180mm

Se utilizó el equipo de rociado térmico por plasma que consta de una pistola de plasma marca PRAXAIR modelo SG-200, la cual se muestra en la Figura 3-7.

Previamente a la deposición del recubrimiento, las probetas fueron precalentadas a una temperatura aproximada de 70 – 80 °C, utilizando la llama de la pistola de plasma.

**Figura 3-7. Pistola de plasma SG-200 (tomada del catalogo Praxair)**

Una vez controlados los parámetros deseados, se inició el rociado sobre las muestras ver Figura 3-8, controlando entre pasadas la temperatura y la uniformidad del espesor de la capa depositada usando un tornillo micrométrico mientras que la temperatura se realiza con un termómetro infrarrojo de radiación laser Marca Mannix Modelo IRT4 Figura 3-9.



Figura 3-8. Proceso de rociado térmico por plasma



Figura 3-9. Control de temperatura y espesor de las probetas en el rociado

3.7. RECTIFICADO

Luego de la deposición del material Stellite 6 por soldadura, se aplicó un proceso de rectificado utilizando una rectificadora universal con la finalidad de otorgarles el acabado superficial requerido, además de asegurar un espesor de recubrimiento que diera como resultado un diámetro según lo especificado en la norma ASTM G77-98 para los anillos. Así mismo los bloques rociados con la aleación Mo-Ni fueron rectificados para otorgar el acabado superficial requerido por la norma.

3.8. TRATAMIENTOS TÉRMICOS

Se realizaron dos tipos de tratamientos térmicos diferentes, con la finalidad de evaluar la influencia del tratamiento térmico posterior sobre las propiedades del recubrimiento Mo-Ni. El primero de ellos se realizó en un horno tubular marca Lindberg/Blue (ver Figura 3-10). Las muestras se colocan en el horno, luego se crea el vacío en la cámara de calentamiento a una presión de 660 mmHg. La tasa de calentamiento fue de 10°C por minuto hasta alcanzar la temperatura de 600 °C, luego se dejan por espacio de 30 minutos. Culminado este lapso las muestras se dejan enfriar dentro del horno hasta la temperatura ambiente lo cual ocurrió en tiempo aproximado de dos horas.



Figura 3-10. Horno tubular para tratamientos térmicos Marca Lindberg/Blue

El segundo tratamiento térmico fue realizado con una llama oxiacetilénica (ver Figura 3-11) la cual se aplica mediante un soplete sobre la superficie de las probetas hasta elevar su temperatura a 400°C en un tiempo de 5 minutos, medida con un pirómetro óptico, luego se deja enfriar al aire libre.

3.9. ENSAYO DE RUGOSIDAD

Las probetas de los ensayos de bloque sobre anillo y abrasión les fue aplica una prueba de rugosidad con un Rugosímetro ver Figura 3-12. Estas mediciones se realizaron con un Rugosímetro marca Mituyo modelo SJ-201.



Figura 3-11. Aplicación del tratamiento TT Llama



Figura 3-12. Rugosímetro

3.10. ENSAYO DE DUREZA

Previo al ensayo de microindentación Vickers las muestras fueron cortadas y preparadas metalográficamente hasta obtener una superficie especular. La carga aplicada para realizar las indentaciones fue de 300 gr durante un tiempo 15 segundos.

Se tomaron un número de 10 indentaciones por muestra realizando un barrido desde el recubrimiento hasta el sustrato.

3.11. CÁLCULO DE LA DENSIDAD

Dado que para determinar el volumen desgastado en los ensayos de abrasión se requiere la densidad de los recubrimientos la misma fue determinada mediante el método de inmersión. Para cada una de las condiciones en estudio, se dividió la masa del recubrimiento entre su volumen respectivo. Para obtener el valor de la masa

$$\rho_{rec} = \frac{m_{rec}}{v_{rec}}$$

Ec. 3-1

Se removi6 una peque1a cantidad de recubrimiento a cada muestra la cual fue pesada en una balanza anal6tica y posteriormente fue introducida en una jeringa con una apreciaci6n de 1mm³.

La variaci6n del volumen en la jeringa al introducir el recubrimiento constituye el volumen del mismo desplazado de acuerdo a la Ec 3-1.

$$V_{rec} = V_{final\ jeringa} - V_{inicial\ jeringa}$$

Ec. 3-2

3.12. ENSAYO DE ABRASI6N

Para realizar el ensayo de abrasi6n se us6 el equipo ubicado en el laboratorio de ensayos mec6nicos de la Escuela de Ingenier6a Mec6nica, el mismo fue dise1ado y construido en 1999 por los estudiantes Pinto Nicola y Rangel Aldrin bajo las normas ASTM G 65-00 (ver Figura 3-13). La m6quina consiste en una rueda de goma que gira bajo carga a 200 ± 10 rpm, la cual es impulsada por un motor reductor DC de 1

hp, mientras un flujo de arena abrasiva de partículas de cuarzo, cuyo tamaño es de 50 – 70 micras, en concordancia con lo establecido en la norma AFS, se hace pasar entre la probeta y la rueda. La rotación de la rueda es tal que su cara de contacto se mueve en la dirección del flujo de la arena.



Figura 3-13. Máquina de ensayos de abrasión

La arena de cuarzo debe poseer según la norma un contenido de humedad que no debe exceder el 0,5% de su peso. La tasa de flujo de arena fue de 300 a 400g/min como lo recomienda la norma. La rueda es un disco de acero AISI 1040 como base y en su periferia está recubierta por caucho de clorobutilo con 12,7mm de espesor. Esta rueda fue vulcanizada por la empresa Gomainca C.A. La composición química de la rueda se muestra en la Tabla III-9. Para medir la masa de cada una de las probetas antes y después del ensayo de abrasión se utiliza una balanza de precisión, mostrada en la (Figura 3-14) (apreciación de 0.0001g).



Figura 3-14. Balanza electrónica

Tabla III-9. Composición del recubrimiento de goma del disco abrasivo

Material	Proporción por peso
Clorobutilo N HT 10-66	100
Agerite Staylite	1
HAF Black	60
Circololight	5
Stearic Acid	1
Zinc Oxide	5
Ledate	2

Los diferentes parámetros para cada uno de los procedimientos de la prueba de Abrasión según la norma ASTM G-65 se encuentran en la Tabla 3-10. En este estudio se seleccionó el procedimiento A. Se realizaron mediciones de la pérdida de peso a los 30min a una carga de 130N, luego se determinó la pérdida total de peso.

Tabla 3-10. Procedimientos según la Norma ASTM G 65-00

Procedimiento	Fuerza contra la probeta	Pesos contra la probeta	Revoluciones de las ruedas	Tiempo de cada rueda	
	N	Lfb	(gr)	(rpm)	(min)
A	130	30	5.159	6000	30
B	130	30	5.159	2000	10
C	130	30	5.159	100	½
D	45	10.1	1.543	6000	30
E	130	30	5.159	1000	5

El procedimiento para la realización del ensayo de abrasión se encuentra en el manual de operación del equipo que establece una secuencia que se describe a continuación:

1. Limpieza a las probetas con alcohol en un equipo ultrasónico marca Buehler Ultramet II y con este se removió todas las impurezas que se encontraban en la superficie y luego se secaron con un secador de aire caliente.
2. Se pesaron las probetas en la balanza digital.
3. Se verificó que el disco estuviera girando a 200 r.p.m. con la ayuda de un tacómetro digital.
4. El temporizador de la máquina de ensayos fue colocado en el tiempo requerido.
5. La rata de flujo de arena de la maquina fue revisado con la intención de asegurar un rango de entre 300 a 400g/min.
6. Se colocaron las probetas en el soporte y se añadieron los pesos a la palanca para poder desarrollar la fuerza determinada en la norma para presionar la probeta contra la rueda.

7. Se comenzó la rotación de la rueda de caucho e inmediatamente se permitió el contacto entre la probeta y la rueda.
8. Al finalizar el tiempo de ensayo, se separó la probeta de la rueda y se detuvo el flujo de arena y la rotación de la rueda.
9. Se desmontó la probeta, se limpió ultrasónicamente de nuevo y se volvió a pesar en la misma balanza.

Los resultados del ensayo de abrasión son expresados en términos de pérdida volumétrica corregida de material. Tomando en cuenta el mejor material aquel que pierde menos volumen para las condiciones de carga y duración de los ensayos establecidos.

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

Cálculo de la pérdida de masa en la probeta:

$$\Delta m_{corr}[gr] = \frac{\Delta m[gr] \times \emptyset rueda[mm]}{Df rueda [mm]}$$

Ec. 3-3

Donde:

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

$\Delta m[gr]$ (masa inicial – masa final): Pérdida de masa medida en la muestra.

$\emptyset rueda[mm]$: Representa el diámetro inicial de la rueda de caucho.

$Df rueda [mm]$: Diámetro de la rueda caucho al final de la prueba de abrasión.

Cálculo de la pérdida de volumen:

$$\Delta V_{corr} [mm^3] = \frac{\Delta m_{corr} [gr]}{\rho \left[\frac{gr}{mm^3} \right]}$$

Ec. 3-4

Donde:

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

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

Todas estas correcciones son con la intención de que los resultados no se vean afectados por la variación del diámetro del disco de caucho, el cual, se va reduciendo debido al desgaste en cada uno de los ensayos.

3.13. ENSAYO DE DESGATE POR DESLIZAMIENTO POR ARREGLO BLOQUE SOBRE ANILLO.

Para estos ensayos se usó un equipo marca Falex (ubicado en el laboratorio de Lubricación y Desgaste, en la Escuela de Ingeniería Mecánica) con arreglo bloque sobre anillo en el cual el bloque contenía los recubrimientos en estudio y el anillo o contraparte el recubrimiento de Stellite 6.

Dado que en la literatura consultada no se obtuvo información de los valores de cargas y velocidad óptimos para el par tribológico seleccionado se utilizó un diseño experimental 4^2 donde las variables son carga y velocidad para el ensayo de desgaste por deslizamiento en arreglo bloque sobre anillo con el objetivo de buscar cambios de comportamiento del recubrimiento bajo las condiciones establecidas. Así

mismo se seleccionaron 4 niveles para cada una de las variables seleccionadas. Se obtuvieron un total de 16 condiciones.

Para la selección de la carga fueron realizadas pruebas preliminares con la intención de determinar la carga que arrojaría un ancho de huella comprendido entre 1 y 6mm sin que la profundidad de la huella llegue al substrato según lo estipulado en la norma ASTM G77-98. Los valores de carga seleccionados fueron: 44,6; 67; 89 y 112 Newton para la velocidad los valores fueron 0,15; 0,20; 0,25 y 0,30 m/s. La distancia de deslizamiento se fijó en 550m.

Los ensayos se realizan en un tribómetro para simulación de desgaste, en la configuración bloque sobre anillo. La interacción bloque-anillo se lleva a cabo en ausencia de lubricante.

Para el cálculo de la tasa de desgaste la norma establece las siguientes ecuaciones:

Calculo de la perdida de volumen:

$$\Delta V[mm^3] = \frac{\Delta m[gr]}{\rho \left[\frac{gr}{mm^3} \right]}$$

Ec. 3-5

Donde:

$\Delta V[mm^3]$: Corresponde a la perdida de volumen.

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

Calculo de la tasa de desgaste:

$$TD \left[\frac{mm^3}{m} \right] = \frac{\Delta V [mm^3]}{d[m]}$$

Ec. 3-6

Donde:

$TD \left[\frac{mm^3}{m} \right]$: Tasa de desgaste.

$d[m]$: Distancia deslizada.

3.14. DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE FRICCIÓN.

La fuerza resistencia que actúa sobre un cuerpo, que impide o retarda el deslizamiento de este respecto a otro o en la superficie que este en contacto. El bloque es cargado contra el anillo que rota a una velocidad dada. La fuerza requerida para mantener el bloque, es medida durante el ensayo, esta es la fuerza de fricción, permite obtener el coeficiente de fricción mediante la Ec. 3-7.

$$\mu = \frac{Fr}{F_N}$$

Ec. 3-7

Donde:

μ : Coeficiente de fricción.

Fr: Fuerza de roce o fricción.

F_N : Fuerza o carga normal.

3.15. MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (MEB)

La microestructura, superficie de desgaste y sección transversal de la misma fueron evaluadas mediante un microscopio electrónico de barrido marca Philips. Paralelamente se evaluó la composición elemental mediante un análisis químico semicuantitativo realizado por EDS acoplado al microscopio.

El microscopio utilizado fue un Philips modelo XL 30 (ver Figura 3-15) con un voltaje de aceleración de 20KV, con capacidad para ampliaciones de hasta 30000X y acoplado a un equipo de espectroscopia por dispersión de energía de rayos X. para cada muestra se tomaron imágenes a diferentes magnificaciones sobre una superficie previamente preparada metalográficamente, para el desbaste la superficie fue preparada utilizando papel abrasivo de SiC de granulometrías desde 80 hasta 1200 y para el pulido se utilizaron paños de lona y de fieltro, con polvo abrasivo de alúmina (Al_2O_3) de granulometrías de 1 y $0,3\mu\text{m}$ hasta quedar una superficie especular.



Figura 3-15. Microscopio Electrónico de Barrido

CAPÍTULO IV . ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. MICROESTRUCTURA Y COMPOSICIÓN QUÍMICA ELEMENTAL (EDS).

Con la finalidad de analizar la influencia de la microestructura sobre el comportamiento ante el desgaste abrasivo y por deslizamiento de los recubrimientos en estudio, los mismos fueron cortados en su sección transversal y posteriormente preparados metalográficamente siguiendo la metodología descrita en el capítulo 3. Las fotomicrografías obtenidas a través de microscopía electrónica de barrido se presentan en la Figura 4-1. A una magnificación de 200X tomada en la sección transversal del recubrimiento Mo-Ni en estado como rociado (ver Figura 4-1) se puede apreciar una estructura en forma de láminas en la cual se presentan zonas de pobre cohesión interlaminar (ver óvalo azul en la Figura 4-1) lo cual se corrobora en la Figura 4-1b, la cual corresponde a la misma sección del recubrimiento pero a una magnificación de 500X. Hwang et. al. (2005) también reportaron la presencia de estas grietas entre lamellas o laminas en recubrimientos de molibdeno depositados por plasma e indicaron que esto ocasiona que la cohesión entre los mismos sea relativamente débil. En ambas figuras se observa la presencia de porosidad (ver círculos rojos) lo cual es propio de recubrimientos depositados mediante el proceso de rociado térmico por plasma (Babu, 1996). También se evidencian dos fases de color gris claro y gris oscuro las cuales posteriormente serán analizadas mediante un análisis químico elemental semicuantitativo por espectroscopía de dispersión de energía de rayos-X. Las Figura 4-1c y d corresponden a los recubrimientos que han recibido un tratamiento térmico en horno de vacío (TT vacío) a magnificaciones de 200 y 500X respectivamente. En ellas también se observan grietas interlaminares y porosidad como en el recubrimiento no tratado térmicamente, pero si se aprecia una disminución en el espesor y menor porosidad como consecuencia del tratamiento térmico posterior.

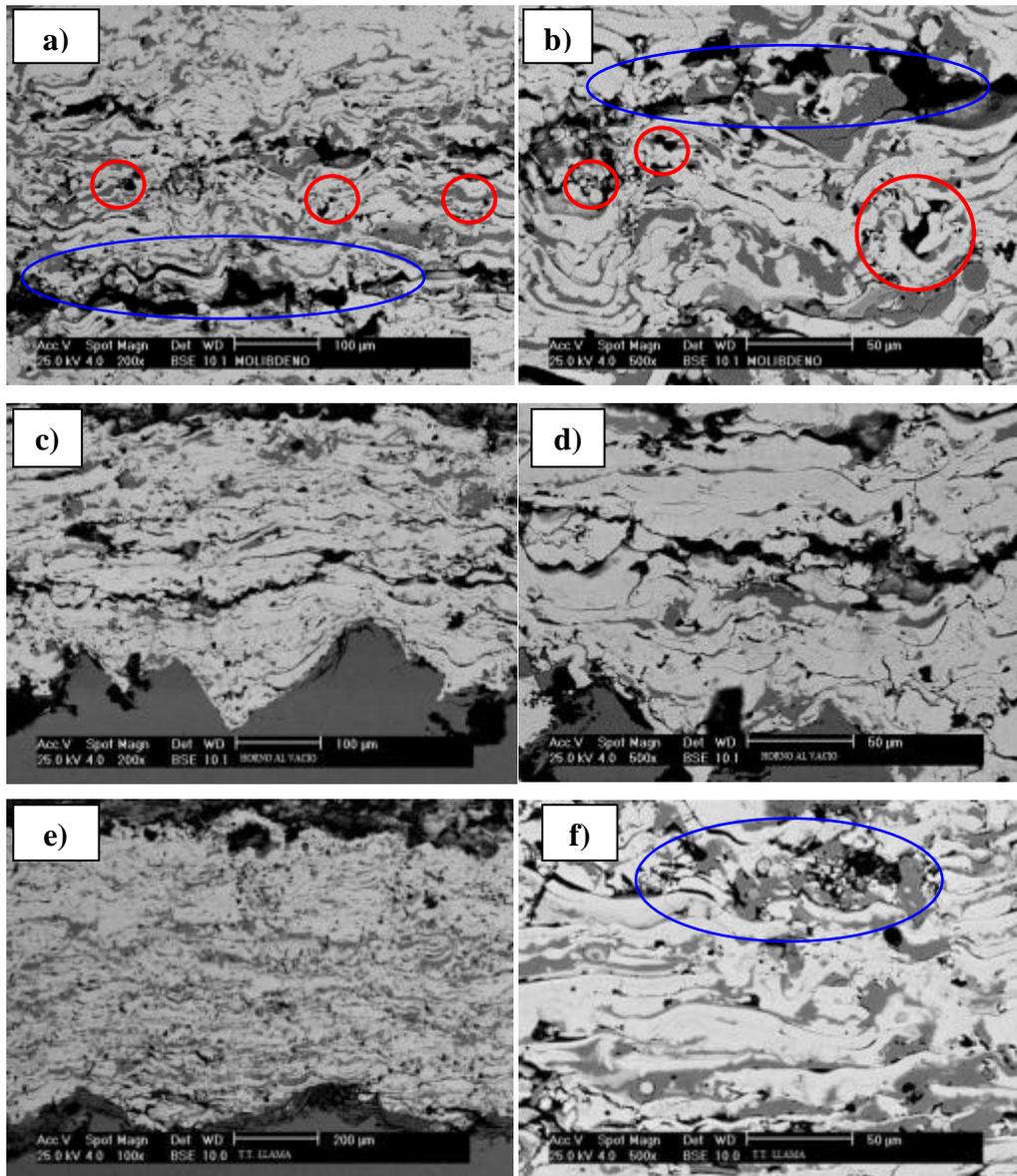


Figura 4-1. Micrografías de los recubrimientos Mo-Ni (a y b) a 200 y 500X (c y d) T.T. Vacío a 200 y 500X (e y f) T.T. Llama a 200 y 500X.

Las Figura 4-1 e) y f) presentan las microestructuras del recubrimiento Mo-Ni después de aplicado el tratamiento térmico con llama oxiacetilénica en las cuales se observan grietas lamelares así como también cierto grado de porosidad (círculos azules). Comparados los tres recubrimientos pareciera que el tratamiento térmico con llama ocasionó una mayor densificación ya que se observan menos grietas interlamelares y se aprecia una menor porosidad.

A una mayor magnificación (1000X) se puede observar que el recubrimiento Mo-Ni en estados como rociado presenta algunas partículas no fundidas (ver círculos azules en Figura 4-2 a), las cuales probablemente no recibieron el calor suficiente como para llegar a un estado plástico o fundido, y por lo tanto no cohesiona adecuadamente. Se puede apreciar porosidad (ver círculos rojos en Figura 4-2 a y b) y grietas entre las lamellas (indicados por la flecha azul) producto del proceso de deposición lo cual se traduce en una menor cohesión.

Las micrografías con magnificaciones a 1000X en modo de electrones primarios y secundarios para la muestra que recibió el T.T. Vacío se muestran en las Figura 4-2 c y d respectivamente, en las cuales se aprecian espaciamentos interlamelares y ciertas porosidad que no pudieron ser eliminados por el tratamiento térmico posterior. La muestra tratada con llama oxiacetilénica evidencia la presencia de poros (ver Figura 4 e y f), pero luce con una mayor cohesión que la muestra sin tratamiento térmico posterior e inclusive que la tratada al vacío.

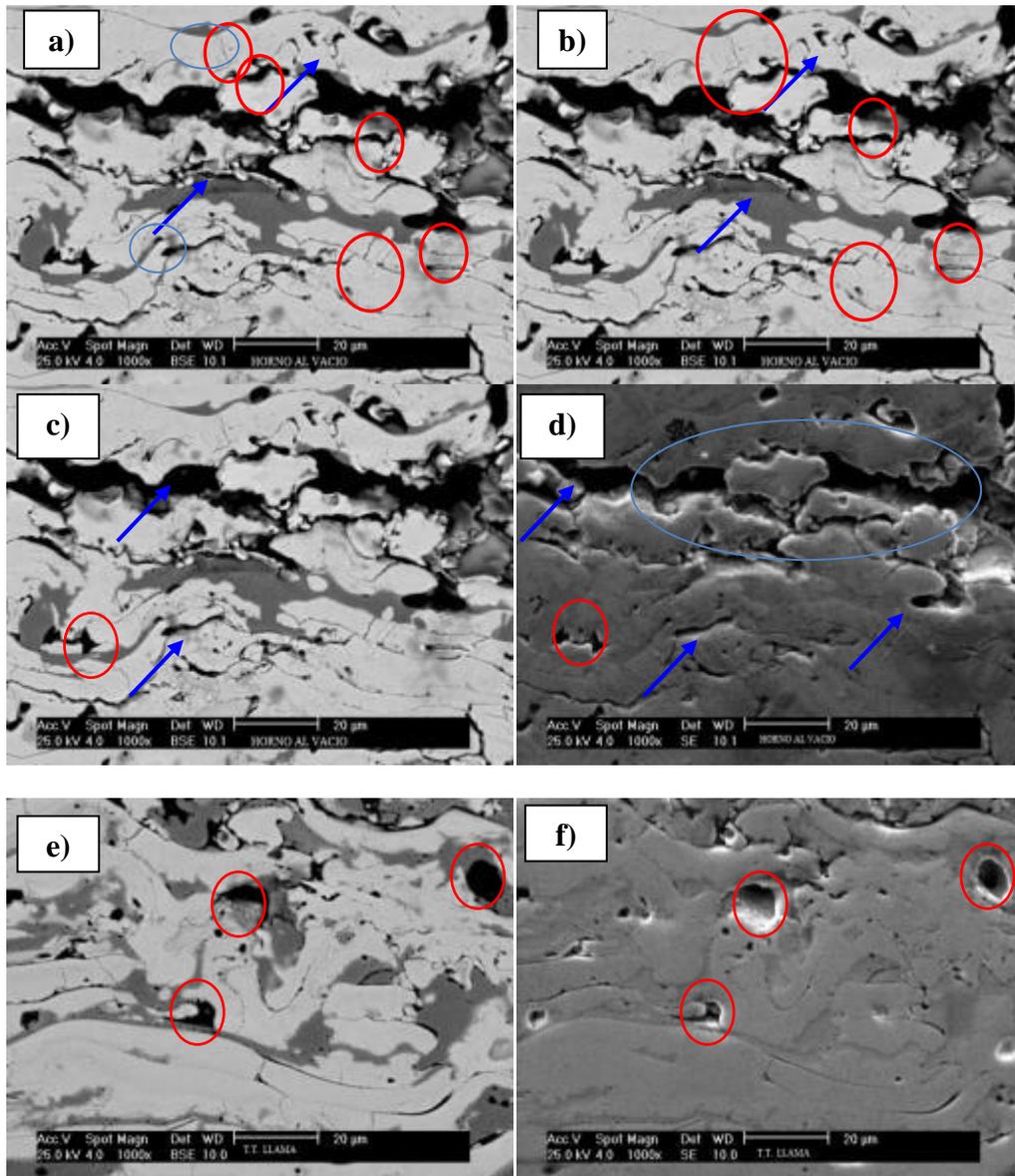


Figura 4-2. Micrografía de Mo-Ni con magnificación de 1000X (a y b), Micrografía de vacío con magnificación de 1000X (c y d), Micrografía de llama a 1000X (e y f) En modo de electrones primarios y secundarios.

La figura 4-3a muestra el análisis químico semi-cuantitativo realizado en las dos fases observadas en el recubrimiento Mo-Ni sin tratamiento térmico posterior. La fase gris clara está formada principalmente por Mo la cual corresponde a la matriz del recubrimiento y oxígeno lo cual podría indicar la presencia de un óxido de molibdeno (MoO_2) el cual se forma durante el proceso de deposición (Hwang 2004), también se aprecia la presencia de níquel correspondiente a la aleación con la cual fue mezclado el molibdeno puro. La fase gris oscura está formada mayoritariamente por níquel y cromo, algo de oxígeno lo cual indicaría la existencia de óxidos que se formarían durante el proceso de rociado.

El análisis químico semi-cuantitativo realizado en la muestra que recibió el tratamiento térmico en vacío en las dos fases observadas, reporta una composición química similar al recubrimiento en estado como rociado lo indicaría que el tratamiento térmico no propicio la formación de fases diferentes a las que se encontraban inicialmente en el recubrimiento sin tratar. Sin embargo se detecto la presencia de pequeñas cantidades de hierro y cromo lo cual puede ser debido a la difusión de estos elementos hacia la matriz de molibdeno como consecuencia del tratamiento térmico posterior.

En el caso del recubrimiento tratado con llama oxiacetilénica el análisis químico semi-cuantitativo realizado en la fase gris clara no indicó la presencia de cromo ni de hierro, lo cual probablemente es debido a que este tratamiento se realiza en tiempos muy cortos y no hay suficiente tiempo para que los elementos difundan. La fase oscura presentan una composición elemental similar al recubrimiento sin tratar por lo tanto podría decirse que este tratamiento térmico no propicio la formación de nuevas fases.

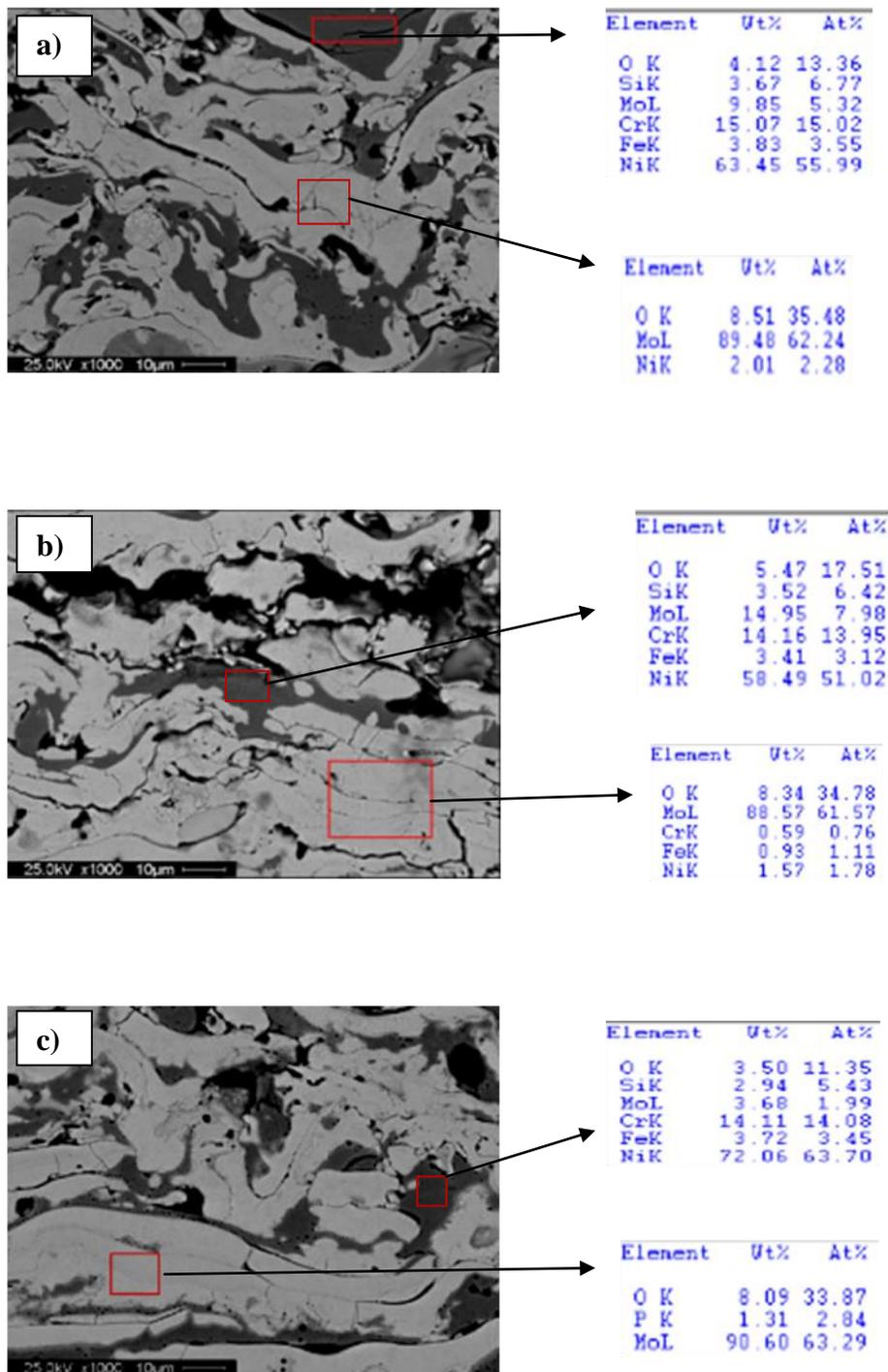


Figura 4-3 Fotomicrografía con análisis por EDS realizado a las fases observadas en cada recubrimiento a) Mo-Ni b) TT Vacío y c) TT Llama.

4.2. DENSIDAD DE LOS RECUBRIMIENTOS

La densidad de los recubrimientos en estudio fue obtenida a través del método inmersión, el cual se le realizó a las tres condiciones, Tabla 4-1. Como se aprecia en esta tabla los tratamientos térmicos no realizaron cambios significativos en la densidad. Probablemente esto sea debido a que los recubrimientos presentaron mayor cantidad de grietas que la porosidad, por lo tanto las condiciones de temperatura y tiempo probablemente no permitieron una adecuada densificación del recubrimiento.

Tabla 4-1. Densidad de los recubrimientos

Muestras	(g/cm ³)
Mo-Ni	8,2
T.T. Vacío	8,8
T.T. Llama	8,4

4.3. RESULTADOS DE DUREZA

Los valores presentados en la Tabla 4-2 corresponden a los promedios de la dureza, con sus respectivas desviaciones estándar (D.E.), obtenidos mediante la técnica de microindentación Vickers obtenidos en la sección transversal de cada recubrimiento. Para cada una de las condiciones en estudio: recubrimiento molibdeno-níquel en estado como rociado (Mo-Ni), recubrimiento molibdeno níquel con tratamiento térmico posterior en horno de vacío (T.T Vacío) y recubrimiento molibdeno-níquel con tratamiento térmico posterior con llama oxiacetilénica (T.T llama), se realizaron 10 indentaciones según fue detallado en el capítulo de metodología experimental.

Tabla 4-2. Dureza

Muestras	HV ₍₃₀₀₎	D. Estándar
Mo-Ni	544	36,6
T.T. Vacío	757	38,3
T.T. Llama	620	42,9

En la Tabla 4-2 se aprecia que el promedio de dureza Vickers para el recubrimiento Mo-Ni que recibió el tratamiento térmico posterior en vacío es 28% mayor comparado con el recubrimiento sin tratar, mientras que el tratamiento térmico con llama no produjo un aumento significativo en la dureza del recubrimiento si consideramos la desviación estándar de los valores promedios. Es de hacer notar que a pesar de que el recubrimiento tratado con llama presentó una microestructura que evidenciaba una mejor cohesión entre partículas comparada con el recubrimiento tratado en vacío, los valores de dureza son inferiores a este recubrimiento. Por otra parte los valores de densidad reportados en la Tabla 4-1 no reflejan un aumento significativo de la densidad como consecuencia de los tratamientos térmicos. Da Silva y Hoyer (2009), en un estudio realizado en recubrimientos Mo-Ni depositados por el proceso de rociado térmico por plasma, reportaron que tanto el tratamiento térmico posterior con llama oxiacetilénica como en horno de atmósfera de argón incrementaron los valores de dureza, sin embargo, no producían cambios significativos en la porosidad de los recubrimientos, y adujeron estos resultados a la formación de óxidos como consecuencia del tratamiento térmico, los cuales incrementan la dureza. Sin embargo, los resultados de análisis químico realizado a las muestras en estudio no revelaron la formación de otras fases.

4.4. EVALUACIÓN DEL DESGASTE POR DESLIZAMIENTO

4.4.1.1. Tasa de desgaste para los bloques

Como fue explicado en la metodología experimental, no se tenían los valores de carga, velocidad de deslizamiento para realizar el ensayo de desgaste por deslizamiento al par tribológico (Mo-Ni – Stellite) en estudio por lo tanto se realizaron algunas pruebas preliminares tomando algunos valores de cargas, velocidad se midió el ancho de la huella para determinar si con esos valores las dimensiones de la huellas estaban bajo especificaciones de la norma ASTM G77-98 una vez realizado estos ensayos preliminares se seleccionaron cargas, velocidad de deslizamiento, se aplicó el diseño experimental factorial 4^2 en el cual 4 son las niveles de las variables, 2 es el número de variables seleccionadas.

La matriz resaltante y los valores de la respuesta (tasa de desgaste del bloque o recubrimiento) se muestran en la tabla 4-3. La clasificación más simple de interacciones entre superficies que envuelven una u otra es, el desgaste suave y el desgaste severo. En este par tribológico el régimen presente en todas las muestras fue severo, ya que las tasas de desgaste fueron superiores a 1.10^{-5} mm³/m. Da Silva y Hoyer (2009) en un estudio realizado de desgaste por deslizamiento a diferentes niveles de cargas y velocidades sobre un recubrimiento a diferentes niveles de cargas y velocidades sobre un recubrimiento Mo-Ni utilizando como contraparte nylon 6, también reportaron un régimen de desgaste severo.

Tabla 4-3. Tasa de desgaste del bloque

N° Condición	Cargas (N)	Velocidad (m/seg)	Tasa de desgaste (mm ³ /m 10 ⁻⁰²)	Desviación Estándar (10 ⁻⁰²)
1	44,6	0,15	0,42	0,03
2	44,6	0,20	0,24	0,07
3	44,6	0,25	0,28	0,38
4	44,6	0,30	0,38	0,05
5	67	0,15	0,54	0,17
6	67	0,20	0,54	0,08
7	67	0,25	0,75	0,14
8	67	0,30	0,68	0,18
9	89	0,15	0,30	0,02
10	89	0,20	0,39	0,02
11	89	0,25	0,67	0,17
12	89	0,30	0,72	0,18
13	112	0,15	0,85	0,22
14	112	0,20	0,84	0,20
15	112	0,25	1,22	0,02
16	112	0,30	2,05	0,16

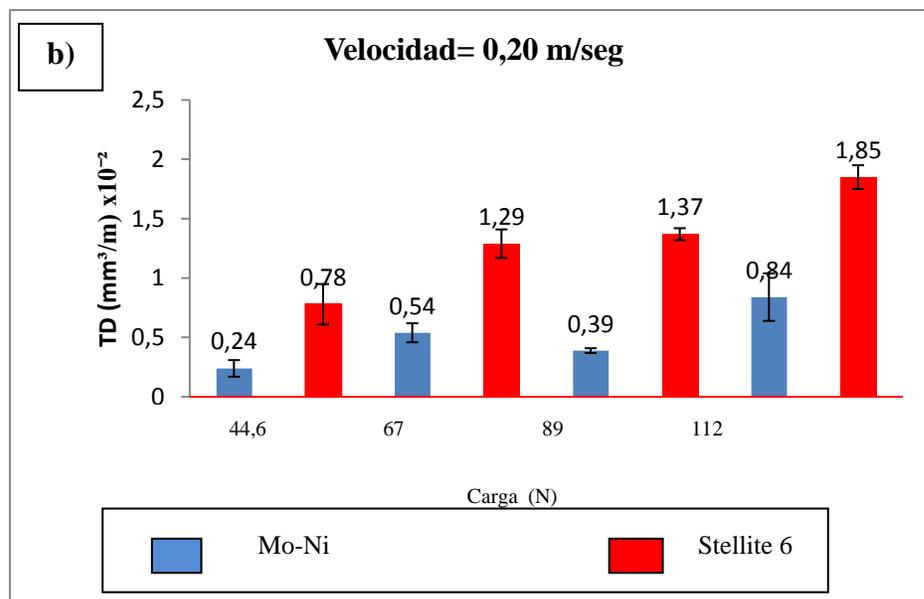
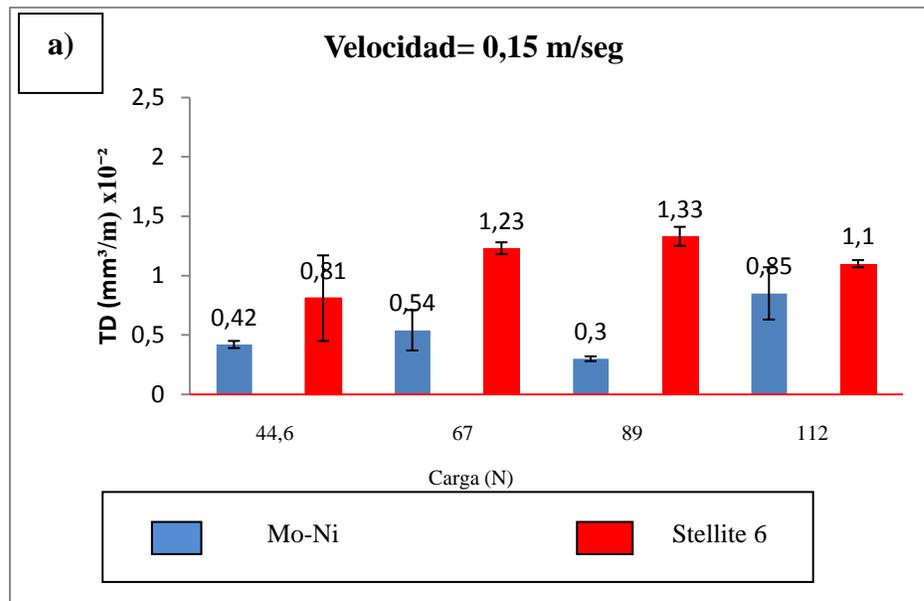
Los resultados obtenidos indican que en líneas generales existe una influencia significativa de la carga sobre la resistencia al desgaste por deslizamiento del recubrimiento Mo-Ni depositado por la técnica de rociado térmico por plasma, lo cual coinciden con la teoría de Archard (1953) y con lo reportado por otros investigadores (Cadenas 2007; Hwang, 2005).

Es de hacer notar que la tasa de desgaste de la condición N°1 es prácticamente el doble a las obtenidas cuando se utiliza una fuerza normal de 44,6 N y velocidades de 0,20 y 0,25 m/seg. Este comportamiento ha sido reportado previamente (Tabor, D. 1973) cuando se utilizan velocidades de deslizamiento relativamente bajas.

El mayor valor de tasa de desgaste se presentó en la condición N° 16 la cual fue sometida a la acción de la carga y velocidad más elevadas del diseño experimental seleccionado (112 N y 0,3 m/seg respectivamente), obteniendo un incremento del 88% con respecto a la condición N° 2 que fue la que presentó la mejor resistencia al desgaste. La menor resistencia al desgaste obtenida por la condición N° 16 es probablemente debida a que las fases presentes en la aleación se van endureciendo y fracturando bajo la acción de las cargas relativamente altas y finalmente se fracturan produciendo el desgaste del recubrimiento por desprendimiento. Posteriormente los debris desprendidos quedan atrapados entre el bloque y el anillo produciendo abrasión por tres cuerpos. Igualmente la separación cuando se aplican altas cargas lo cual también contribuye al aumento de la tasa de desgaste. Resultados similares fueron encontrados por Hwang (2004).

4.4.1.2 Tasa de desgaste de los anillos

La Figura 4-4 (a, b, c y d) contienen los resultados de la tasa de desgaste (TD) de los bloques recubiertos con el recubrimiento en estado como rociado (Mo-Ni) y su contraparte (stellite 6) en función de la carga (N) para cada velocidad de deslizamiento estudiada. Se observan que la tasa de desgaste aumenta con la carga normal aplicada para la mayoría de las condiciones lo cual coincide con lo indicado en la literatura (Tabor 2001). También se puede observar que la tasa de desgaste para la contraparte (anillo recubierto con Stellite 6) resultó superior al recubrimiento de Mo-Ni en la mayoría de las condiciones evaluadas.



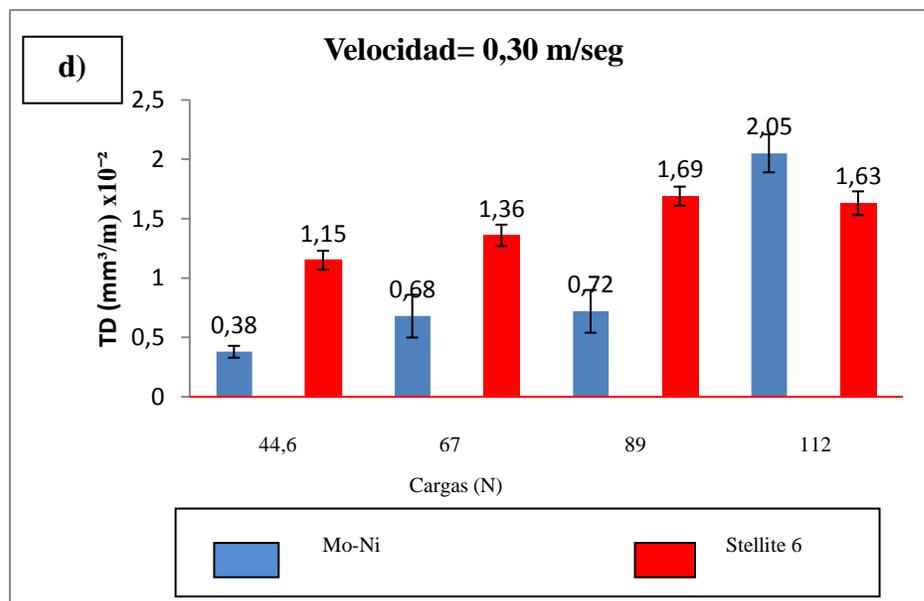
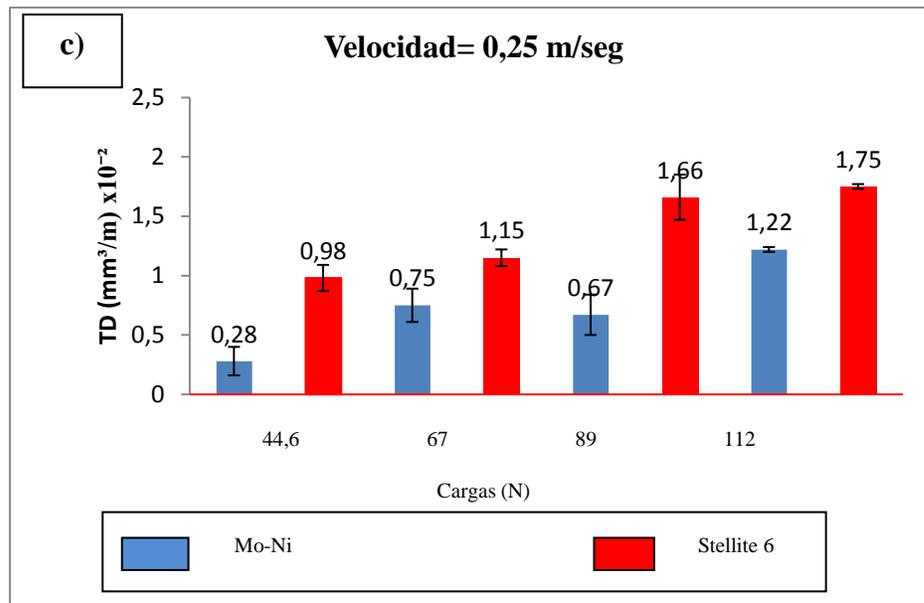


Figura 4-4. Tasa de desgaste vs Carga normal para los recubrimientos de Mo-Ni y su contraparte (stellite 6): a) velocidad de deslizamiento 0,15 m/s. b) velocidad de deslizamiento 0,20 m/s. c) velocidad de deslizamiento 0,25 m/s. d) velocidad de deslizamiento 0,30 m/s.

4.5. EVALUACIÓN DEL DESGASTE POR DESLIZAMIENTO

4.5.1. Anova

A fin de estudiar la influencia de los parámetros seleccionados sobre la tasa de desgaste del par tribológico en estudio se realizó un análisis estadístico de los datos utilizando la herramienta computacional ANOVA.

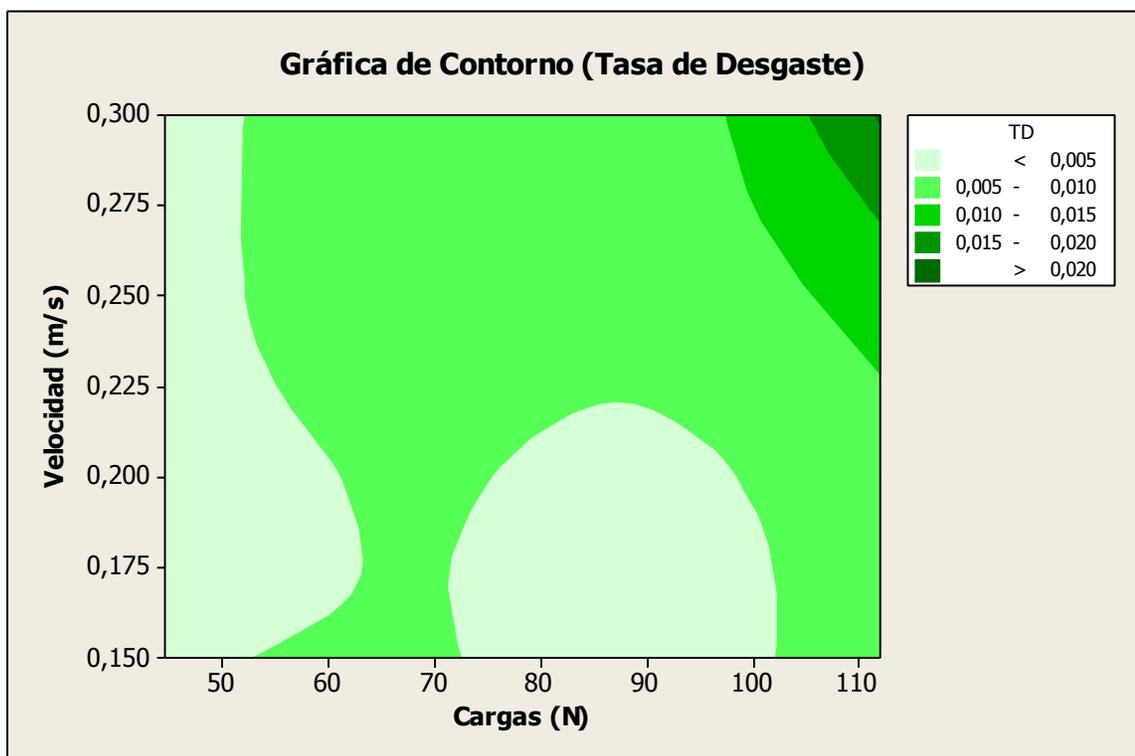


Figura 4-5. Gráfica de contorno para diferentes tasas de desgaste

Se puede observar en la Figura 4-5 que los valores seleccionados en líneas generales ofrecen una tasa de desgaste menor a 0,005.

A través de la metodología de Superficies de Respuesta, se puede dar a conocer una región o zona en la cual obtenga los mejores valores de desgaste.

Debido a que los parámetros (carga y velocidad) arrojaron valores significativos para el ensayo de desgaste por deslizamiento, el método de superficie de respuesta se enfocará en ellos.

La combinación de estos parámetros la podemos apreciar en la Figura 4-5 y Figura 4-6 correspondientes a la superficie de respuesta y la gráfica de contorno, para la tasa de desgaste. La gráfica de contorno es una proyección horizontal de la superficie de respuesta, en esta podemos apreciar diferentes colores los cuales pertenecen a diferentes niveles de desgaste presentados de manera ordenada. El área verde claro pertenece a la zona de menor desgaste ($< 0,05$), mientras que la verde oscuro pertenece a la de mayor desgaste ($> 0,020$).

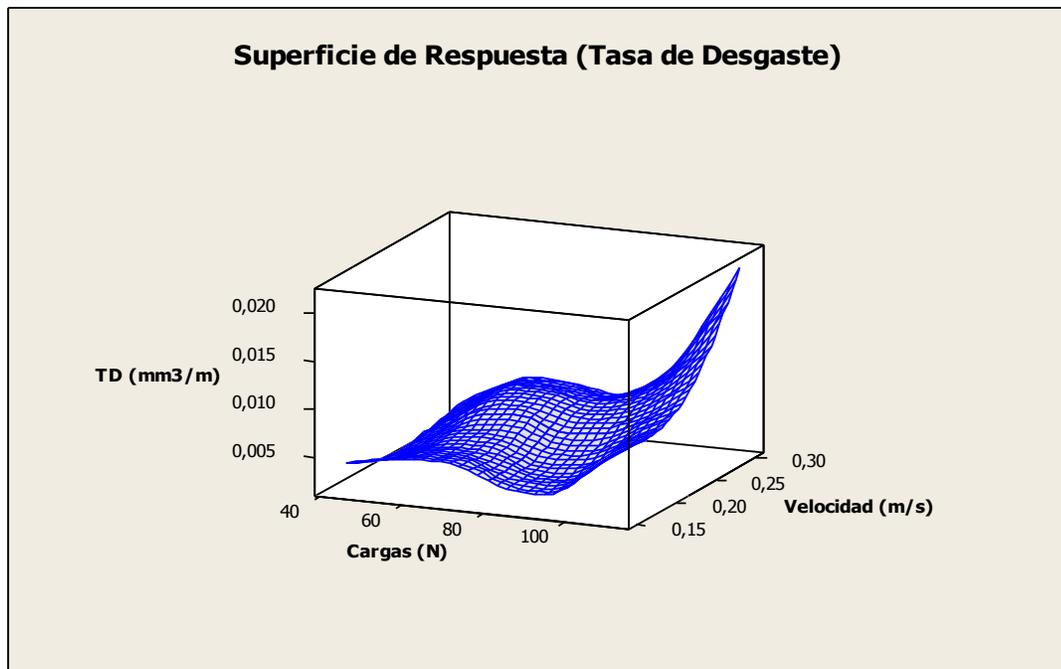


Figura 4-6. Superficie de respuesta tridimensional

La Tabla 4-4 muestra los resultados arrojados por ANOVA, así como los términos de variación, suma de cuadrados, promedio de cuadrados, el valor F y el valor de significación P.

Para poder determinar la existencia de algún parámetro que sea significativo, es importante el valor de P, si este valor es menor que 0.05 quiere decir que existen relaciones de dependencia entre las variables y se asegura que dicho factor influye significativamente sobre el valor de la respuesta obtenida, en cambio si el valor de P es mayor que 0.05 se establece que no existen relaciones de dependencia entre las variables y que dicho factor no influye en el resultado.

Tabla 4-4. Análisis de Varianza para tasa de desgaste (Block on Ring)

Origen	DF	Suma de Cuadrados	Suma de cuadrados ajustada	Promedio de cuadrados ajustado	Relación F	Probabilidad P
Cargas	3	0,0005508	0,0005508	0,0001836	92,23	0,000
Velocidad	3	0,0001607	0,0001607	0,0000536	26,92	0,000
Carga*Velocidad	9	0,0001851	0,0001851	0,0000206	10,33	0,000

A partir de los resultados de ANOVA presentados en la Tabla 4-4 se puede apreciar que las dos variables evaluadas tienen un valor de P igual a 0.000, lo cual nos dice que poseen un efecto significativo sobre la tasa de desgaste ya que el valor de P es menor de 0,05.

En la Figura 4-7 se puede apreciar la influencia de cada variable con respecto a la tasa de desgaste. En esta figura podemos ver como la tasa de desgaste para las carga intermedias (67 y 89 N) tienen un valor similar, mientras que para los valores de carga en los extremos (44,6 y 112N) la tasa de desgaste presenta grandes diferencias.

Vemos la influencia de la velocidad con respecto a la tasa de desgaste, para los valores más bajos de velocidad (0,15 y 0,2 m/seg) no es mucha la diferencia del valor de tasa de desgaste. Las velocidades de (0,25 y 0,3 m/seg) presentan un mayor valor de tasa de desgaste.

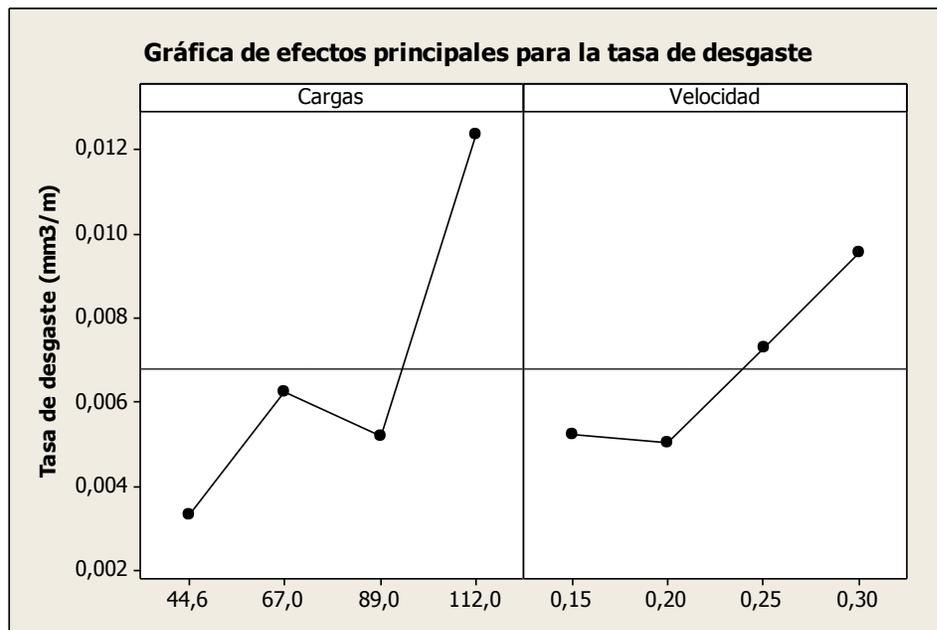


Figura 4-7. Efectos de las variables sobre la tasa de desgaste

En la Figura 4-8 se observa la interacción de las dos variables en estudio carga y velocidad, los recubrimientos ensayados a una carga de 44,6 N tienen una tasa de desgaste con valores similares excepto en la velocidad de 0,15 m/seg donde tiene un incremento considerable. Los recubrimientos de Mo-Ni ensayados a carga de 67 N y 89 N presentan un comportamiento semejante antes los distintos niveles de velocidad, los recubrimientos a carga de 67 N y 112 N con velocidades de 0,15 m/seg y 0,2 m/seg presentan un nivel de tasa de desgaste casi igual luego se nota un incremento y a carga de 89 N tiene en todo su recorrido un incremento de tasa de desgaste, la carga que presenta mayor tasa de desgaste es la de 112 N teniendo un incremento bastante elevado en las velocidades de 0,2 m/seg y 0,3 m/seg.

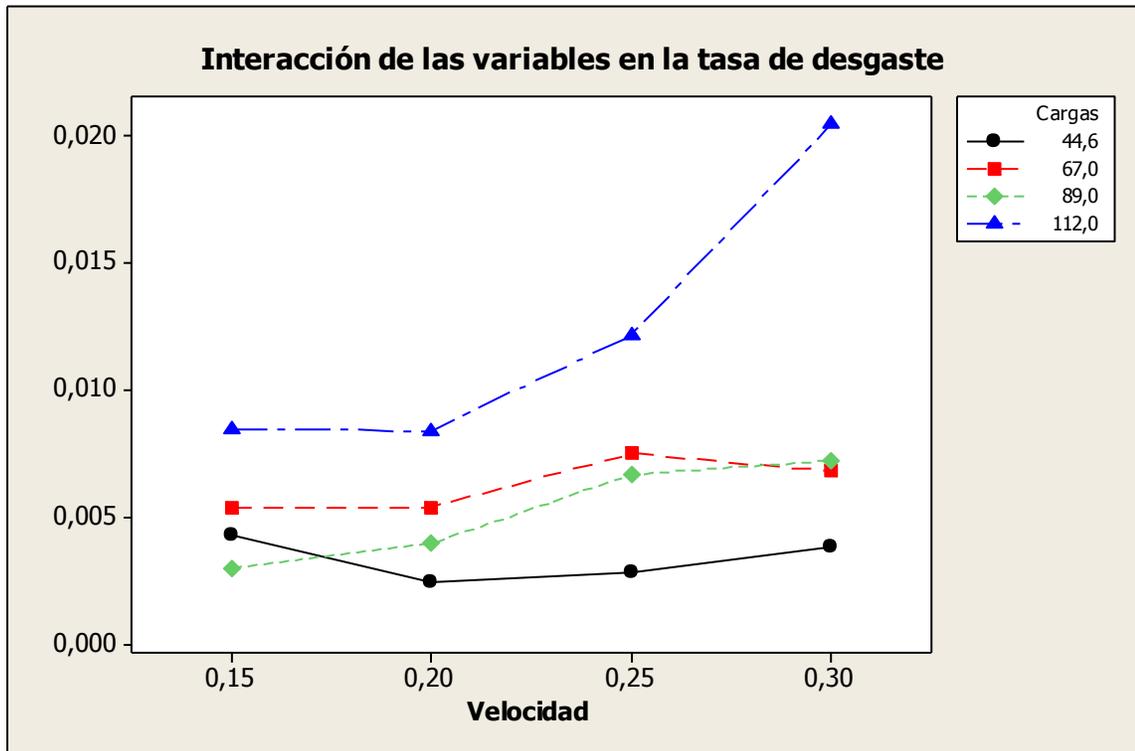


Figura 4-8. Interacción de las variables

En el caso de dos metales, debido al endurecimiento por deformación, las juntas soldadas en frío se hacen más resistentes que el volumen de ambos metales, produciendo en consecuencia el desprendimiento de partículas grandes de los dos cuerpos (Tabor, D 1973) explicando así las altas tasa de desgaste cuando se hacen deslizar dos materiales metálicos en condiciones de menor velocidad (carga 44,6 N y velocidad 0,15 m/seg).

4.6. EFECTOS DE LOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS.

La Tabla 4-3 muestra los resultados de la tasa de desgaste de los tratamientos térmicos y el recubrimiento Mo-Ni, los cuales fueron evaluados a una carga de 89 N y velocidad 0,2 m/seg parámetros que fueron tomados en función de los resultados obtenidos en la gráfica de contorno obtenida a través del análisis de varianza (ANOVA) correspondiente a la zona de menor tasa de desgaste. La tasa de desgaste del tratamiento térmico al vacío tiene un valor de 55% superior al recubrimiento Mo-Ni sin tratamiento térmico superior, mientras que el tratamiento térmico de llama es 49% mayor que el Mo-Ni.

Tabla 4-3. Tasa de Desgaste de los bloques con y sin tratamiento térmico posterior

Muestras	Tasa de desgaste ($\text{mm}^3/\text{m } 10^{-02}$)	Desviación Estándar (10^{-02})
Mo-Ni	0,39	0,02
T.T Vacío	0,86	0,08
T.T Llama	0,76	0,13

A pesar de que la dureza del recubrimiento se incrementó como consecuencia del tratamiento térmico posterior, la resistencia al desgaste por deslizamiento disminuyó, estos resultados indican la dureza no necesariamente es el factor determinante para tener una buena resistencia al desgaste. Existen otros factores

internos como la presencia de poros, grietas y distribución de las fases (Hwang 2005) que inciden directamente sobre la resistencia al desgaste.

Hwang (2004) en un estudio de desgaste por deslizamiento en arreglo bola sobre disco realizado sobre el recubrimiento de Mo puro y otras aleaciones de Mo, señaló que el recubrimiento con mayor dureza presentó la menor resistencia al desgaste. En este caso particular, con el par tribológico seleccionado, se podría decir que los tratamientos térmicos disminuyen la resistencia al desgaste por deslizamiento a pesar de haber aumentado la dureza de los mismos. Una de las causas de la disminución de la resistencia al desgaste del recubrimiento tratado con llama pudo deberse al enfriamiento al aire produjo endurecimiento de la matriz de Mo y bajo la acción de la carga esta se fractura siguiendo el mismo mecanismo propuesto anteriormente. En el caso del tratamiento térmico en vacío el aumento de la tasa de desgaste podría estar relacionado con el endurecimiento de la matriz de molibdeno por difusión de otros elementos como el cromo, así como también la formación de óxidos no lubricantes lo cual podría ir en detrimento de las propiedades de este recubrimiento.

4.7 Evaluación del coeficiente de fricción

En la Figura 4.9 se grafican los coeficientes de fricción (μ) para el recubrimiento de Mo-Ni, calculado según se describe en el capítulo de metodología experimental, en función de la distancia de recorrido, para una carga aplicada, una velocidad de deslizamiento constante y una distancia de recorrido de 550 metros. Dado que un gráfico con los coeficientes de fricción de todas las condiciones evaluadas sería muy difícil de visualizar se seleccionaron la condición de mayor tasa de desgaste (línea azul), la condición de menor tasa de desgaste (línea roja) y una condición intermedia (línea verde).

Se puede observar que al inicio del ensayo, en los primeros 10 metros de recorrido, el coeficiente de fricción presenta irregularidades que son atribuidas a que en la etapa inicial las superficies hacen contacto en los picos deformándolos y produciendo un aumento en el área de contacto entre ellas lo cual es conocido como “running” o estado transitorio el cual se caracteriza por cambios muy significativos del coeficiente de fricción. Este comportamiento fue explicado por Tabor (1977) quien desarrolló la teoría de adhesión la cual establece que cuando dos superficies metálicas libres de lubricantes entran en contacto tienden a adherirse entre sí. Se puede apreciar en esta figura que la condición N° 16, la cual presentó la mayor tasa de desgaste, obtuvo los valores de coeficientes de fricción más bajos y se puede apreciar que el estado transitorio a los 10 metros aproximadamente presenta el valor más bajo de coeficiente de fricción el cual fue de 0,41 y dicho coeficiente se va incrementando hasta llegar a un valor de 0,47 a los 42 metros aproximadamente Figura 4.10, este incremento puede ser atribuido a la rugosidad del recubrimiento y en consecuencia aumento del coeficiente de fricción. Por el contrario la condición N° 2 la de menor tasa de desgaste, arrojó los valores más altos del coeficiente de fricción partiendo de μ igual a 0,5 a los 10 metros luego aumenta μ igual 0,56 a 42 metros y seguidamente se estabilizo para μ igual a 0,83 a partir de los 336 metros. Mientras que la condición N° 7 (intermedia) de carga 89 N y velocidad de 0,20 m/seg presenta valores similares a la condición N° 16 a los primeros 10 metros μ igual 0,40 luego aumento μ 0,53 a los 42 metros, hasta que logra estabilizarse μ igual 0,64 a 192 metros aproximadamente.

Las condiciones de operación bajo altas temperaturas es otro factor que contribuye en gran medida al desgaste de partes y piezas metálicas. La Figura 4.11 podemos apreciar como varió la temperatura en función de la distancia recorrida. La condición que obtuvo los menores valores de tasa de desgaste también mostró los menores valores de temperatura (42°C) en comparación con las demás condiciones específicamente la condición que presentó la menor resistencia al desgaste (condición

N° 16) con los valores de temperatura más altos (47°C) y la condición intermedia tiene un valor de temperatura de 44°C.

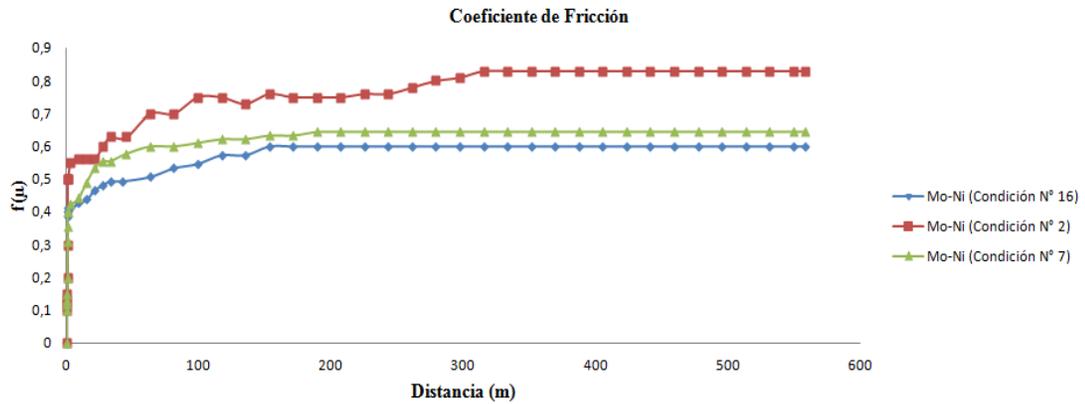


Figura 4-9. Gráfica coeficiente de fricción vs distancia de deslizamiento para bloques Mo-Ni.

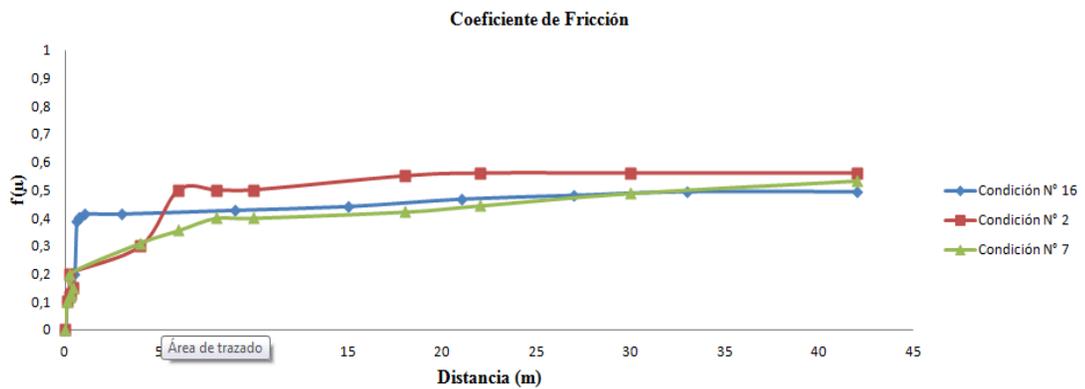


Figura 4-10. Gráfica coeficiente de fricción vs distancia de deslizamiento para los bloques Mo-Ni para los primeros 42 metros.

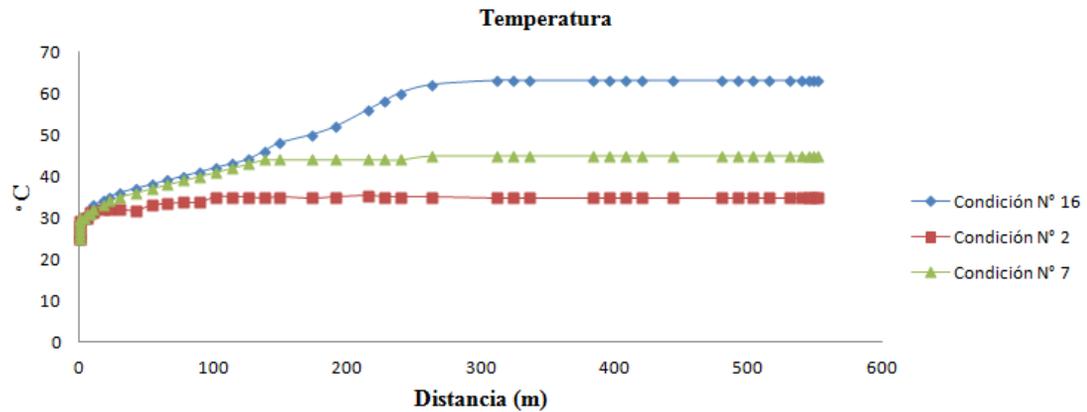


Figura 4-11. Curva de temperatura en función de la distancia para el Mo-Ni.

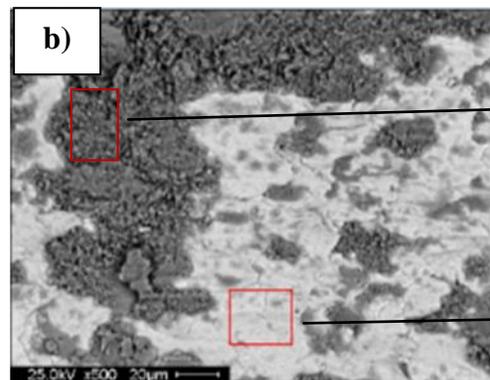
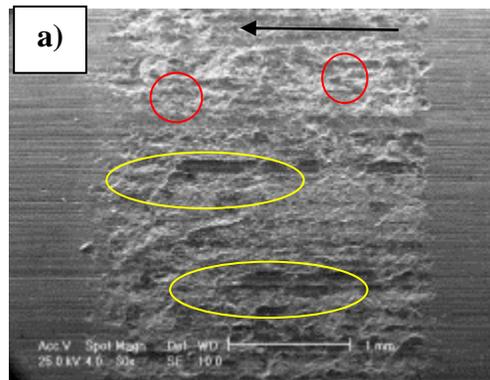
4.8 ANÁLISIS DE LAS SUPERFICIES DE DESGASTE

Los resultados de dureza reportados en este estudio indicaron que no existe una relación directa entre la dureza del material y la tasa de desgaste, de hecho el recubrimiento tratado térmicamente en horno de vacío se desgastó 2.28 veces más comparado con el recubrimiento sin tratar, así como también el desgaste del recubrimiento tratado en llama oxiacetilénica fue de 1.94 veces mayor. Como se dijo anteriormente la dureza no es el único factor que influye en el comportamiento frente al desgaste de un recubrimiento. Por lo tanto, las muestras que se presentaron los valores más altos y más bajos de tasa de desgaste así como también se evaluaron las superficies de desgaste de la Figura 4-12 corresponde al recubrimiento Mo-Ni sin tratamiento que presentó la mejor respuesta frente al desgaste por deslizamiento (Condición 44,6N; 0,2 m/seg). En la Figura a tomada a una magnificación 30X en electrones secundarios (SE) se observan la presencia de surcos de arado y de material indicado por las flechas azules y rojas respectivamente. A una mayor magnificación

ver Figura b, se observa que existe arrastre de material y deformación plástica (ver flechas) surcos de abrasión (ver rectángulos rojos) y desprendimiento de material (ver círculos verdes). En la figura podemos apreciar que se ha depositado material de la contraparte sobre la zona de desgaste indicando que el desgaste es principalmente de tipo adhesivo y podemos observar que la fase oscura está deformada plásticamente y con evidencias de comenzar un proceso de fractura y posterior delaminación. Las observaciones anteriormente expuestas nos indican que durante el ensayo el material del anillo se ha desgastado y adherido a la superficie del bloque (recubrimiento) y a medida que es aplicada la carga el material adherido comienza a deformarse y endurecerse por deformación hasta que finalmente se fractura y se desprende. Partículas endurecidas provenientes del material del anillo quedan atrapadas y por lo tanto producen el desgaste de abrasión por tres cuerpos. Un análisis químico realizado por EDS corrobora que la fase oscura está formada por elementos presentes en el Stellite 6 y oxígeno, lo cual indicaría la presencia de óxidos. La fase blanca corresponde al recubrimiento de Mo-Ni en la cual podemos apreciar que el valor de oxígeno se ha incrementado considerablemente con respecto al recubrimiento antes del ensayo de desgaste indicando la formación de óxidos probablemente debido a efectos de la temperatura y se observa además que el mismo se encuentra agrietado por efectos de la carga.

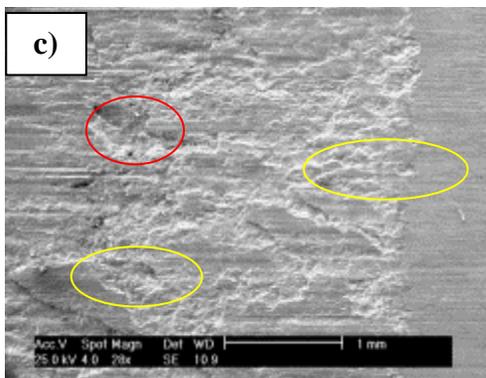
La Figura 4-12 c, corresponde a una imagen de la superficie de desgaste del recubrimiento Mo-Ni que obtuvo los mayores valores de pérdida volumétrica (112N; 0,3 m/seg). Se observan que al igual que en la muestra anterior ha habido un proceso de deformación plástica, surcos de arado y abrasión de tres cuerpo, sin embargo en esta muestra se presenta desprendimiento de material que no había sido observado en esa magnitud en el recubrimiento que tuvo el mejor comportamiento frente al desgaste. Este comportamiento es probablemente debido a que las elevadas cargas producen mayor deformación plástica de la matriz del recubrimiento el cual se va endureciendo por deformación y finalmente se fractura y conforme continúa el ensayo estas partículas endurecidas se van desprendiendo. En la Figura d a

magnificación de 200X está compuesta por oxígeno, aluminio y pequeñas cantidades de hierro lo cual estaría indicando que la delaminación del recubrimiento ha sido de tal magnitud que ha llegado al sustrato. La presencia de aluminio en el análisis químico es debido a que probablemente una partícula de alúmina procedente del proceso de limpieza quedó atrapada en la interfase.



Element	Ut%	At%
O K	18.64	46.59
W M	5.30	1.15
MoL	5.86	2.44
CrK	19.63	15.10
FeK	10.27	7.35
CoK	37.54	25.48
NiK	2.76	1.88

Element	Ut%	At%
O K	14.26	48.29
MoL	77.29	43.63
CrK	1.99	2.07
FeK	1.28	1.24
CoK	2.78	2.56
NiK	2.40	2.21



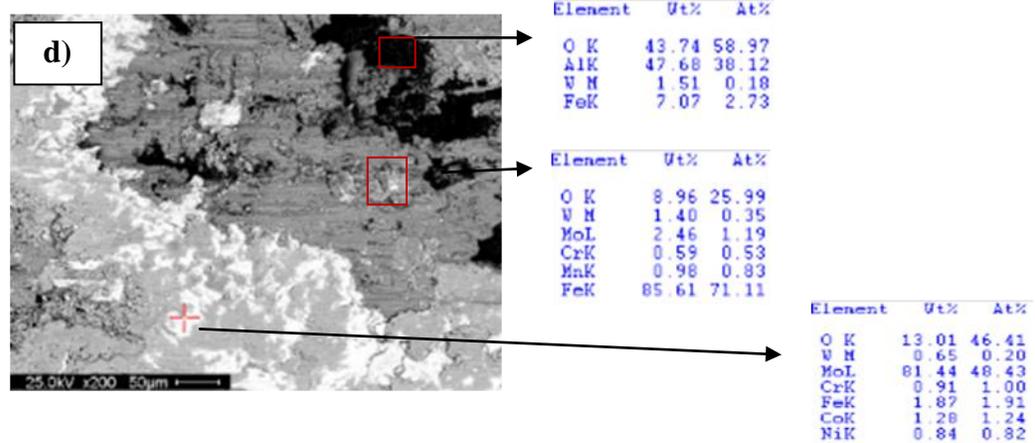
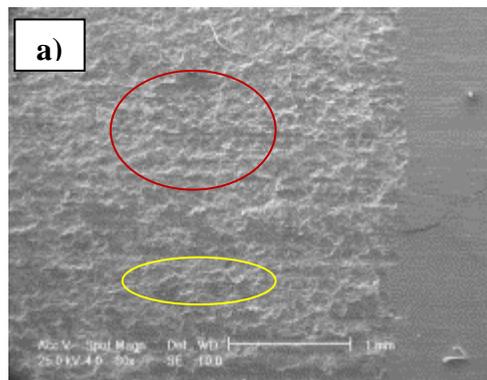


Figura 4-12 Micrografía de la superficie de desgaste Mo-Ni a) 30X SE b) 500X BSE c) 28X SE d) 200X BSE

En la Figura 4-13 muestra la superficie de desgaste del recubrimiento Mo-Ni correspondiente a la condición (44,6N; 0,15 m/seg). Decimos evaluar esta condición debido a que no sigue la tendencia del resto de las condiciones en lo que se refiere a que para un mismo valor de carga a medida que aumenta la velocidad la tasa de desgaste fue casi dos veces mayor comparada con el resto de las muestras evaluadas a la misma carga pero a velocidades más altas.



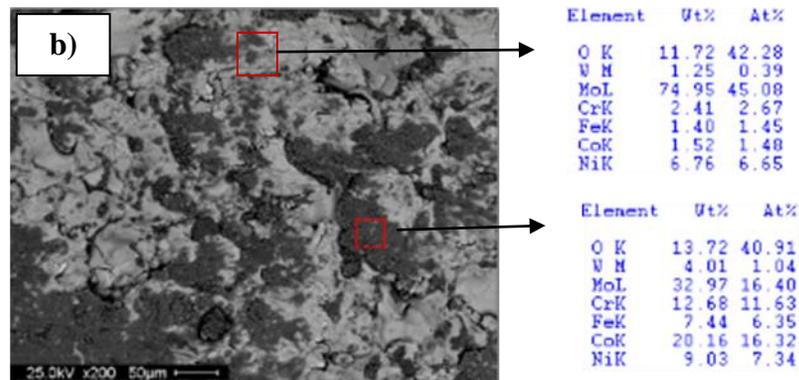
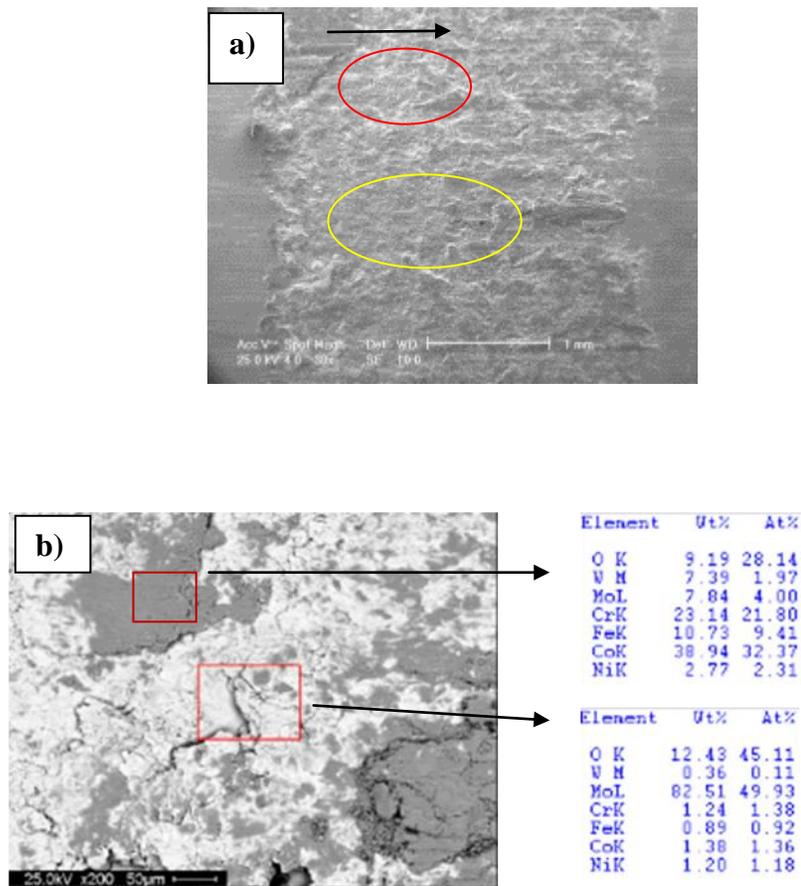


Figura 4-3. Micrografía de la superficie de desgaste Mo-Ni. Condición singular 44,6; 0,15 m/seg. a) 30X SE y b) 200X BSE.

La Figura 4-14 que corresponde a una imagen obtenida por microscopía electrónica de barrido de la superficie de desgaste muestra que recibió un tratamiento térmico en horno de vacío muestra además del mecanismo de adhesión, lo cual se evidencia por la presencia de elementos constitutivos del anillo en la huella de desgaste (correspondiente a la zona gris oscura en figura IV-14 b), la existencia de surcos de arado (ver círculos rojos) y desprendimiento del materias (círculos amarillo). Como se puede observar los mecanismos de desgaste presentes en este recubrimiento son similares a los observados en la muestra sin tratar térmicamente, sin embargo la tasa de desgaste para este recubrimiento es 2.2 veces mayor. La diferencia es probablemente debida a que el tratamiento térmico produjo la formación de óxidos diferentes a aquellos presentes en el recubrimiento sin tratar y éstos no actuarían como lubricantes incidiendo negativamente en el comportamiento frente al desgaste de este recubrimiento. Por otro lado, se observa en la superficie de desgaste de este recubrimiento mayor agrietamiento, lo cual es producto del endurecimiento por deformación que posteriormente conlleva a la fractura y desprendimiento de material. También se observa mayor abrasión por tres cuerpos indicando que las partículas desprendidas quedan atrapadas en el par tribológico produciendo estos

surcos profundos. El hecho de que la dureza del recubrimiento aumentara 1.4 veces como consecuencia del tratamiento térmico podría estar indicando que los óxidos formados como consecuencia del tratamiento térmico aumentarían este valor pero bajo el efecto de la carga éstos se fracturan produciendo el desprendimiento de material.



**Figura 4-14. Micrografía de la superficie de desgaste T.T Vacío. 89 N; 0,2 m/seg
a) 30X SE y b) 200X BSE.**

La Figura 4-15 que corresponde a una imagen obtenida por microscopía electrónica de barrido de la superficie de desgaste muestra que recibió un tratamiento térmico de llama oxiacetilénica, en la cual se observan la formación de surcos de arados (círculo amarillo) y donde se evidencia la deposición de material proveniente del anillo (círculo rojo). La dureza de este recubrimiento aumento 1.13 veces como consecuencia del tratamiento térmico podría estar indicando que los óxidos formados como consecuencia del tratamiento térmico aumentarían este valor.

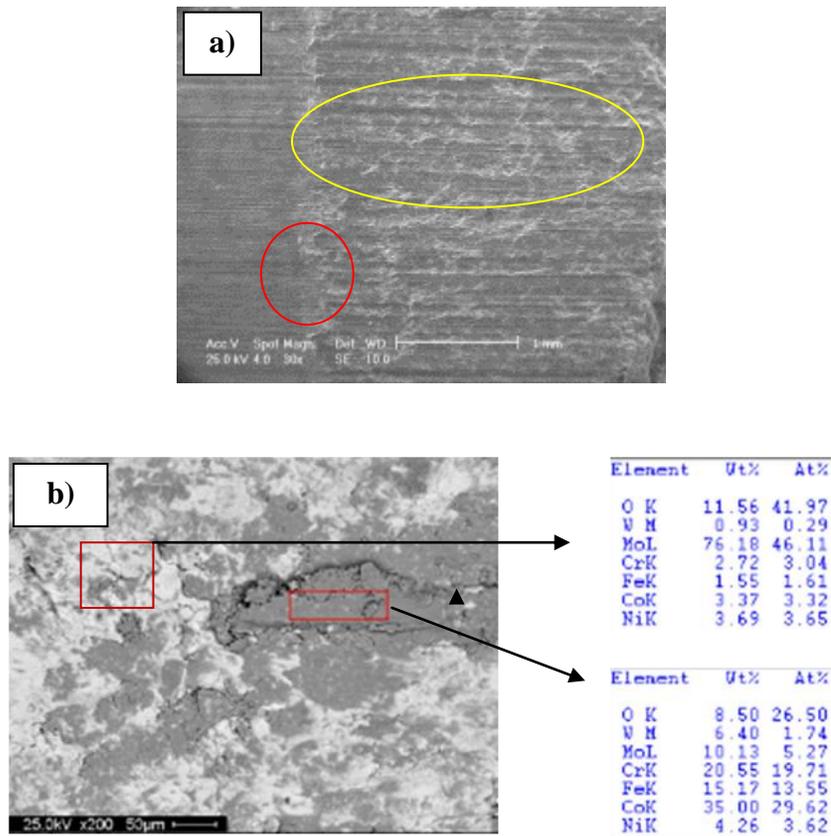


Figura 4-15. Micrografía de la superficie de desgaste T.T Llama 89 N, 0,2 m/seg. a) 30X SE y b) 200X BSE.

4.9 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO PARA LOS ANILLOS STELLITE 6

Se le realizó el ensayo de microscopía electrónica de barrido a los anillos que se usaron como contraparte de los bloques Mo-Ni, tratamiento térmico vacío y tratamiento térmico llama oxiacetilénica.

La Figura 4-16 a y b corresponden a la superficie de desgaste de anillo Stellite 6 que se uso como contraparte de bloque de Mo-Ni mejor condición, en la primera figura se puede apreciar surcos alargados producto de mecanismo de arado

(círculos rojos) y cavidades alargadas de mayor profundidad debido a partículas endurecidas o debris presentes entre los dos elementos en movimiento que actúan como abrasivos, el análisis EDS presenta tres fases una gris clara en el cual se observa la presencia de Mo indicando que ha habido una transferencia de material del recubrimiento hacia el anillo.

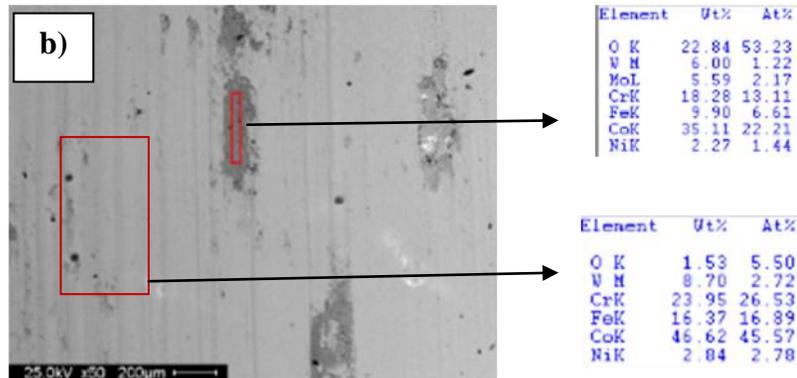
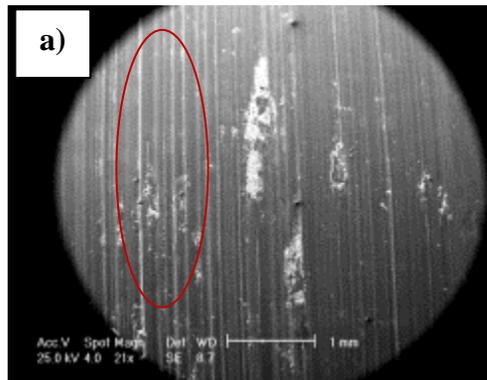


Figura 4-16. Micrografía de la superficie de desgaste anillo contraparte Mo-Ni. Mejor condición 44,6 N; 0,2 m/seg. a) 21X SE y b) 50X BSE.

La Figura 4-17 corresponde al anillo contraparte de Mo-Ni peor condición, la cual manifiesta la deformación plástica presente en el anillo debido a la fricción y mecanismo de adhesión (circulo amarillo) y cavidades debido a la delaminación y desprendimiento de material (círculos rojos).

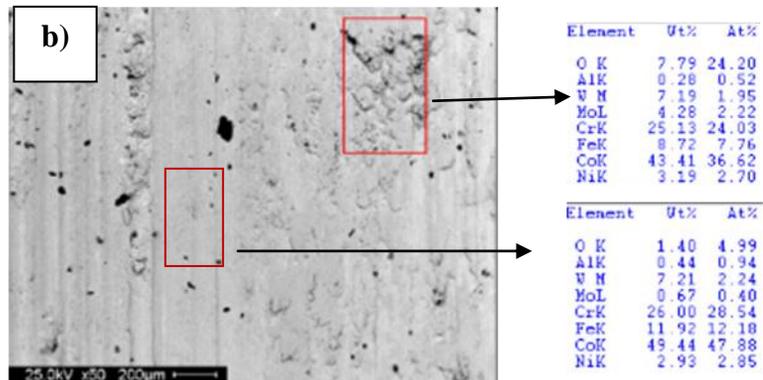
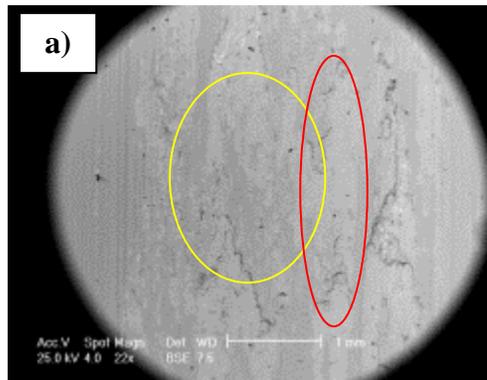


Figura 4-17. Micrografía de la superficie de desgaste anillo contraparte Mo-Ni. Peor condición 112 N; 0,3 m/seg. a) 22X BSE y b) 50X BSE.

En la Figura 4-18 corresponde a una microscopia electrónica de barrido aplicada al anillo Stellite 6 contraparte del Mo-Ni caso singular, se puede observar en la superficie deformación plástica, mesetas aplastadas y material desprendido debido a la delaminación además de óxidos depositados (circulo verde), también se observan surcos debidas a la dirección del movimiento del mismo sobre la superficie del bloque y las partículas duras desprendidas que actúan como material abrasivo (círculo rojo).

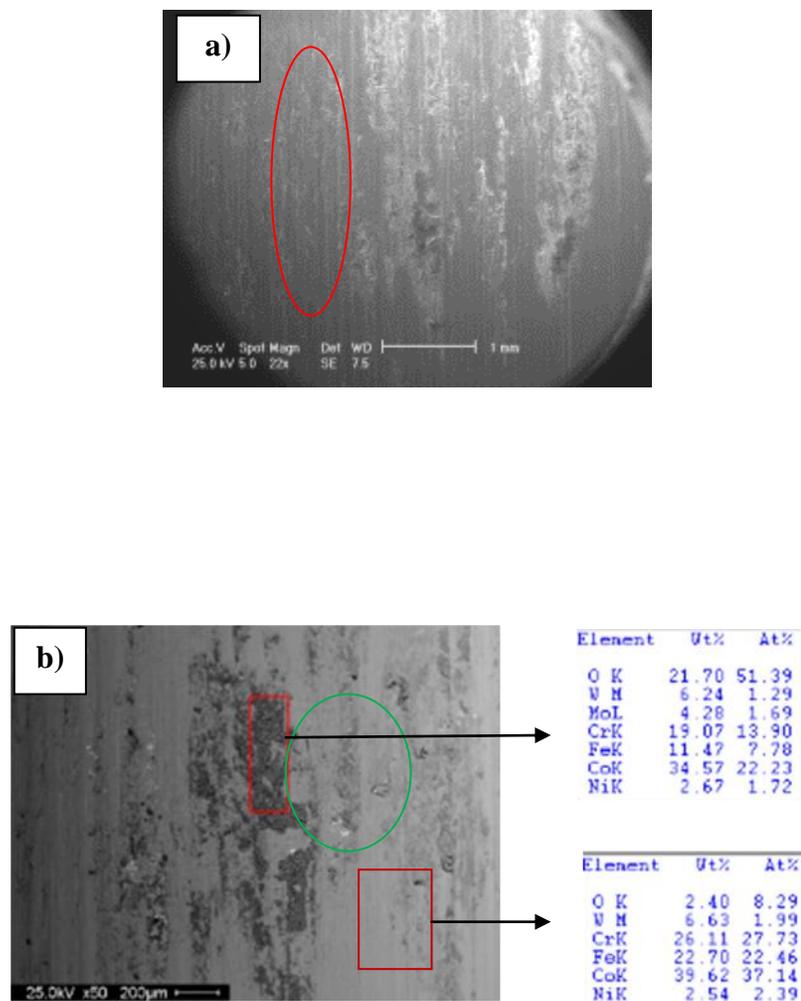
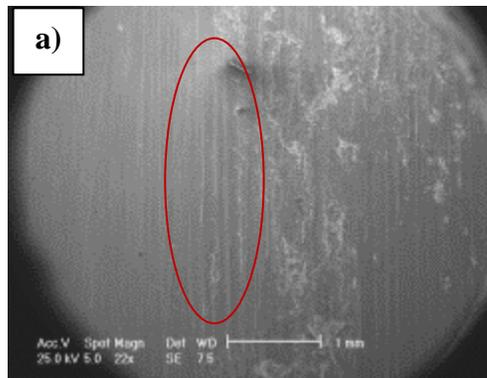


Figura 4-18. Micrografía de la superficie de desgaste anillo contraparte Mo-Ni. Condición singular (44,6 N; 0,15 m/seg) a) 21X SE y b) 50X BSE.

La Figura 4-19 a y b pertenece al anillo contraparte de bloque del tratamiento térmico vacío a una magnificación de 22X, en modo electrones secundarios y 50X BSE con análisis EDS respectivamente, en la figura a) se puede apreciar superficies aplastadas deformadas plásticamente y surcos alargados o huellas de arado producto de partículas abrasivas (círculo rojo).

En la Figura 4-19 b) se aprecia adhesión en algunas zonas y otras donde la superficie es socavada por partículas abrasivas. El análisis EDS demuestra la composición de las zonas demarcadas las cuales son en general óxidos de cromo, cobalto y hierro.



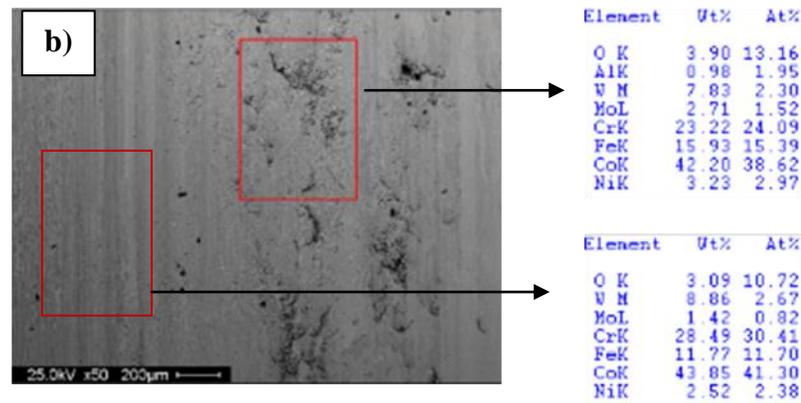


Figura 4-4. Micrografía de la superficie de desgaste anillo contraparte TT Vacío (89 N; 0,2 m/seg) a) 21X SE y b) 50X BSE.

En la Figura 4-20 a y b pertenecientes al tratamiento térmico llama oxiacetilénica observamos un recubrimiento con mecanismo de arado y mesetas aplastadas producto del mecanismo de adhesión, además de material desprendido debido a la delaminación, en el análisis EDS realizado se observa la composición de las zona demarcadas, la fase gris formada por óxidos de cromo, cobalto hierro y otra fase gris y gris clara que contiene cierto porcentaje de óxidos de molibdeno y níquel.

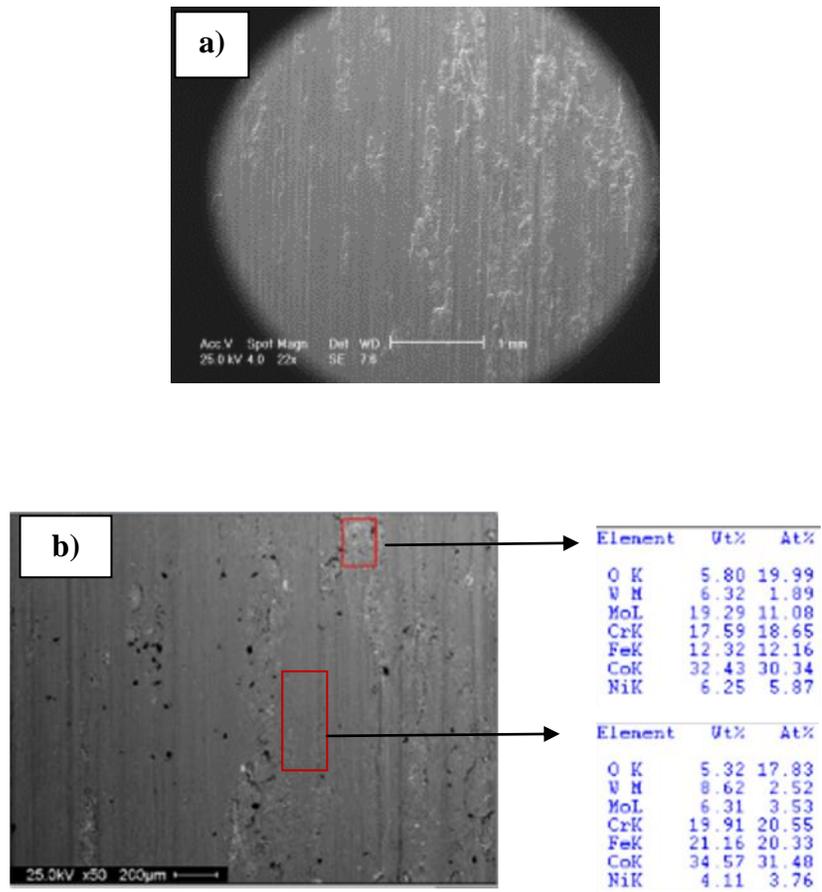


Figura 4-20. Micrografía de la superficie de desgaste anillo T.T Llama 89 N; 0,2 m/seg. a) 22X SE y b) 50X BSE.

4.10 ANÁLISIS DEL ENSAYO DE ABRASIÓN

En la tabla 4-4 se presentan los valores de pérdidas volumétricas a los 30 minutos, el ensayo de abrasión se realizó de acuerdo a la norma ASTM G 65-00 A para cada una de las muestras en estudio. Se puede observar en esta tabla que el tratamiento térmico en horno de vacío, presentaron una mejor resistencia al desgaste comparada con el recubrimiento Mo-Ni sin tratamiento térmico posterior, lo que representa una mejora del 68%, o visto de otra manera, este recubrimiento se comportó 3.14 veces mejor frente al desgaste por abrasión. El segundo mejor comportamiento correspondió a las muestras tratadas térmicamente con llama oxiacetilénica, con 1.76 veces más resistente que el recubrimiento Mo-Ni.

Tabla 4-4. Pérdidas Volumétricas por Abrasión a los 30 min de ensayo

Muestras	Pérdida Volumétrica (mm ³)	Desviación Estándar
Mo-Ni	51,3	7,6
T.T Vacío	16,3	0,7
T.T Llama	29,1	1,9

A fin de evaluar el comportamiento frente al desgaste por abrasión en función del tiempo se realizaron mediciones de pérdida volumétrica a 5, 15 y 30 minutos de ensayo para cada una de las muestras en estudio, resultados que se presentan en la Figura IV-20. En esta figura se observa que las muestras tratadas térmicamente en horno de vacío presentan los menores valores de pérdida volumétrica para los tres tiempos de ensayo. También se nota que el recubrimiento de Mo-Ni presenta los valores más altos durante todo el ensayo. Conde Dávila (2007) realizó ensayos de abrasión sobre un recubrimiento de Mo-Ni, el cual presenta 2.46 veces menor resistencia que el tratamiento térmico en vacío.

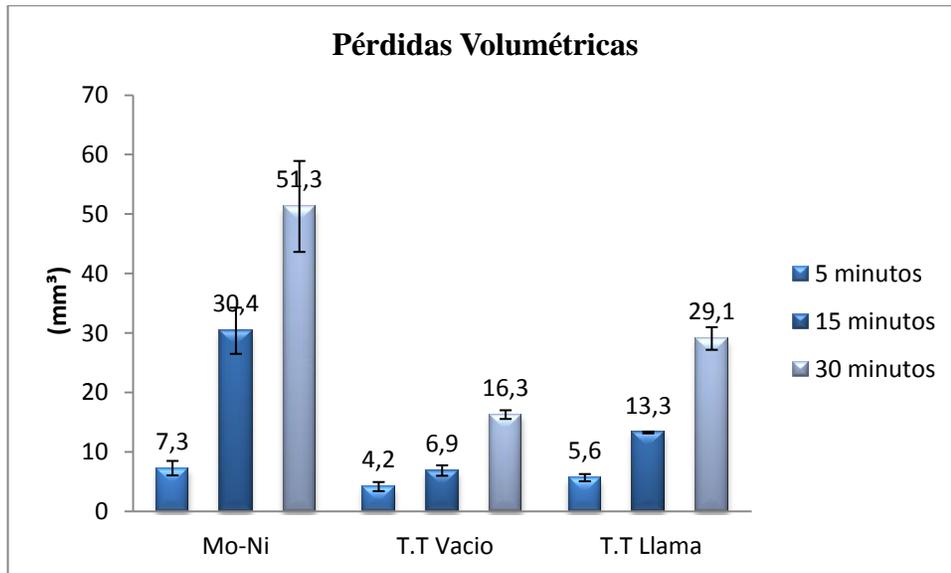


Figura 4-5. Pérdidas volumétricas para el ensayo de abrasión para cada tiempo.

Según el comité para la resistencia al desgaste de la American Society for Metals de 1961 la dureza es el factor más importante en el desgaste abrasivo.

4.11 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO PARA LOS MUESTRAS DE ABRASIÓN.

La Figura 4-21 corresponde a una imagen obtenida por microscopía electrónica de barrido tomada en la superficie de desgaste del recubrimiento Mo-Ni sin tratamiento térmico posterior en la cual se puede observar la presencia de surcos de arado (flechas rojas), desprendimiento de material (círculos azules) y evidencia de deformación plástica (flechas naranjas) los cuales serían los mecanismos de desgaste predominante en esta muestra. También se puede apreciar algunos surcos (ver flechas negras en figura) pero en menor grado.

La Figura 4-21b corresponde a una micrografía en la zona de desgaste a una magnificación de 30X, la cual se puede observar una zona gris oscura y una zona gris clara. El análisis químico semicuantitativo (EDS) realizado en la zona gris clara

indica que en esta zona se encuentran presentes los elementos propios de la aleación Mo-Ni y el oxígeno proveniente del proceso de deposición. La zona gris oscura está formada por hierro en un porcentaje atómico elevado y oxígeno indicando la existencia de un óxido de hierro (probablemente F_2O_3). Esto indica que el tiempo de duración del ensayo ha sido excesivo y por lo tanto se permitió que la remoción de material llegara al sustrato.

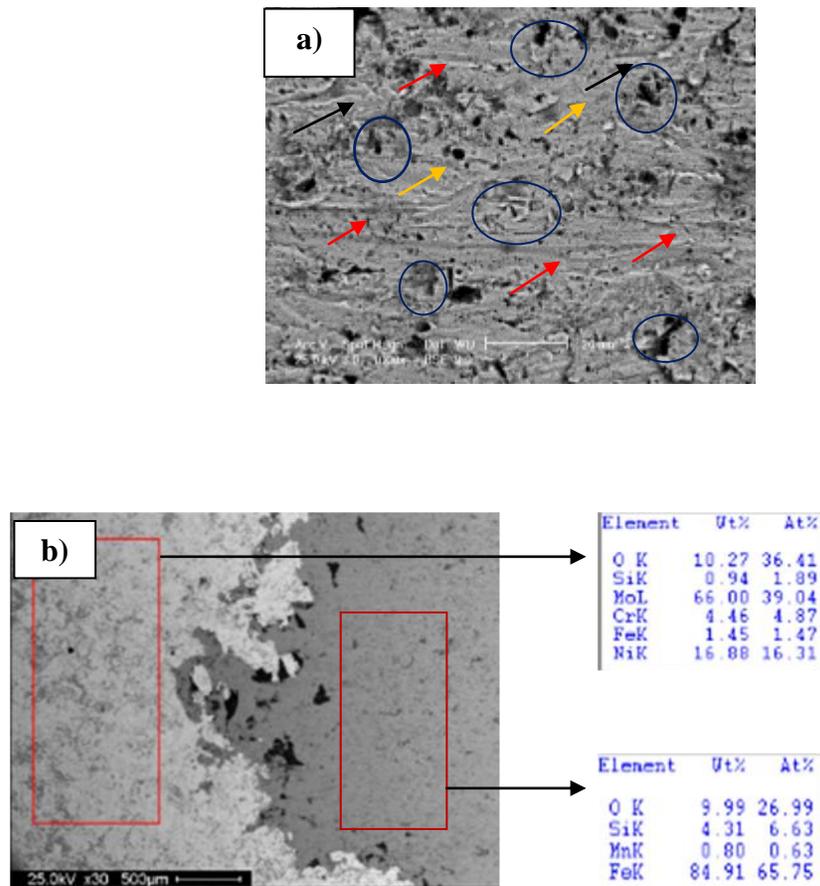
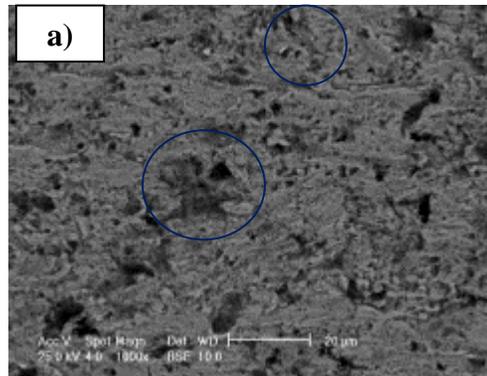


Figura 4-21. Micrografía de la superficie de desgaste por abrasión del recubrimiento Mo-Ni (a) BSE 1000X, y (b) EDS 30X.

La Figura 4-22 corresponde a una imagen de la superficie de desgaste del recubrimiento que ha recibido un tratamiento térmico con llama oxiacetilénica en la

cual se observa la presencia de surcos de arado y desprendimiento de material pero comparada con la muestra sin tratamiento térmico posterior se observa menor evidencia de deformación plástica y menor desprendimiento de material lo cual podría corroborar la mayor resistencia al desgaste por abrasión que presenta este recubrimiento lo cual puede ser atribuido a una mayor dureza, y cohesión de partículas. La Figura 4-22b presenta los resultados del análisis químico semicuantitativo realizado en la zona gris clara y oscura en el cual se puede apreciar que al igual que en el caso anterior, este ensayo también llegó hasta el sustrato. En este análisis químico también se encontró la presencia de aluminio, lo cual puede deberse al proceso de arenado previo a la deposición en la cual las partículas de alúmina quedan incrustadas en el sustrato y no pueden ser removidas durante el proceso de limpieza posterior.



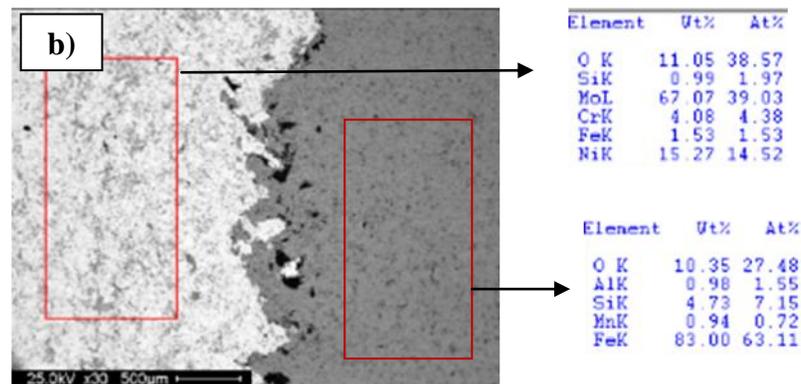


Figura 4-22. Micrografía de la superficie de desgaste por abrasión TT Llama (a) BSE 1000X, y (b) BSE 30X con EDS.

En la Figura 4-23 se muestra una micrografía de la superficie de desgaste del tratamiento térmico horno de vacío en modo de electrones primarios a una magnificación de 1000X en la cual se puede apreciar que este recubrimiento ha sufrido un desgaste menor que el recubrimiento tratado con llama y sin tratar lo cual corrobora los resultados de pérdida volumétrica obtenidos. Se observan algunos surcos de arado y pérdida de material pero en menor proporción. Estos resultados pueden ser atribuidos a que el tratamiento térmico al realizarse en horno en forma controlada permitió una mayor cohesión entre partículas y aumentó de dureza del recubrimiento lo cual en este caso incidió positivamente en la resistencia del desgaste por abrasión. El tiempo de duración de este ensayo también produjo el desgaste del sustrato por lo tanto sería recomendable que en estudios posteriores se realizaran ensayos a tiempos más cortos.

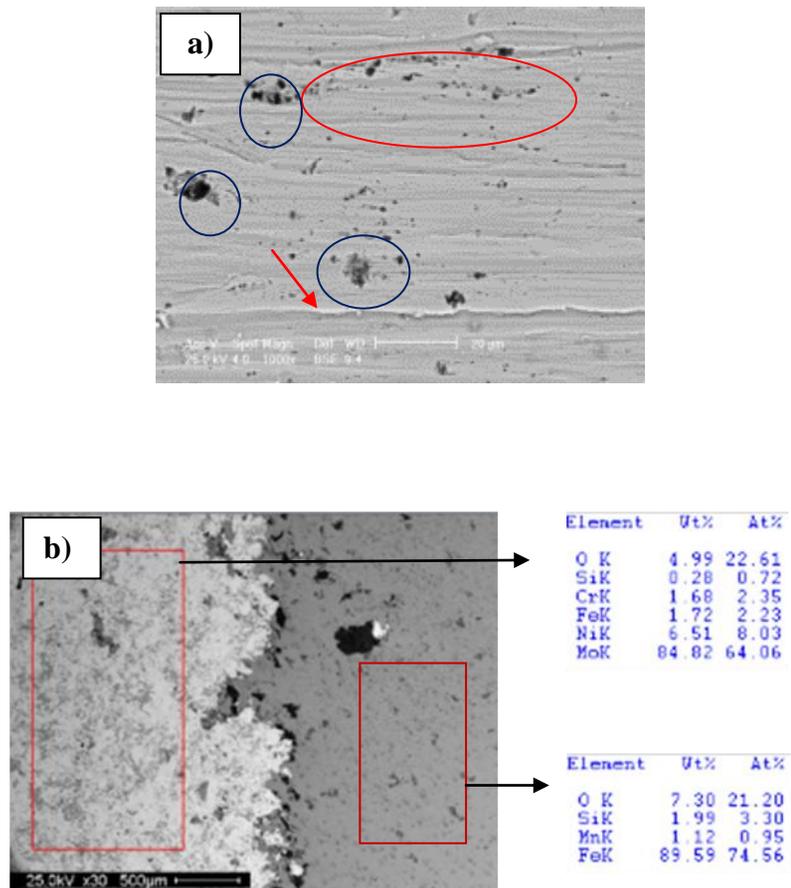


Figura 4-23. Micrografía de la superficie de desgaste por abrasión T.T Vacío (a) BSE 1000X, y (b) EDS 30X.

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se realizó el estudio de un recubrimiento depositado con una aleación Mo-Ni utilizando la técnica de rociado por plasma con la finalidad de evaluar la resistencia al desgaste por deslizamiento y por abrasión. Compararlas con los resultados obtenidos en muestras que recibieron un tratamiento térmico posterior con llama oxiacetilénica y en horno de vacío. Las conclusiones más relevantes serían las siguientes:

- El recubrimiento depositado con la aleación Mo-Ni se comportó 2.2 veces mejor que el recubrimiento que fue tratado posteriormente en horno de vacío y 1.95 veces mejor que el recubrimiento tratado con llama oxiacetilénica. A pesar de que los recubrimientos tratados térmicamente presentaron mejor dureza la tasa de desgaste por deslizamiento fue mayor. Esto puede ser atribuido a que el tratamiento térmico produjo variaciones en la composición química de los óxidos que actúan como lubricantes frente al desgaste por deslizamiento incidiendo negativamente en la resistencia al desgaste del recubrimiento.
- Los mecanismos de desgaste predominantes en el ensayo por deslizamiento fueron el desgaste tipo adhesivo y desprendimiento de material por fractura.
- Se pudo corroborar que a medida que se aumenta la carga aumenta el desgaste por deslizamiento y disminuye el coeficiente de fricción.

- La dureza de los recubrimientos aumento un 28% luego de haber recibido el tratamiento térmico en horno de vacío mientras que el tratamiento térmico con llama sólo la incremento en un 12%.
- Los tratamientos térmicos mejoraron la resistencia al desgaste por abrasión. El recubrimiento que recibió un tratamiento térmico en horno de vacío y el tratamiento térmico con llama oxiacetilénica se desgastaron un 68% y un 44% menos respectivamente que el recubrimiento sin tratar. Estos resultados fueron atribuidos a que este tratamiento produjo una mayor cohesión entre partículas y una mayor dureza lo cual incidió positivamente en la resistencia al desgaste del recubrimiento Mo-Ni.
- Para el ensayo de abrasión los mecanismos de desgaste predominantes son el desprendimiento de partículas y el mecanismo de arado.
- Estos resultados fueron atribuidos a que el tratamiento térmico posterior mejoró la densidad y probablemente promovió una mejor distribución de óxidos a lo largo del recubrimiento.
- Los tratamientos térmicos produjeron un incremento en la resistencia al desgaste por abrasión del recubrimiento Mo-Ni depositado por rociado térmico por plasma pero no produjeron el mismo efecto frente al desgaste por deslizamiento a pesar de que estos tratamientos mejoraron la dureza de los mismos. Esto puede ser atribuido a que el tratamiento térmico mejora la cohesión del recubrimiento lo cual es un factor determinante en el desgaste por abrasión, sin embargo en el desgaste por deslizamiento la presencia de fases que actúan como lubricantes está directamente relacionada con la resistencia al desgaste por deslizamiento. Probablemente los tratamientos térmicos variaron la composición química de estas fases disminuyendo así el

efecto lubricante, lo cual debería ser corroborado realizando análisis de difracción de Rayos X.

5.2. RECOMENDACIONES

- Controlar el proceso de rectificado ya que se encontraron grietas superficiales lo cual probablemente fue debido a un mal procedimiento.
- Realizar ensayos de abrasión a menores tiempos para impedir que el desgaste alcance el sustrato.
- Realizar ensayos de difracción de Rayos X para evaluar el efecto del tratamiento térmico sobre las fases presentes en el recubrimiento sin tratar.
- Automatizar la recolección de los datos de la máquina de ensayos de deslizamiento por arreglo de bloque sobre anillo de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la UCV.
- Realizar un mantenimiento preventivo y correctivo, correas y ejes de la máquina de ensayo de desgaste por deslizamiento.
- Realizar mejoras en el sistema del paso de arena la tolva al interior de la máquina de abrasión.
- Se recomienda calibrar frecuentemente la balanza electrónica para evitar errores de medición.

BIBLIOGRAFÍA

American Society Testing Machine. (2000) Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus1. (ASTM G 65-00). *ASTM*.

American Society Testing Machine. (1998). Standard Test Method for Ranking Resistance of Materials to Sliding Wear Using Block-on-Ring Wear Test. (ASTM G 77-98). *ASTM*.

American Society Testing Materials. (1988). Standard Teste Method for Calibration and Operation of the Falex Block-on-Ring Friction and Wear Testing Machine. (ASTM D 2714). *ASTM*.

Byoungchul Hwang, Sunhank Lee (2004). Correlation of microstructure and wear resistance of molybdenum blend coatings fabricated by atmospheric plasma spraying. *Materials Science and Engineering A*366 152–163.

Cadenas, P., Rodríguez, M. y Staia, M. (2007). *Efecto del tratamiento térmico posterior sobre la resistencia al desgaste por deslizamiento de un recubrimiento base molibdeno níquel depositado por HVOF*. *Revista de Metalúrgica*, 43(1), 121-133.

Conde, V., & Dávila, A. (2007). "*Optimización de un recubrimiento base molibdeno-níquel depositado por la técnica de rociado térmico por plasma*". Tesis de Grado. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica. Caracas, Venezuela.

C. Scandian, C. Boher (2009). Effect of molybdenum and chromium contents in sliding wear of high-chromium white cast iron: The relationship between microstructure and wear. *Wear* 267 401–408.

Deepark Rajput, Kathleen Lansford (2009). Molybdenum-on-chromium dual coating on steel. *Surface & Coatings Technology* 203 1281–1287.

Guo Jin, Bin-shi, Hai-dou Wang (2007). Tribological properties of molybdenum coatings sprayed by electro-thermal explosion directional spraying. *Surface & Coatings Technology* 201 6678–6680.

Hwang, B. y otros (2005). “*Effects of blending elements on wear resistance of plasma-sprayed molybdenum blend coatings used for automotive synchronizer rings*”. *Surface and Coatings Technology*, 194, 256-264.

Jian Liang Li, Dang Sheng Xiong (2008). Friction and wear properties of Ni–Cr–W–Al–Ti–MoS₂ at elevated temperatures and self-consumption phenomena. *Wear* 265 (2008) 566–575.

M. Laribi N. Mesrati, A.B. Vannes, D. Theheux (2003). Adhesion and residual stresses determination of thermally sprayed molybdenum on steel. *Surface and Coatings Technology* 166 206–212.

Sampath, S., [et. al] (2003). “*Development of process maps for plasma spray: case of study for molybdenum*”. *Materials Science and Engineering*. Vol. 384, pp. 54-66.

Shigley, J. (1983). *Diseño de Máquinas*. 4ta. Edición. Edit. McGraw-Hill.

Stolarski, T. y Tobe, S. (2001). “*The effect of spraying distance on wear resistance of molybdenum coatings*”. *Wear*. Vol. 249, pp. 1096-1102.

Tabor, D. (1973). *Friction mechanisms, effect of lubricants*. Tribology Handbook, Butterworth and Co.

Yucel Birol (2010). High temperature sliding wear behaviour of Inconel 617 and Stellite 6 alloys. *Wear* 269 664–671.

ANEXOS

Anexo 1. Mo-Ni

Probeta N°	Masa (g)										Δ Volumen Real (mm ³)		
	Muestra				Pérdida			Δ Corregido			5 min	15 min	30 min
	Inicial	5 min	15 min	30 min	5 min	15 min	30 min	5 min	15 min	30 min			
1	100,8	100,3	98,7	96,0	0,5	2,1	4,8	0,5	2,1	4,9	6,6	26,1	59,8
2	107,1	106,5	104,8	103,9	0,7	2,4	3,2	0,7	2,4	3,3	8,5	29,1	40,4
3	101,3	100,8	98,4	96,9	0,5	3,0	4,4	0,5	3,0	4,5	6,6	36,4	55,4
4	104,1	103,3	101,5	99,7	0,7	2,6	4,3	0,7	2,6	4,4	8,8	31,7	53,9
5	107,3	106,8	104,9	103,5	0,5	2,4	3,7	0,5	2,4	3,8	6,2	28,9	46,9
Promedio											7,3	30,4	51,3
Desviación											1,2	3,9	7,6

Anexo 2. T.T. Vacío

Probeta N°	Masa (g)									Δ Volumen Real (mm ³)			
	Muestra				Perdida			Δ Corregido			5 min	15 min	30 min
	Inicial	5 min	15 min	30 min	5 min	15 min	30 min	5 min	15 min	30 min			
1	104,9	104,5	104,3	103,5	0,4	0,6	1,4	0,4	0,6	1,5	4,7	6,3	16,8
2	104,3	103,9	103,6	102,9	0,3	0,7	1,4	0,3	0,7	1,4	3,6	7,6	15,8
Promedio											4,2	6,9	16,3
Desviación											0,8	0,9	0,7

Anexo 3. T.T. Llama

Probeta N°	Masa (g)									Δ Volumen Real (mm ³)			
	Muestra				Perdida			Δ Corregido			5 min	15 min	30 min
	Inicial	5 min	15 min	30 min	5 min	15 min	30 min	5 min	15 min	30 min			
1	107,3	106,8	106,2	104,9	0,4	1,1	2,3	0,4	1,1	2,4	5,0	13,4	28,6
2	106,6	106,1	105,4	104,0	0,5	1,1	2,6	0,5	1,1	2,6	5,7	13,5	31,2
3	107,1	106,6	106,0	104,9	0,5	1,1	2,2	0,5	1,1	2,3	6,2	13,2	27,4
Promedio											5,6	13,3	29,1
Desviación											0,6	0,2	1,9

BLOQUES

Anexo 4. T.T. Vacío

Ensayo N°	Parámetros		Masa (g)			Volumen de desgaste (mm ³)			Tasa de desgaste x10 ⁻² (mm ³ /m)		
	Carga (N)	Velocidad (m/s)	Inicial	Final	Perdida	Mediciones	Promedio	Desviación	Mediciones	Promedio	Desviación
1	89,0	0,20	8,31	8,26	0,05	5,32	4,73	0,43	0,97	0,86	0,08
2	89,0	0,20	7,56	7,52	0,04	4,77			0,87		
3	89,0	0,20	7,39	7,34	0,04	4,84			0,88		
4	89,0	0,20	7,43	7,39	0,04	4,61			0,84		
5	89,0	0,20	7,63	7,59	0,04	4,11			0,75		

Anexo 5. T.T. Llama

Ensayo N°	Parámetros		Masa (g)			Volumen de desgaste (mm ³)			Tasa de desgaste x10 ⁻² (mm ³ /m)		
	Carga (N)	Velocidad (m/s)	Inicial	Final	Perdida	Mediciones	Promedio	Desviación	Mediciones	Promedio	Desviación
1	89,0	0,20	8,01	7,98	0,03	3,81	4,21	0,72	0,69	0,76	0,13
2	89,0	0,20	7,78	7,74	0,04	5,17			0,94		
3	89,0	0,20	7,41	7,38	0,04	4,31			0,78		
4	89,0	0,20	7,79	7,76	0,03	3,54			0,64		

ANILLOS

Anexo 6. T.T. Vacío

Ensayo N°	Parámetros		Masa (g)			Volumen de desgaste (mm ³)			Tasa de desgaste x10 ⁻² (mm ³ /m)		
	Carga (N)	Velocidad (m/seg)	Inicial	Final	Perdida	Mediciones	Promedio	Desviación	Mediciones	Promedio	Desviación
1	89,0	0,20	21,20	21,16	0,04	5,31	2,74	2,74	0,97	0,50	0,50
2	89,0	0,20	21,38	21,34	0,04	4,64			0,84		
3	89,0	0,20	21,31	21,22	0,09	10,77			1,96		
4	89,0	0,20	21,14	21,06	0,08	10,05			1,83		
5	89,0	0,20	22,02	21,96	0,06	7,60			1,38		

Anexo 7. T.T. Llama

Ensayo N°	Parámetros		Masa (g)			Volumen de desgaste (mm ³)			Tasa de desgaste x10 ⁻² (mm ³ /m)		
	Carga (N)	Velocidad (m/seg)	Inicial	Final	Perdida	Mediciones	Promedio	Desviación	Mediciones	Promedio	Desviación
	89,0	0,20	21,20	21,16	0,04	4,51	5,05	0,89	0,82	0,92	0,16
	89,0	0,20	22,24	22,19	0,05	5,69			1,03		
	89,0	0,20	22,25	22,20	0,05	5,92			1,08		
	89,0	0,20	21,22	21,19	0,03	4,10			0,74		

Anexo 8. Bloques Mo-Ni

Condición	Ensayo N°	Parámetros		Masa (g)			Volumen de desgaste (mm ³)			Tasa de desgaste x10 ⁻² (mm ³ /m)		
		Carga (N)	Velocidad (m/seg)	Inicial	Final	Perdida	Mediciones	Promedio	DE	Mediciones	Promedio	DE
1	13	44,6	0,15	7,57	7,55	0,02	2,50			0,45		
	14	44,6	0,15	7,40	7,38	0,02	2,30	2,33	0,15	0,42	0,42	0,03
	15	44,6	0,15	7,39	7,37	0,02	2,20			0,40		
2	16	44,6	0,20	8,09	8,08	0,01	1,12			0,20		
	17	44,6	0,20	8,17	8,16	0,01	1,76	1,34	0,36	0,32	0,24	0,07
	18	44,6	0,20	8,28	8,27	0,01	1,15			0,21		
3	19	44,6	0,25	8,11	8,10	0,01	1,24			0,23		
	20	44,6	0,25	8,23	8,22	0,02	1,99	1,56	0,39	0,36	0,28	0,07
	21	44,6	0,25	8,03	8,02	0,01	1,44			0,26		
4	22	44,6	0,30	8,01	7,99	0,02	2,34			0,43		
	23	44,6	0,30	8,08	8,06	0,01	1,78	2,09	0,28	0,32	0,38	0,05
	24	44,6	0,30	7,80	7,79	0,02	2,15			0,39		
5	1	67,0	0,15	8,13	8,11	0,02	2,46			0,45		
	2	67,0	0,15	8,24	8,21	0,03	4,02	2,94	0,94	0,73	0,54	0,17
	3	67,0	0,15	8,02	8,00	0,02	2,34			0,43		
6	4	67,0	0,20	8,14	8,11	0,03	3,46			0,63		
	5	67,0	0,20	8,00	7,98	0,02	2,76	2,96	0,44	0,50	0,54	0,08
	6	67,0	0,20	8,16	8,14	0,02	2,67			0,49		

Continuación Anexo 8

Condición	Ensayo N°	Parámetros		Masa (g)			Volumen de desgaste (mm ³)			Tasa de desgaste x10 ⁻² (mm ³ /m)		
		Carga (N)	Velocidad (m/seg)	Inicial	Final	Perdida	Mediciones	Promedio	DE	Mediciones	Promedio	DE
7	7	67,0	0,25	8,08	8,05	0,03	4,22			0,77		
	8	67,0	0,25	8,07	8,04	0,04	4,84	4,12	0,78	0,88	0,75	0,14
	9	67,0	0,25	8,21	8,19	0,03	3,29			0,60		
8	10	67,0	0,30	7,95	7,92	0,04	4,62			0,84		
	11	67,0	0,30	8,01	7,98	0,03	3,93	3,73	1,00	0,71	0,68	0,18
	12	67,0	0,30	7,82	7,80	0,02	2,65			0,48		
9	25	89,0	0,15	8,25	8,24	0,01	1,54			0,28		
	26	89,0	0,15	7,24	7,22	0,01	1,66	1,64	0,10	0,30	0,30	0,02
	27	89,0	0,15	7,95	7,93	0,01	1,73			0,31		
10	28	89,0	0,20	7,88	7,87	0,02	2,09			0,38		
	29	89,0	0,20	7,99	7,97	0,02	2,12	2,17	0,11	0,39	0,39	0,02
	30	89,0	0,20	8,13	8,11	0,02	2,29			0,42		
11	31	89,0	0,25	7,95	7,92	0,04	4,32			0,78		
	32	89,0	0,25	8,01	7,98	0,02	2,62	3,67	0,91	0,48	0,67	0,17
	33	89,0	0,25	8,27	8,23	0,03	4,06			0,74		
12	34	89,0	0,30	8,06	8,03	0,03	3,20			0,58		
	35	89,0	0,30	7,94	7,91	0,03	3,66	3,97	0,96	0,67	0,72	0,18
	36	89,0	0,30	8,07	8,03	0,04	5,05			0,92		

Continuación Anexo 8

Condición	Parámetros			Masa (g)			Volumen de desgaste (mm ³)			Tasa de desgaste x10 ⁻² (mm ³ /m)		
	Ensayo N°	Carga (N)	Velocidad (m/seg)	Inicial	Final	Perdida	Mediciones	Promedio	DE	Mediciones	Promedio	DE
13	37	112,0	0,15	7,95	7,91	0,03	4,26			0,77		
	38	112,0	0,15	8,04	8,01	0,03	3,67	4,65	1,23	0,67	0,85	0,22
	39	112,0	0,15	8,08	8,03	0,05	6,02			1,10		
14	40	112,0	0,20	8,11	8,07	0,04	4,33			0,79		
	41	112,0	0,20	7,83	7,79	0,05	5,82	4,61	1,10	1,06	0,84	0,20
	42	112,0	0,20	8,11	8,08	0,03	3,67			0,67		
15	43	112,0	0,25	7,73	7,68	0,05	6,05			1,10		
	44	112,0	0,25	8,08	8,02	0,07	7,99	6,69	1,13	1,45	1,22	0,20
	45	112,0	0,25	8,13	8,08	0,05	6,02			1,10		
16	46	112,0	0,30	7,58	7,48	0,10	11,84			2,15		
	47	112,0	0,30	8,15	8,07	0,08	10,23	11,26	0,90	1,86	2,05	0,16
	48	112,0	0,30	7,53	7,43	0,10	11,72			2,13		

Anexo 9. Anillos Stellite 6

Condición	Parámetros			Masa (g)			Volumen de desgaste (mm ³)			Tasa de desgaste x10 ⁻² (mm ³ /m)		
	Ensayo N°	Carga (N)	Velocidad (m/seg)	Inicial	Final	Perdida	Mediciones	Promedio	DE	Mediciones	Promedio	DE
1	13	44,6	0,15	20,87	20,82	0,04	5,29			0,96		
	14	44,6	0,15	22,21	22,16	0,05	5,83	4,43	1,98	1,06	0,81	0,36
	15	44,6	0,15	20,68	20,66	0,02	2,17			0,39		
2	16	44,6	0,20	23,34	23,29	0,04	4,92			0,89		
	17	44,6	0,20	21,13	21,10	0,03	3,18	4,29	0,96	0,58	0,78	0,17
	18	44,6	0,20	22,06	22,02	0,04	4,76			0,87		
3	19	44,6	0,25	23,97	23,91	0,05	6,07			1,10		
	20	44,6	0,25	22,40	22,36	0,04	4,92	5,40	0,60	0,89	0,98	0,11
	21	44,6	0,25	21,25	21,21	0,04	5,23			0,95		
4	22	44,6	0,30	22,34	22,29	0,06	6,77			1,23		
	23	44,6	0,30	21,98	21,92	0,06	6,82	6,35	0,78	1,24	1,15	0,14
	24	44,6	0,30	22,78	22,73	0,05	5,45			0,99		
5	1	67,0	0,15	21,63	21,57	0,06	6,79			1,23		
	2	67,0	0,15	20,88	20,82	0,06	7,00	6,74	0,29	1,27	1,23	0,05
	3	67,0	0,15	21,11	21,06	0,05	6,43			1,17		
6	4	67,0	0,20	21,26	21,20	0,05	6,43			1,17		
	5	67,0	0,20	21,54	21,47	0,07	7,76	7,08	0,67	1,41	1,29	0,12
	6	67,0	0,20	20,51	20,45	0,06	7,05			1,28		

Continuación Anexo 9

Condición	Parámetros			Masa (g)			Volumen de desgaste (mm ³)			Tasa de desgaste x10 ⁻² (mm ³ /m)		
	Ensayo N°	Carga (N)	Velocidad (m/seg)	Inicial	Final	Perdida	Mediciones	Promedio	DE	Mediciones	Promedio	DE
7	7	67,0	0,25	21,64	21,59	0,05	6,26			1,14		
	8	67,0	0,25	23,78	23,73	0,05	5,98	6,32	0,38	1,09	1,15	0,07
	9	67,0	0,25	20,35	20,29	0,06	6,73			1,22		
8	10	67,0	0,30	22,76	22,69	0,07	7,90			1,44		
	11	67,0	0,30	22,53	22,47	0,06	7,65	7,50	0,50	1,39	1,36	0,09
	12	67,0	0,30	21,39	21,33	0,06	6,94			1,26		
9	25	89,0	0,15	23,14	23,08	0,06	7,48			1,36		
	26	89,0	0,15	22,21	22,15	0,06	7,62	7,29	0,45	1,39	1,33	0,08
	27	89,0	0,15	20,92	20,86	0,06	6,77			1,23		
10	28	89,0	0,20	22,73	22,67	0,06	7,31			1,33		
	29	89,0	0,20	23,03	22,96	0,07	7,86	7,54	0,28	1,43	1,37	0,05
	30	89,0	0,20	23,60	23,54	0,06	7,46			1,36		
11	31	89,0	0,25	22,11	22,03	0,08	9,85			1,79		
	32	89,0	0,25	22,81	22,73	0,08	9,62	9,13	1,05	1,75	1,66	0,19
	33	89,0	0,25	22,42	22,35	0,07	7,92			1,44		
12	34	89,0	0,30	20,54	20,46	0,08	9,70			1,76		
	35	89,0	0,30	23,27	23,19	0,08	9,40	9,31	0,45	1,71	1,69	0,08
	36	89,0	0,30	21,33	21,26	0,07	8,81			1,60		

Continuación Anexo 9

Condición	Parámetros			Masa (g)			Volumen de desgaste (mm ³)			Tasa de desgaste x10 ⁻² (mm ³ /m)		
	Ensayo N°	Carga (N)	Velocidad (m/seg)	Inicial	Final	Perdida	Mediciones	Promedio	DE	Mediciones	Promedio	DE
13	37	112,0	0,15	21,71	21,65	0,05	6,12			1,11		
	38	112,0	0,15	21,79	21,74	0,05	5,86	6,06	0,18	1,06	1,10	0,03
	39	112,0	0,15	21,72	21,67	0,05	6,19			1,13		
14	40	112,0	0,20	21,24	21,16	0,08	9,55			1,74		
	41	112,0	0,20	22,64	22,55	0,09	10,58	10,15	0,54	1,92	1,85	0,10
	42	112,0	0,20	22,58	22,49	0,09	10,33			1,88		
15	43	112,0	0,25	23,69	23,60	0,08	9,67			1,76		
	44	112,0	0,25	23,38	23,29	0,08	9,73	9,65	0,08	1,77	1,75	0,02
	45	112,0	0,25	22,52	22,44	0,08	9,56			1,74		
16	46	112,0	0,30	23,86	23,78	0,08	9,57			1,74		
	47	112,0	0,30	22,09	22,01	0,07	8,82	8,97	0,54	1,60	1,63	0,10
	48	112,0	0,30	23,65	23,58	0,07	8,51			1,55		