

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

EFECTO DEL TRATAMIENTO TERMOQUÍMICO Y DEPOSICIÓN DE RECUBRIMIENTO COLMONOY 88 SOBRE LA VIDA A LA FATIGA DEL ACERO ESTRUCTURAL SAE 4340.

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela

Por los bachilleres:

Aguilera B. Gabriel A.

Peralta T. Ambar

Para optar por el título de:

Ingeniero Mecánico

Caracas, Noviembre 2014

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

EFFECTO DEL TRATAMIENTO TERMOQUÍMICO Y DEPOSICIÓN DE RECUBRIMIENTO COLMONOY 88 SOBRE LA VIDA A LA FATIGA DEL ACERO ESTRUCTURAL SAE 4340.

TUTOR ACADEMICO: Profesor Crisanto J. Villalobos G.

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por los bachilleres:
Aguilera B. Gabriel A.
Peralta T. Ambar
Para optar por el título de:
Ingeniero Mecánico

Caracas, Noviembre 2014



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:

Ámbar Peralta y Gabriel Aguilera

Titulado

“Efecto del Tratamiento Termquímico y Deposición de Recubrimiento Colmonoy 88 Sobre la Vida a la Fatiga del Acero Estructural SAE 4340”

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

Acta se levanta en la ciudad de Caracas, a los catorce días del mes de noviembre del año dos mil catorce.



Prof. José Gregorio La Riva
Jurado





Prof. José Gregorio La Barbera
Jurado

Prof. Crisanto Villalobos
Tutor

DEDICATORIA

Para mis padres, quienes siempre me han apoyado, tanto en mis triunfos como en mis derrotas, quienes aún al estar lejos me aconsejaron y ayudaron con una simple video llamada.

Para Muriel por estar siempre pendiente de su hermanita menor, por ser mi acompañante para ir al Ávila y apoyarme en todo.

Para Rocío por haberme recibido en su oficina para hablar o para trabajar en la tesis, todos los días que fuera necesario.

A Mundi y Andrés por siempre darme los consejos más acertados para tomar mis decisiones.

Ambar Peralta

DEDICATORIA

A mi padre que es mi mentor, mi modelo a seguir, por sus consejos y llamadas de atención.

A mi madre, mi guía, mi consciencia, gracias por su apoyo incondicional.

A mi hermana por siempre estar pendiente y ser una segunda madre para mí.

Mi familia, por preocuparse y guiarme cuando sea necesario.

A mis amigos, con su apoyo incondicional han logrado de esta una experiencia como ninguna otra.

A mis compañeros de trabajos, por aguantar mis faltas y cubrirme las espaldas.

Gabriel Aguilera

AGRADECIMIENTOS

A nuestro Tutor Académico, el profesor Crisanto Villalobos, quien nos brindó su amistad y apoyo intelectual para poder llevar a buen término nuestra carrera.

Al Profesor Engels Ochoa por su disposición y apoyo durante la realización de este trabajo de grado.

A Oscar Hernández encargado del laboratorio de materiales, por brindarnos apoyo en los ensayos de tracción y en todo lo que fuera posible a lo largo de nuestro trabajo de grado.

A Marwill Quintero por su empeño y dedicación para conseguir la extensión del plazo para la defensa.

Al personal de la Escuela de Ingeniería Mecánica, profesores, secretarías, personal de seguridad, sin su labor nada de esto sería posible.

Al personal del departamento de Microscopía Electrónica de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica.

A nuestros amigos y compañeros, que hicieron de este largo camino más ameno.

Aguilera B. Gabriel A.

Peralta T. Ambar

**“EFECTO DEL TRATAMIENTO TERMOQUÍMICO Y
DEPOSICIÓN DE RECUBRIMIENTO COLMONOY 88 SOBRE
LA VIDA A LA FATIGA DEL ACERO ESTRUCTURAL SAE
4340.”**

Tutor Académico: Prof. Crisanto J. Villalobos G. Tesis. Caracas, Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica. Año 2014. Número de páginas 101.

Palabras Clave: Resistencia a la Fatiga, Nitruración, Termorrociado, HVOF, SAE 4340, Tratamiento Termoquímico, Fatiga, Tracción, Colmonoy 88.

RESUMEN

En el presente trabajo se evaluó el comportamiento a la Fatiga en términos de la resistencia a la vida en un acero SAE 4340 templado, revenido, nitrurado y recubierto con una súper aleación base Níquel, el tratamiento termoquímico se realizó por medio de la técnica de nitruración en horno, y el recubrimiento se realizó por la técnica de rociado HVOF. Se mecanizaron 24 probetas según las normas ASTM A370 y ASTM E606. Para los ensayos de fatiga al aire se seleccionaron 4 niveles de esfuerzo, todos por debajo del esfuerzo de fluencia del material nitrurado y recubierto, estos fueron 565 MPa como valor mínimo, para luego continuar con 591 MPa, 623 MPa y como valor máximo 651 MPa. El estudio se realizó por medio de la construcción de la curva S-N, modelada a partir de las ecuaciones de Basquin, usando datos obtenidos a través de la metodología de Weibull, para luego compararlos con ensayos de SAE 4340 sin tratamiento ni recubrimiento. Los resultados del ensayo de tracción muestran un aumento de las propiedades mecánicas en comparación con SAE 4340. En los ensayos de fatiga se encontró que hubo un incremento promedio de resistencia a la fatiga con respecto al material base de 5%. En el análisis fractográfico realizado por Microscopía Electrónica de Barrido, se observó un desprendimiento del recubrimiento ocasionado por la desviación a través de la intercarade la grieta, al recorrer una mayor distancia aumento la vida de la pieza, la cual culmina con la falla de la misma. El cálculo de la tenacidad de fractura no es posible hacerlo, debido a que el intervalo de tiempo en que se crea la primera grieta hasta que se fractura la probeta es muy corto, impidiendo a que se generen grietas adicionales a la superficie de fractura.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	vii
ÍNDICE DE TABLAS	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
INTRODUCCIÓN	1
1. CAPÍTULO I FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN	3
1.1 ANTECEDENTES.....	3
1.2 OBJETIVOS	4
1.2.1 Objetivo general	4
1.2.2 Objetivos específicos.....	4
2. CAPÍTULO II MARCO TEORICO	5
2.1 Material Base.....	5
2.1.1 Aceros	5
2.1.2 Acero SAE 4340	5
2.1.4 Tratamientos térmicos	7
2.2.1 Nitruado.....	8
2.3 Recubrimiento	10
2.3.1 Generalidades	10
2.3.2 Rociado térmico	10
2.3.3 Procesos de Rociado Térmico	12
2.3.4 Rociado térmico a velocidades hipersónicas HVOF.....	12
2.4 Aplicaciones del proceso de HVOF	14
2.4.1 Restauración de piezas desgastadas.....	14
2.4.2 Protección contra la corrosión	14
2.4.3 Incremento de la resistencia al desgaste	14
2.5 Variables presentes en el proceso de deposición	15
2.6 Fatiga.....	21
2.7 Etapas presentes en el fenómeno de fatiga	23
2.7.1 Primera etapa: Nucleación de la grieta.....	24

2.7.2 Segunda etapa: Propagación de la grieta	25
2.7.3 Tercera etapa: Fractura por sobrecarga	28
2.8 Tipos de esfuerzos presentes en la fatiga	29
2.8.1 Ciclo de inversión total	29
2.8.2 Ciclos de esfuerzos traccionantes repetidos.	30
2.8.3 Ciclo de esfuerzos en tensión con reposo absoluto (carga- descarga).	31
2.8.4 Ciclo de esfuerzos aleatorios.	32
2.9 Límite de fatiga	34
2.10 Vida a la fatiga	36
2.11 Fatiga en materiales recubiertos.....	37
2.12 Curva Esfuerzo vs Número de Ciclos	41
2.13 Modelos curva Esfuerzo vs Ciclos	43
2.14 Modelo probabilístico de Weibull.	44
2.15 Factores que influyen en el comportamiento de la curva S/N.....	46
3. CAPITULO III MARCO METODOLÓGICO	51
3.1 Diagrama de Flujo	51
3.2 Material Base.....	52
3.3 Dimensiones de probetas	52
3.4 Cantidad de especímenes utilizados	54
3.5 Pulido Metalográfico	54
3.6 Proceso de nitruración	56
3.7 Preparación de los Especímenes Previo a la Deposición.....	56
3.7.1 Probetas de tracción y fatiga	56
3.7.2 Granallado o Sand Blasting.....	57
3.7.3 Descripción de los polvos utilizados	58
3.7.4 Dureza del Colmonoy 88	60
3.8 Deposición del recubrimiento	60
3.9 Ensayo de Tracción	63
3.10 Ensayo de fatiga al aire	67

3.11 Ensayo de indentación estática	70
3.12 Estudio fractográfico	72
4. CAPITULO IV ANALISIS Y RESULTADOS.....	74
4.1 Ensayo de tracción	74
4.2 Micro indentación.....	79
4.3 Ensayo de fatiga	83
4.4 Análisis de Microscopia Electrónica de Barrido (MEB)	92
5. CAPITULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	96
5.1 Conclusiones	96
5.2 Recomendaciones	98
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	99

ÍNDICE DE TABLAS

• Tabla 1 Composición química en % de peso del acero SAE 4340.....	6
• Tabla 2 Propiedades del acero SAE 4340.....	7
• Tabla 3 Probetas requeridas para la realización de los ensayos.....	54
• Tabla 4 composición Colmonoy 88.....	60
• Tabla 5 Tabla Ensayo de tracción probeta N°1	75
• Tabla 6 Tabla Ensayo de tracción ProbetaN°1	76
• Tabla 7 Ensayo de tracción probeta N°2	76
• Tabla 8 Ensayo de tracción Probeta N°2.....	77
• Tabla 9 Ensayo de tracción probeta N°3	77
• Tabla 10 Ensayo de tracción Probeta N°3.....	78
• Tabla 11 Ensayo de tracción probeta N°4	78
• Tabla 12 Ensayo de tracción Probeta N°4.....	79
• Tabla 13 Dureza del recubrimiento Colmonoy 88 aplicado al acero SAE 4340	80
• Tabla 14 Dureza Vickers a cargas variables en el recubrimiento	80
• Tabla 15 Dureza del sustrato SAE 4340 nitrurado recubierto.....	82
• Tabla 16 Ensayo de dureza solo con tratamiento termoquímico (Perdigón y Paspigelis 2014)	82
• Tabla 17 Resultados de los ensayos de fatiga a 565 MPa	83
• Tabla 18 Resultados de los ensayos de fatiga 591 MPa.....	84
• Tabla 19 Resultados de los ensayos de fatiga 623 MPa.....	84
• Tabla 20 Resultados de los ensayos de fatiga 651 MPa.....	85
• Tabla 21 Esfuerzos y vida media corregida por Weibull.....	88
• Tabla 22.....	88
• Tabla 23 Datos de la curva obtenida a partir de la gráfica Log(S) vs Log(N) del acero SAE4340 Nitrurado y Recubierto.	89
• Tabla 24 Parámetros obtenidos para la ecuación de Basquin.....	89
• Tabla 25 Resultados ensayo de fatiga acero SAE 4340	90

- Tabla 26 Resultados corregidos de ensayo de fatiga en acero SAE 434091
- Tabla 27 Comparación entre esfuerzos iguales de 4340 y 4340 nitrurado recubierto en escala logarítmica.....92

ÍNDICE DE FIGURAS

• Figura 1 Representación del proceso de termorrociado HVOF	13
• Figura 2 Gráfico de la dureza vs los parámetros de deposición de un recubrimiento de WC-Co (T.Y CHO 2008)	20
• Figura 3 Gráfico de la porosidad vs los parámetros de deposición de un recubrimiento de WC-Co (T.Y CHO 2008)	20
• Figura 4 Gráfico del coeficiente de fricción vs los parámetros de deposición de un recubrimiento de WC-Co (T.Y CHO 2008)	21
• Figura 5 Morfologías características de superficie de fractura ocasionadas por fatiga. (Aviles, 2005).....	23
• Figura 6 Morfologías características vinculadas con factores como varios puntos de nucleación de grietas y las formas originadas a partir de estas particularidades. (Joa, 2010)	28
• Figura 7 Gráfica esfuerzo vs ciclos de carga cíclica a inversión completa.	30
• Figura 8 Gráfica de esfuerzo vs ciclos de una carga cíclica en tensión repetida.....	31
• Figura 9 Gráfica de esfuerzos vs ciclos de una carga cíclica con esfuerzos en tensión con reposo absoluto.....	32
• Figura 10 Gráfica de esfuerzos vs ciclos de un ciclo de esfuerzos aleatorios.....	33
• Figura 11 Curva de Wholer para fatiga.....	36
• Figura 12 Diagrama S-N.....	43
• Figura 13 Influencia de la tensión media σ_m en el comportamiento a la fatiga.....	49
• Figura 14 Diagrama de flujo	51
• Figura 15 Probeta de tracción	53
• Figura 16 Probeta de fatiga	53
• Figura 17 Pulidora de disco Buehler.....	55
• Figura 18 Limpieza con thinner y calentamiento previo al recubrimiento	57

- Figura 19 Sala de granallado o sandblasting y probetas luego de ser granalladas58
- Figura 20 Presentación Comercial de la súper aleación base Níquel, Colmonoy 8859
- Figura 21 Equipo de termorrociado HVOF propiedad de Plasmatec Ingenieros S.A.62
- Figura 22 Proceso de rociado térmico por HVOF.....63
- Figura 23 Máquina de ensayo de tracción Losenhausen, año 196964
- Figura 24 Máquina de fatiga por flexión rotativa marca Fatigue Dynamics, modelo RBF-200.68
- Figura 25 Representación gráfica de la fuerza y el momento en la máquina de fatiga68
- Figura 26 Equipo de microindentación estática BUEHLER71
- Figura 27 Cortadora de disco abrasivo marca BUEHLER SAMPLMET 273
- Figura 28 Equipo de Microscopia Electrónica de Barrido (MEB)73
- Figura 29 Grafico de dureza Vickers vs el inverso de la diagonal promedio81
- Figura 30 Gráfica esfuerzo vs ciclos.....85
- Figura 31 Función de densidad de probabilidad de Weibull para fatiga al aire del acero SAE 4340 nitrurado y recubierto con súper aleación base Níquel87
- Figura 32 Curva Esfuerzo vs Ciclos corregida por Weibull.....88
- Figura 33 Log (S) vs Log (N) del acero SAE 4340 Nitrurado y recubierto con súper aleación base Níquel89
- Figura 34 Comparación Logarítmica del ensayo de fatiga a distintos niveles de esfuerzos entre el acero SAE 4340 nitrurado y recubierto y en su estado original91
- Figura 35 Probeta 19 (651MPa). Corte longitudinal visto a 300X, voltaje de aceleración 18kV92

- Figura 36 Probeta 19 (651MPa). Corte transversal visto a 20X, voltaje de aceleración 18kV93
 - Figura 37 Probeta 2 (565MPa) Corte Transversal visto a 20X, voltaje de aceleración 18kV94
 - Figura 38 Probeta 2 (565MPa) Corte Transversal visto a 20X, voltaje de aceleración 18kV94
-

INTRODUCCIÓN

Es bien conocido dentro de las ramas de la ingeniería, que el rendimiento y desempeño óptimo que nos brindan los materiales que poseen usos industriales o tecnológicos, está íntimamente relacionado con el desarrollo de sus estructuras, recubrimiento, tratamientos y otras variables que afectan en el desempeño de estos materiales durante su vida útil. Hoy en día es necesario invertir gran cantidad de horas hombre en la búsqueda de tecnologías alternativas adaptables a las prácticas tradicionales, que se utilizan en procesos de manufactura, aportando mejoras substanciales a las propiedades que adoptaran finalmente las piezas elaboradas con estas tecnologías. Actualmente el estudio de los materiales es de vital importancia para el desarrollo de nuevas tecnologías, conseguir nuevas y mejores propiedades de los materiales puede generar un gran avance en muchos campos, tales como el campo automotriz. La constante innovación de la industria se ha dado a la tarea de diseñar y construir máquinas cada vez más complejas que exigen cada vez materiales más resistentes y duraderos trae como consecuencia el desarrollo de nuevos estudios en el campo de los materiales y la nanotecnología.

A partir de este contexto, surge entonces la posibilidad de plantearse nuevos y diversos métodos que le aporten propiedades a un sustrato, como lo son los recubrimientos. En los últimos años se han desarrollado varias investigaciones para mejorar las propiedades de materiales añadiéndoles un recubrimiento, estas propiedades variaran dependiendo de los métodos utilizados para depositar el material en el sustrato, un aspecto que también influye en gran proporción en las propiedades finales del material es el uso de tratamientos térmicos. Entre la variedad de los materiales microestructurados conseguimos al Colmonoy 88, una súper aleación en base níquel, de la cual se espera una mejora en la vida a la vida a la fatiga de las probetas tratadas previamente termo químicamente con nitruración.

Ahora bien en los últimos años se han generado grandes progresos en lo referente a la ciencia de los materiales como lo es la incorporación de depósitos altamente coherentes sobre la superficie de los materiales. La finalidad de estos recubrimientos, es mejorar las características de naturaleza superficial que exponen los materiales en general, en los cuales se ven incorporados cambios importantes en propiedades tales como el coeficiente de fricción, la dureza, la resistencia al desgaste, entre otras. Una de estas tecnologías de recubrimiento es el proceso de proyección térmica a velocidad hiper sónica, conocido como HVOF que se caracteriza por sintetizar recubrimientos densos, fuertes y de espesores mucho más gruesos que los otros métodos que involucran por ejemplo fenómenos autocatalíticos. Esta técnica conocida como termorrociado, ha sido ampliamente aceptada como la forma más económica y efectiva para depositar recubrimientos microestructurados, y por lo tanto ha contribuido en una amplia variedad de aplicaciones de alto rendimiento que requieren más resistencia al desgaste, a la erosión, a la corrosión y un mejor aislamiento térmico.

El presente trabajo consta del análisis estadístico de ensayos mecánicos de fatiga y de tracción, en probetas de acero SAE 4340, sometidas al tratamiento termo químico nitruración y recubiertas con una súper-aleación base níquel conocida comercialmente como Colmonoy 88, como fue mencionado anteriormente, este recubrimiento se aplicó por medio del método HVOF. Con los ensayos de tracción se consiguieron los esfuerzos de fluencia necesarios para realizar los ensayos de fatiga, ambos ensayos fueron realizados con el tratamiento termo químico y con el recubrimiento para poder comparar resultados con estudios anteriores. Es objeto fundamental de este trabajo contribuir con los resultados en el sector industrial

CAPÍTULO I

FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 ANTECEDENTES

En 2005 Moreno y colaboradores a partir del ensayo de fatiga a flexión rotativa obtuvieron un incremento de la resistencia a la fatiga de las muestras normalizadas, en contraposición a las muestras recocidas que presentaron una disminución considerable de la misma. Determinando además a partir del análisis fractográfico, que el mecanismo de fractura para los aceros recocidos fue frágil denotado por clivaje, mientras que para los aceros normalizados fue mixto formado por hoyuelos y clivaje

Posteriormente Hernández Jesús y Rada Luis (2011) estudiaron en su trabajo, Evaluación del comportamiento a la fatiga al aire y fatiga corrosión de un acero micro aleado 4340 recubierto con depósitos de WC-12%CO reforzados por nanotubos de carbono, descubriendo que el conjunto sustrato – deposito se comporta de manera similar tanto al aire como en ambiente corrosivo, así mismo mejora la vida en fatiga en comparación al sustrato sin deposito, de igual manera la nucleación de las grietas se produce entre las dos fases a causa de deformidades ocasionadas por el blasting y por partículas de alúmina producto del proceso previo al termorrociado

En 2014 Saúl Paspirgelis y Oscar Perdigón en su trabajo, Estudio de la vida a la fatiga al aire del acero SAE 4340 tratado termoquímicamente con el proceso de nitruración, tomando probetas del acero antes mencionado, templado y revenido posteriormente nitrurado, elaboraron 24 probetas para el estudio, usando 4 niveles de esfuerzo. En el ensayo de tracción demostraron un incremento de las propiedades mecánicas en comparación con el material sin tratar, en el ensayo de fatiga, encontraron un incremento en la vida, de alrededor de un 69% respecto al material sin tratamiento

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo general

Evaluación del efecto que produce la vida a la fatiga de un acero estructural templado y revenido SAE 4340 tratado térmicamente por nitruración y recubierto con depósitos de Colmonoy 88 y sintetizado por HVOF

1.2.2 Objetivos específicos

- Evaluación de propiedades estáticas.
- Caracterización macromecánica del conjunto sustrato recubrimiento en términos de la determinación de su dureza y esfuerzo de fluencia y resistencia a la tracción.
- Evaluación de la resistencia a la Fatiga, a través de la construcción de la curvas S-N correspondientes.
- Modelaje de los datos resistencia-vida a partir de las ecuaciones propuestas por Basquin y Stromeyer previo tratamiento de los datos a través de la metodología propuesta por Weibull.
- Calculo de la tenacidad de fractura a partir de la densidad de grietas
- Análisis fractográfico de la superficie de fractura del conjunto y evaluar el efecto de la película en los mecanismos de fractura.
- Análisis de resultados.

CAPÍTULO II

MARCO TEORICO

2.1 Material Base

2.1.1 Aceros

Acero es la denominación que comúnmente se le da en ingeniería metalúrgica a una aleación de hierro con una cantidad de carbono variable entre el 0,025 y el 2,1% en peso de su composición. Este material es obtenido mediante un proceso de descarburización y eliminación de impurezas al que se somete el arrabio (hierro de primera fundición con alto porcentaje de carbono), este proceso se denomina como afino.

Según su composición los aceros se pueden dividir en dos grandes grupos: Aceros al carbono, formados principalmente por hierro y carbono; Aceros aleados: Contienen, además del carbono otros elementos en cantidades suficientes como para alterar sus propiedades (dureza, puntos críticos, tamaño del grano, templabilidad, resistencia a la corrosión). Algunos institutos que rigen la clasificación de los aceros según su composición son: SAE, SAE, ASTM, NMX, UNS, y en Venezuela son clasificados por COVENIN.

2.1.2 Acero SAE 4340

La clasificación de los aceros y hierros según la SAE (American Iron and Steel Institute o Instituto Americano de Hierro y Acero) se designa con un sistema de 4 dígitos. El primero se refiere a la aleación principal, en este caso el 4 se refiere a un acero microaleado o medianamente aleado. El segundo dígito se refiere a la aleación secundaria que contenga el material, el 3 está asignado al níquel, cromo y molibdeno que en este caso son los elementos aleantes. Finalmente los dos últimos dígitos se refieren al

porcentaje en peso de carbono que se encuentra en la aleación, un 40 en la designación de los últimos dígitos refiere a un 0.4% de carbono en la aleación.

Esta aleación en particular presenta una muy buena resistencia a la fatiga y por esto un amplio uso comercial, es una excelente opción para el diseño de elementos de máquinas y aplicaciones que requieran una alta resistencia mecánica y altas condiciones de servicio. Cabe destacar que estas propiedades pueden variar dependiendo del tratamiento térmico que se le aplica a esta aleación.

En la Tabla 1 se puede apreciar la composición química de una aleación SAE 4340:

Tabla 1 Composición química en % de peso del acero SAE 4340

Elemento	%
C	0,38-0,43
Cr	0,7-0,9
Ni	1,65-2
Mn	0,6-0,8
Mo	0,2-0,3
Si	0,15-0,35
P	0,009
S	0,002
Cu	0,093

2.1.3 Efecto de los elementos aleantes:

- Níquel (Ni): Mejora la resistencia y además evita el crecimiento de grano durante los tratamientos térmicos lo que se traduce en mayor tenacidad.

- Cromo (Cr): Mejora la resistencia a la corrosión, así como también la dureza, la resistencia y la templabilidad.
- Molibdeno (Mo): Aumenta la dureza en caliente, la tenacidad y además forma carburos junto al carbono lo que mejora la resistencia al desgaste.
- Carbono (C): Aumenta la dureza, aumenta la fragilidad y proporciona una mejor resistencia a la tracción.

En la siguiente tabla se presentan las propiedades mecánicas del acero SAE 4340:

Tabla 2 Propiedades del acero SAE 4340

TIPO DE PROCESO Y ACABADO	RESISTENCIA A LA TRACCIÓN MPa(Kgf/mm ²)Ksi	LÍMITE DE FLUENCIA MPa(Kgf/mm ²)Ksi	ALARGAMIENTO EN 2" %	REDUCCIÓN DE ÁREA %	DUREZA BRINELL
CALIENTE Y MÁQUINADO	1227 125 178	689 70 100	10	30	363
TEMPLADO Y REVENIDO	1200 122 173	1124 115 163	16	48	352

2.1.4 Tratamientos térmicos

Los tratamientos térmicos son procesos que permiten modificar las propiedades mecánicas de un material o aleación, tales como la dureza y la resistencia mecánica, sin causar cambios en su composición química, en los cuales la temperatura y el tiempo son las variables principales a controlar. El estado bonificado de un material se alcanza cuando este presenta un tratamiento térmico de temple y revenido.

El temple es un tratamiento térmico que aumenta la dureza, la resistencia mecánica, la tenacidad y a su vez la fragilidad del acero. Este consiste en calentar el acero por encima de su temperatura crítica superior,

para luego ser enfriado bruscamente en un medio comúnmente líquido de agua, aceite, otros fluidos u otras sales fundidas, consiguiendo con esto la formación de martensita, que se traduce en una alta dureza y resistencia mecánica. La tendencia de formación de martensita de un acero se denomina templabilidad y depende principalmente del contenido de carbono del acero.

El tratamiento de revenido consiste en calentar al acero después de normalizado o templado, a una temperatura inferior al punto crítico, seguido de un enfriamiento controlado que puede ser rápido cuando se pretenden resultados altos en tenacidad, o lento, para reducir al máximo las tensiones térmicas que pueden generar deformaciones. El tiempo de calentamiento y la temperatura dependen del contenido de carbono y de los materiales aleantes, así como también de las condiciones que se requieran como resultado del tratamiento.

2.2 Tratamiento Termo-químico

2.2.1 Nitrurado

Se trata de un tratamiento térmico realizado a temperaturas relativamente bajas (500-570° C), que proporciona nitrógeno en la superficie del acero y su difusión hacia el interior, consiguiéndose durezas elevadas. Se aplica normalmente en piezas de acero previamente templado y revenido para lograr un núcleo resistente, capaz de soportar las cargas externas a que están sometidas y que se tramiten a través de la capa dura. El nitrógeno que se incorpora al acero a 500-570°C, tiene, a esa temperatura.

La difusión del nitrógeno hacia el interior se efectúa más difícilmente en los aceros aleados que en los aceros ordinarios al carbono, pero solo en

los primeros se producen capas superficiales de gran dureza y bien adheridas, debido a que los elementos aleados favorecen la formación de Nitruros en las capas periféricas, sean estos de aluminio, cromo, molibdeno, vanadio etc.

Cuando la nitruración se realiza a temperatura conveniente (500°C), los micros constituyentes de la capa exterior son muy difíciles de observar. La penetración del nitrógeno es lenta y con 60 horas de nitruración solo se puede conseguir una capa dura de 0.6 mm de profundidad, siendo aconsejable para una mayor penetración –que oscila desde los 0.7 mm hasta 1 mm de profundidad- el proceso de 72 a 90 horas.

La causa directa del aumento de dureza y resistencia a la fatiga de la capa nitrurada es que los Nitruros que se forman en el proceso originan una fuerte deformación de la red cristalina del acero en su zona periférica.

2.2.2 Ventajas de la nitruración:

a) Dureza elevada: pueden quedar valores de HV 650 a 1100 según el material que se utiliza. Las capas con dureza elevada son menos tenaces que las de menores valores de HV. La capa nitrurada confiere resistencia al desgaste.

b) Ausencia de deformaciones: como la temperatura de proceso no es elevada y no es necesario enfriar rápidamente, se evitan los grandes inconvenientes por deformaciones.

c) Nitrurado selectivo: se pueden proteger perfectamente de la nitruración las superficies que no se desean endurecer, dejando libres las áreas que desean tratarse.

d) Retención de dureza a elevada temperatura: las capas nitruradas conservan la dureza hasta los 500° C, si no es muy prolongado el período de calentamiento. Esta retención de la dureza es superior a otros tratamientos térmicos como cementación, temple por inducción, etc. que, por tener estructuramartensítica, la pierden muy rápidamente a partir de los 200° C.

e) Incremento de resistencia a la fatiga: la distorsión de la red cristalina por la difusión del nitrógeno incrementa la resistencia a la fatiga. Además disminuye los efectos de entalla y corrosión.

2.3Recubrimiento

2.3.1 Generalidades

La tecnología de los recubrimientos es altamente utilizada y su objetivo comprende mejorar las propiedades tribológicas de una superficie, así como sus propiedades mecánicas, su resistencia al desgaste y también se utilizan en algunas ocasiones con fines estéticos, para dar un acabado brillante, duradero o con algún color característico. Existen muchas técnicas para recubrir materiales y por consiguiente la selección de una de ellas dependerá del sustrato, el costo, la composición del recubrimiento, así como también las características deseadas del recubrimiento.

2.3.2 Rociado térmico

El rociado térmico agrupa una serie de procesos en los cuales un material metálico, cerámico o compuesto es calentado por medio de gases combustibles, arco eléctrico o plasma y luego es acelerado a altas velocidades, para impactar un material base o sustrato. Estas partículas al impactar se aplanan en forma de discos llamados splats que se adhieren a las irregularidades de la superficie del sustrato, dicha superficie debe ser

previamente preparada para así lograr un recubrimiento fuertemente adherido y con una dureza comúnmente mucho mayor al del material base.

El ingeniero M.U Shoop fue el responsable del desarrollo comercial de la técnica de rociado térmico. Este ingeniero realizó un experimento que consistió en disparar balas de plomo a altas temperaturas hacia una pared de piedra, y pudo observar como las balas se aplanaron y se expandieron sobre la superficie de la pared formando una especie de recubrimiento. Años más tarde Shoop añadió una mejora que consistía en un diseño de boquilla que producía un flujo angular por el que circulaba gas a altas temperaturas que se encargaba de impulsar metal fundido previamente, esta máquina fue usada por primera vez de manera comercial para depositar recubrimientos en 1910, año para el cual el proceso presentaba dificultades operacionales debido al gran peso de la maquinaria, llegando este a ser de algunos cientos de kilogramos.

El rociado térmico es una técnica ampliamente utilizada gracias a su rentabilidad, a la capacidad de depositar recubrimientos con muy buena adhesión, excelentes propiedades tribológicas y mecánicas, así como también resistencia a la corrosión; y por último la simplicidad y rapidez del proceso, lo que permite depositar recubrimientos duraderos con maquinaria sencilla y operarios con poca experiencia. La industria aeroespacial así como otras nuevas tecnologías son las principales responsables del avance de este proceso, y gracias a esto hoy en día es posible rociar cualquier material que funda como por ejemplo: la mayoría de los metales, algunos cerámicos, plásticos, etc.

2.3.3 Procesos de Rociado Térmico

Entre los procesos de rociado térmico se encuentran dos tipos, procesos de combustión y procesos eléctricos.

- Procesos eléctricos:
 - Rociado por Arco Eléctrico.
 - Rociado por Plasma.

- Procesos de combustión:
 - Rociado por Llama.
 - Rociado por Detonación.
 - Rociado en frío.
 - Rociado Hipersónico (HVOF)

2.3.4 Rociado térmico a velocidades hipersónicas HVOF

Es un método muy usado en la industria de los recubrimientos y funciona básicamente como un motor a reacción, utiliza oxígeno y un gas combustible (propano, propileno, gas natural, hidrógeno o keroseno) que se introducen a grandes presiones (0,5 - 3,5 MPa) en la cámara de combustión donde se produce la llama que es forzada a través de un inyector o boquilla que cumple la función de una tobera convergente-divergente, aumentando su velocidad, para luego entrar en un cilindro de aceleración enfriado por agua. El material de alimentación a recubrir es introducido, junto con un gas de transporte, justo después de la cámara de combustión en la salida del inyector, para luego ser acelerados en el cilindro de aceleración hasta salir a la atmósfera. En este proceso es utilizada mayor energía cinética y menor energía térmica comparada con los otros procesos de rociado térmica tales como arco eléctrico y plasma.

El material de alimentación presenta la forma de polvos que son alimentados directamente en el flujo de gas de alta energía, forzando la salida de estos a través de una boquilla a velocidades supersónicas, *en promedio la velocidad que alcanzan las partículas en este proceso es de 450-500 m/s (MINGHENG LI 2004)*. Es importante destacar que el tamaño de las partículas que forman los polvos de alimentación presentan un tamaño más fino y compacto que las partículas de los otros procesos de rociado, esto es debido a que las partículas están en contacto con la llama por un corto tiempo y la transferencia de calor para partículas grandes es insuficiente, la temperatura de la llama es aproximadamente 3000°C lo que nos permite la deposición de recubrimientos de una gran variedad de materiales.

La alta energía cinética que alcanzan las partículas, aunque menor que la de los gases, es suficiente para formar recubrimientos densos, fuertemente enlazados y con baja porosidad, que presentan pocos esfuerzos residuales, permitiendo así la deposición de recubrimientos más gruesos que los otros procesos. Las partículas no necesariamente tienen que impactar el sustrato en forma totalmente líquida para formar recubrimientos de buena calidad.

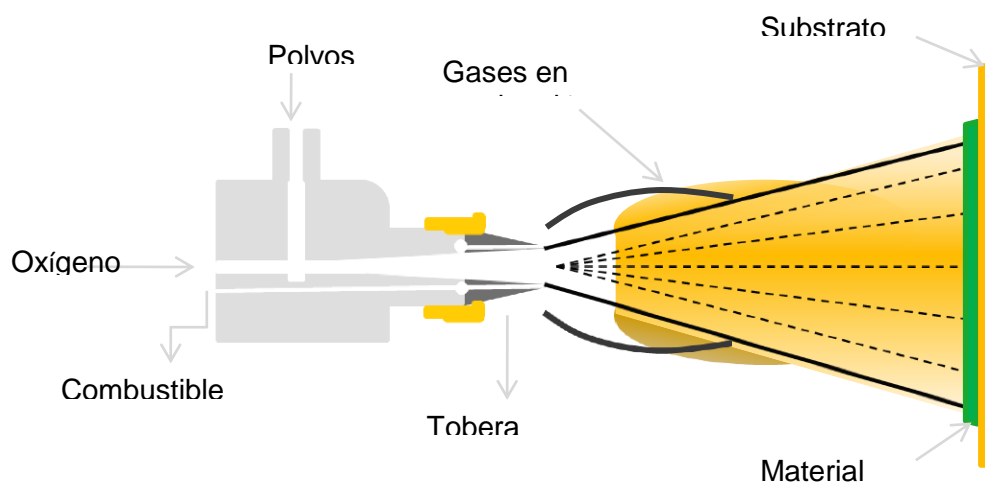


Figura 1 Representación del proceso de termorrociado HVOF

2.4 Aplicaciones del proceso de HVOF

2.4.1 Restauración de piezas desgastadas

Desde sus inicios este fue el uso más extendido, desplazando en muchos casos al proceso de soldadura, ya que permite una buena adherencia con la ventaja de poder llegar a geometrías complicadas y sin el problema de la zona afectada por el calor que presenta la soldadura, además del cambio de las propiedades mecánicas que esta zona evidencia. Aunado a esto se presenta la posibilidad de usar una gran variedad de materiales con propiedades particulares para recubrir la zona desgastada dependiendo del uso de dicha pieza, propiedad imposible en la soldadura.

2.4.2 Protección contra la corrosión

La técnica de rociado HVOF permite depositar recubrimientos de películas de baja reactividad que producen estanqueidad entre el medio y el sustrato, dichos recubrimientos han sustituido técnicas como el cromado o la electrodeposición de níquel en aplicaciones particulares debido a ser más amigables con el medio ambiente, costo o sencillamente por la facilidad de aplicación. Los recubrimientos depositados bajo esta técnica son más eficientes que los depositados por plasma y esto se debe a la baja temperatura de la llama que conlleva a una menor degradación de carburos.

2.4.3 Incremento de la resistencia al desgaste

Este es uno de los usos más importantes de este tipo de recubrimientos, ya que éstos presentan en la mayoría de los casos una dureza mucho mayor a la del sustrato. En los recubrimientos depositados por HVOF el incremento en la resistencia al desgaste se da como consecuencia de un aumento de la dureza en la superficie libre, sin embargo puede verse afectada por la descarburización, en cuyo caso el control de proceso durante

la deposición juega un papel fundamental en este sentido. Ahora bien en general con prácticas operativas adecuadas el área recubierta presenta una mayor resistencia al desgaste ya sea la interacción con el medio de naturaleza erosivo, abrasiva, químicamente agresiva o corrosivo y adhesivo (YUNFEI QIAO 2002).

2.5 Variables presentes en el proceso de deposición

2.5.1 Velocidad de alimentación de los polvos

La velocidad de alimentación de los polvos hacia la cámara de combustión dicta la cantidad de partículas que son proyectadas hacia el sustrato por unidad de tiempo, si la velocidad de alimentación es muy alta esto accionará el rociado de exceso de polvo, dando como consecuencia que una cantidad de partículas no lleguen a fundirse y esto resulta en un recubrimiento con mucha menor adhesión al sustrato y menor resistencia al desgaste, además de un recubrimiento bastante heterogéneo desde el punto de vista de dureza y propiedades mecánicas puntuales. De manera contraria si la velocidad de alimentación es muy baja el proceso se torna poco eficiente ya que se deben realizar un mayor número de pasadas para lograr el espesor de recubrimiento deseado y con esto se tiene un mayor gasto en oxígeno, combustible y horas hombre en la realización del proceso.

2.5.2 Distancia de rociado

La distancia desde la boca de la pistola hasta el sustrato condiciona directamente las propiedades y características del recubrimiento, los fabricantes de materiales o polvos para recubrir generalmente suministran una distancia de rociado adecuada para su producto, sin embargo el operario también utiliza su experiencia y su pericia para hallar la distancia óptima según los resultados.

Si la distancia de rociado es muy grande disminuye la velocidad de las partículas y así su energía cinética, además el tiempo de exposición a la atmósfera es mayor. Esto trae como consecuencia mayor descarburización y porosidad en el recubrimiento ya que las partículas están mayor tiempo en contacto con el medio altamente oxidante de la atmósfera y esto da pie a la formación de óxidos, gases. Las partículas de polvo salen de la pistola en una condición parcial o totalmente fundida y se ven enfriadas en la atmósfera, mientras más largo sea su tiempo de vuelo hacia el sustrato mayor será la oxidación de dicha partícula y esto acarrea capas de óxido entre las capas de recubrimiento.

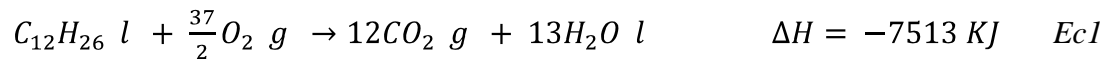
A su vez si la distancia de rociado es muy corta se evidencia una mayor temperatura del sustrato que acarrea una mayor oxidación del mismo, además de la poca exposición a la llama por parte de las partículas de polvo, lo que trae como consecuencia poca cantidad de partículas fundidas y altísima velocidad al impactar el sustrato, todo esto resultando en un recubrimiento con menor dureza y con menor adherencia entre capas.

Es importante destacar que la distancia de rociado se ve influenciada por el tamaño de las partículas de polvo a rociar, ya que la inercia de éstas influye en la velocidad con que impactan el sustrato, y como consecuencia de esto el tiempo de permanencia en la llama.

2.5.3 Relación oxígeno-combustible

La relación oxígeno-combustible (λ) se refiere al cociente entre la relación oxígeno-combustible existente y la relación estequiométrica. En el proceso de HVOF se pueden utilizar diferentes combustibles dependiendo de la pistola utilizada y de la temperatura que se desea alcanzar en el proceso. Los equipos o pistolas de generaciones previas utilizan ya sea propano, hidrógeno o etileno permitiendo así una variedad de temperaturas de llama

para diferentes condiciones de rociado; los de última generación utilizan combustible para cohetes o como es conocido comercialmente kerosene. En el caso de nuestro estudio se utiliza la pistola de última generación JP-5000 que utiliza como combustible kerosene, en la siguiente relación estequiométrica:



Si la relación λ es igual a 1 se alcanza la temperatura pico de la llama teniendo así partículas completamente fundidas con velocidades altas, esto proporciona una mejor adherencia al sustrato. En el caso contrario si se utiliza una relación pobre o menor a 1 se tiene oxígeno sobrante que enfría la mezcla y a su vez crea una atmósfera de llama muy oxidante y perjudicial, dando como resultados recubrimientos porosos. Se obtienen recubrimientos más duros y fuertes con una llama caliente pero neutra y se le atribuye a una fundición completa de las partículas antes de impactar el sustrato (YunfeiQiao 2002).

Uno de los problemas de esta técnica de deposición consiste en la degradación, el contenido de estas nuevas fases en el recubrimiento depende principalmente de la relación oxígeno combustible, ya que la temperatura y el contenido de oxígeno libre en la combustión tienen un papel protagónico en la forma como estas fases son producidas. Estas nuevas fases son producidas por tres mecanismos que van acompañados a la pérdida de carbono (C) en el sistema (descarburización).

Esta reacción no se da, o por lo menos no es el mecanismo predominante, en el proceso de HVOF debido a que la temperatura alcanzada en dicho proceso no es lo suficientemente alta.

El segundo mecanismo consiste en la oxidación directa, esto ocurre gracias al contacto de la partícula con la atmósfera oxidante que se da en

una combustión incompleta y también gracias al contacto de la partícula con el medio ambiente, ya que cuando una partícula es depositada ésta se enfría y espera a ser cubierta por otra capa en contacto con la atmósfera rica en oxígeno del ambiente.

El carbono puede ser removido del líquido ya sea reaccionando con el oxígeno en la interfaz líquido-gas, o por la difusión del oxígeno desde la interfaz hacia dentro de la partícula fundida, dando como resultado la formación de monóxido de carbono (*Z.-G. Ban 2001*).

En concordancia con lo anterior (*J. Berget 2007*) obtuvo como resultado que a temperatura de llama baja se degrada menos y se obtienen mejores propiedades, en cuanto a corrosión se refiere, cuando los polvos están constituidos por granos pequeños. Es por esto que λ es una de las condiciones de operación que más influye en las características del recubrimiento a obtener y es uno de los parámetros que se debe controlar con más precisión.

2.5.4 Presión en la cámara de combustión

La presión en la cámara de combustión viene dada por la relación oxígeno combustible ya que ésta es la que determina la cantidad de energía liberada en la combustión, esta energía calórica es transformada en presión gracias a que la cámara de combustión presenta un volumen constante. A presiones grandes la velocidad alcanzada por los gases será mayor así como también la temperatura de la llama, mientras que bajas presiones se traducirán en menores aceleraciones y a su vez menor velocidad de los gases y las partículas proyectadas.

2.5.5 Morfología de los polvos

Está claro que en un proceso en el cual la velocidad y la temperatura, o grado de fundición de una partícula, son las principales variables que afectan el resultado, el tamaño y forma de los polvos de alimentación que serán proyectados también será de gran importancia. No sólo desde el punto de vista térmico en el cual la transferencia de calor y el área superficial de los granos controlan la descarburización y el grado de fundición, sino que también se pueden observar comportamientos específicos debidos enteramente al tamaño de grano, un ejemplo de este fenómeno sería que cuando se utilizan polvos de gran tamaño de grano (3 – 7 μm), ya que éstos gracias a su masa considerable causan en el sustrato intromisión de partículas de WC y por supuesto los esfuerzos compresivos que esto implica, obteniendo así no solo una interfaz con gran resistencia a la fractura y adherencia, sino también una mejora en comportamiento a cargas cíclicas del material debido a los esfuerzos compresivos (*M. Watanabe 2005*).

Además del tamaño la forma de los polvos es un parámetro importante, ya que los polvos obtenidos por la atomización de un gas son esféricos, mientras que los atomizados por agua y los obtenidos por molienda son angulares. Los polvos con una distribución homogénea de tamaño de grano producen recubrimientos con mejores propiedades que los que presentan una distribución heterogénea (*J. Berget 2007*).

En el año 2008 T.Y CHO y equipo presentaron su trabajo donde se evidenció que la dureza del recubrimiento es altamente dependiente del tamaño de grano del polvo y también de los parámetros de deposición, ya que éstos tienen gran influencia en la fundición y posterior adherencia al sustrato. Además de esto los autores variaron los parámetros de deposición y graficaron los resultados que estos ocasionaban individualmente en la dureza, en la porosidad y en el coeficiente de fricción de los recubrimientos depositados. En este trabajo se puede ver la dependencia que tiene la

calidad del recubrimiento con las variables de deposición, ya que una leve variación de alguna variable tiene efectos importantes en características y propiedades del recubrimiento final.

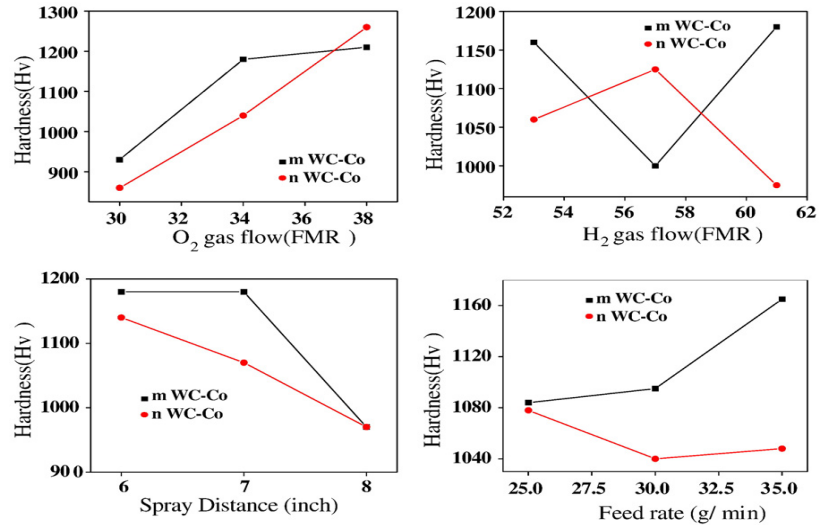


Figura 2 Gráfico de la dureza vs los parámetros de deposición de un recubrimiento de WC-Co (T.Y CHO 2008)

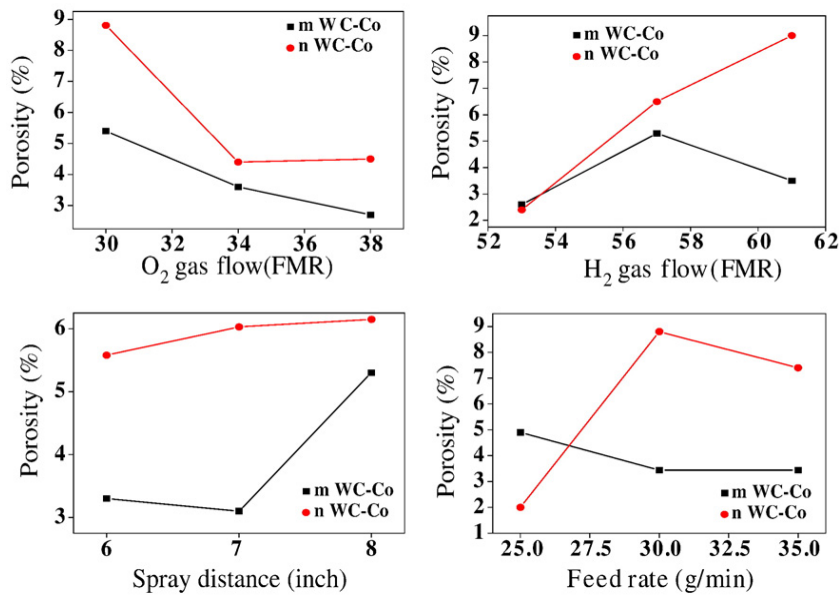


Figura 3 Gráfico de la porosidad vs los parámetros de deposición de un recubrimiento de WC-Co (T.Y CHO 2008)

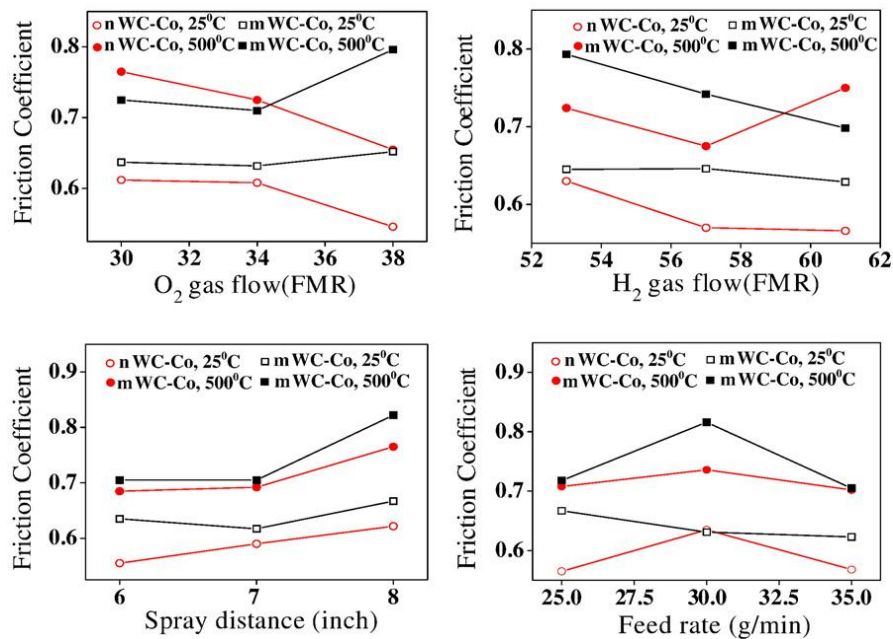


Figura 4 Gráfico del coeficiente de fricción vs los parámetros de deposición de un recubrimiento de WC-Co (T.Y CHO 2008)

2.6 Fatiga

La falla de elementos en la ingeniería es un factor indeseado que determina, en numerosas ocasiones; la entera concepción de un producto ya que establece el principal criterio de diseño para el mismo. Este suceso involucra peligros inherentes a la actividad como accidentes laborales y pérdidas humanas, pérdidas monetarias derivadas de la re-producción del elemento perdido, perdidas de materiales, paralización de actividades entre muchos otros factores que intervienen en el curso natural de procesos y actividades domésticas o industriales. El fenómeno de fatiga ha sido ampliamente estudiado por las razones expuestas y queda de parte del ingeniero el estudio de este fenómeno para determinar la vida útil de un elemento bajo unas condiciones determinadas.

Ahora bien, si es cierto que los esfuerzos a los que se encuentran sometidos los elementos dentro de su intervalo de operación establecido en el diseño son bajos, la concentración de tensiones locales originadas por esfuerzos fluctuantes, generan fallas en los materiales debido a fatiga, ocurriendo una falla total del elemento y sin indicios visibles de deterioro anterior a la fractura total.

La fatiga se fundamenta en un cambio estructural progresivo, localizado y permanente que ocurre en un material que esté sometido a cargas con un ciertos patrones de repetición, que puede tener como valor máximo un intervalo menor que el esfuerzo de fluencia del material, que va originando la formación de grietas y a su vez dan paso a la fractura total, en el caso que sea sometido a un número determinado de ciclos que excedan su límite de vida a la fatiga, y dichas condiciones de esfuerzos dependen de las características del material y su utilización.

La superficie de fractura por lo general se encuentra orientada formando 90° con respecto a la dirección de esfuerzo principal de tracción, y en escala macroscópica son reconocidas por las regiones definidas en su superficie. Se evidencia una superficie lisa originada por el contacto de planos y la propagación de la grieta a través de la sección; y una región rugosa originada por la fractura catastrófica debido a la disminución de área efectiva que origina la fractura por sobrecarga.

Las fracturas originadas por fatiga requieren de la presencia de elementos como esfuerzos de tracción, esfuerzos cíclicos y deformación plástica localizada, para que se inicie y propague el proceso de agrietamiento en la pieza. Además de estos factores existen otras condiciones que afectan el comportamiento de la fatiga como las concentraciones de esfuerzos, la corrosión debido a la presencia de algunos agentes, temperatura, tensiones residuales y combinadas así como la morfología de la microestructura.

2.7 Etapas presentes en el fenómeno de fatiga

Al observar la superficie de fractura en un elemento que falló debido al fenómeno de fatiga, se puede apreciar una apariencia que se asemeja a una fractura frágil, ya que no posee deformaciones notables en la sección y además de esto se pueden identificar y diferenciar claramente tres zonas principales definidas morfológicamente y reconocibles macroscópicamente.

Una primera etapa donde la superficie se muestra usualmente lisa, una segunda etapa donde la superficie pasa a volverse áspera a medida que la grieta original crece, y una etapa final donde la superficie posee un aspecto fibroso. Además de esto, se puede obtener una buena aproximación de factores determinantes en la falla del elemento con tan solo un estudio inicial; como ubicar el punto de nucleación de la grieta que originó la fractura y las etapas aproximadas de avance de la grieta en el proceso.

La figura 5 muestra de forma esquematizada la topografía característica apreciable macroscópicamente que se encuentra en la mayoría de las superficies de fractura de elementos que estuvieron sometidos a esfuerzos alternantes y sucumbieron en falla por fatiga.

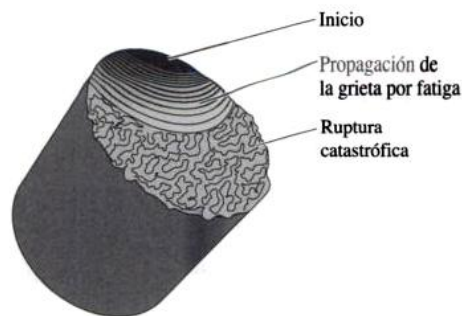


Figura5 Morfologías características de superficie de fractura ocasionadas por fatiga. (Aviles, 2005)

2.7.1 Primera etapa: Nucleación de la grieta

Esta etapa se caracteriza por la formación de la grieta y su propagación en el plano de deslizamiento donde ocurre la fractura, avanzando desde su punto de nucleación formando un ángulo de 45° localmente con respecto a la dirección del esfuerzo axial. Por lo general, en esta primera etapa la iniciación de la fractura no se extiende más de 5 granos en las inmediaciones del origen de la grieta. En esta primera etapa se puede visualizar un plano cristalográfico bien definido en cada avance de granos, y por lo general no se consiguen estriaciones de fatiga asociadas a esta superficie. Es importante hacer notar que dependiendo de la naturaleza del material, el ambiente de operación del elemento y otros factores que corresponden a las características del entorno del fenómeno, puede que la fractura en esta primera etapa no sea apreciable.

Es bien sabido que debido a procesos de fabricación, naturaleza de formación u otros factores todos los materiales tienen discontinuidades de distintos tipos, de hecho, materiales manufacturados por métodos sofisticados con control absoluto de condiciones y procesos contienen poros y precipitados que alteran la homogeneidad del material. Es debido a estas razones que siempre se encontraran concentradores de esfuerzo a partir de donde se pueden propagar y desarrollar las grietas microscópicas en la primera fase de fractura.

Para esta etapa de fractura el crecimiento de grietas ocurre a bajas velocidades de propagación en el orden de 1×10^{-10} metros por cada ciclo, y la grieta microscópica es obstruida por los bordes de grano y demás barreras microestructurales haciendo que el avance sea dificultoso hasta el punto de detenerse en su totalidad.

En el caso de la superficie estos factores que involucran discontinuidades son más comunes debidos a presencia de picaduras por

ambientes corrosivos, marcas de mecanizado, acabados del material entre otros, y además en es en este área donde se encuentran los esfuerzos máximos a los que se somete un elemento; factores por los cuales es en la superficie exterior de los elementos, donde se propicia comúnmente la aparición de grietas a consecuencia de la deformación plástica bajo un patrón de repetición.

La mencionada deformación plástica bajo patrón repetitivo o alternante, origina extrusiones e intrusiones en la superficie de fractura, que se caracterizan como surcos y dan origen a las bandas de deslizamiento en dicha superficie. En la deformación cíclica las bandas de deslizamiento son denominadas persistentes y es en esta sección donde se producen las grietas iniciales de fractura y se prolongan a lo largo de planos que se enfrentan a esfuerzos de corte de gran magnitud.

Es solo cuando la carga a la cual está sometida el elemento es suficientemente alta y/o con la cantidad necesaria de ciclos, cuando la propagación de la grieta es reiniciada y prolongada al grano adjunto y así sucesivamente (Powell & Mahmoud, 1986).

2.7.2 Segunda etapa: Propagación de la grieta

Para la segunda etapa la grieta continúa su crecimiento y propagación debido al esfuerzo normal máximo principal, en la periferia del extremo de la grieta. De esta forma la grieta se ve obligada a desviarse del camino original del plano de deslizamiento y toma una dirección perpendicular a la dirección del esfuerzo máximo.

En esta etapa la grieta asume un crecimiento a velocidades más elevadas y las estriaciones formadas en esta fase, van apareciendo en la medida que la grieta se desplaza en la sección de fractura del elemento. En

el estudio de esta fase nos valemos de las estriaciones para determinar el origen de la grieta de fractura y la dirección en la cual las grietas se propagan, además de poder determinar la velocidad de propagación.

En esta fase la propagación de la grieta puede ser caracterizada por formaciones superficiales definidas como son las marcas o huellas de playa, marcas radiales y estriaciones. Son denominadas marcas de playas a estas primeras formaciones presentes en la fase ya que se muestran como anillos concéntricos y crecientes que tienen como origen la ubicación del inicio de la fisura.

Esta morfología es visible macroscópicamente y su aparición se debe básicamente a los cambios en las cargas a los cuales estuvo sometido el material, o la frecuencia de repetición de dichas cargas ya que al detenerse el avance en uno de los ciclos ocurre un proceso de oxidación, que origina la huella de color y textura diferenciada con respecto a las originadas en el periodo anterior, y así sucesivamente en el proceso de propagación. Dicho esto, los elementos que se someten a cargas sin periodos de arresto ocasiona que las grietas no se detengan, y al ocurrir esto, por lo general; no se presentan las mencionadas marcas de playa.

Otra formación característica en la superficie originada por la segunda etapa son las estriaciones de fatiga. Estas son de tamaño microscópico y pueden ser observadas solo bajo el método de microscopía electrónica de barrido (MEB), y en algunos casos debido a las condiciones de superficie de fractura, es requerido el uso de réplicas fractográficas para su observación. El significado de las estriaciones radica en la representación de la distancia de avance de la grieta durante cada ciclo de carga simple. La morfología de dichas estriaciones depende de las características del esfuerzo, como por ejemplo, el ancho de las mismas se incrementa con el aumento del intervalo donde se encuentra presente el esfuerzo de tracción.

Es importante hacer notar que estas dos formaciones derivadas del fenómeno de fatiga en la superficie de fractura, difieren en gran medida en cuanto a escalas y orígenes, aunque su morfología consta de las mismas formaciones de aros concéntricos a un punto en común, pueden existir decenas e incluso miles de estriaciones de fatiga incluidas en una sola marca de playa. Sin embargo la presencia de estas dos formaciones en una superficie de fractura confirma definitivamente el hecho que la falla ocurrió por el proceso de fatiga, pero partiendo de este hecho la ausencia de alguna, o ambas formaciones de esta naturaleza no excluyen a la fatiga como causante de la fractura en el elemento.

Para el estudio de estas formaciones es pertinente tomar en cuenta que existen casos en los que la grieta se propaga de diferentes formas a través de la superficie de fractura, esto debido principalmente a factores como nivel de esfuerzo aplicado, tipo de ensayo utilizado en la pieza, condición superficial del elemento, composición química del material, entre otros.

Estos factores condicionan las dos etapas principales de fatiga que serían la nucleación y propagación de la grieta, desencadenándose en varios puntos de origen de la grieta y geometrías diferentes de propagación y de estructuras características en la superficie que ha sido fracturada como puede apreciarse en la figura 6. (Powell & Mahmoud, 1986)

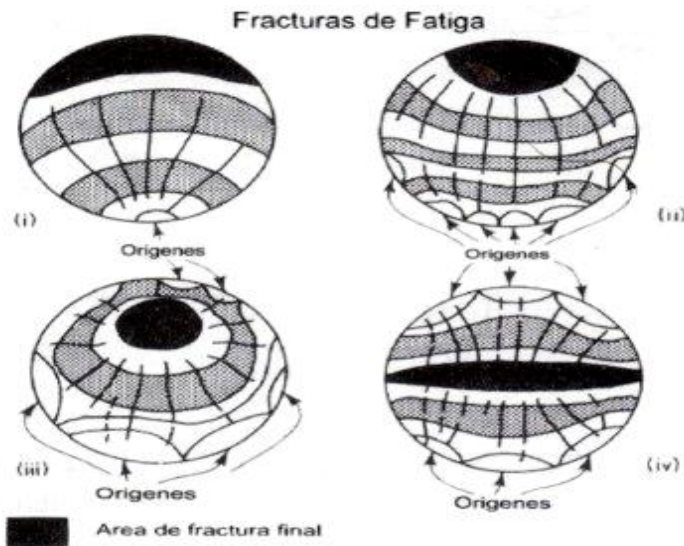


Figura6 Morfologías características vinculadas con factores como varios puntos de nucleación de grietas y las formas originadas a partir de estas particularidades. (Joa, 2010)

2.7.3 Tercera etapa: Fractura por sobrecarga

Esta etapa se desarrolla en el último ciclo de esfuerzo, cuando la cantidad de material de la sección restante en la superficie de fractura del elemento es muy pequeño y no es capaz de soportar la carga aplicada hasta fallar de forma repentina. Por lo general, esta sección de la superficie de fractura carece de mucho interés para el estudio ya que la velocidad de propagación y crecimiento es tan acelerada que la cantidad de ciclos que lleva el desarrollo de esta fase no se muestra relevante en lo absoluto en comparación con el ciclaje de vida de las fases anteriores

El aspecto característico de esta zona puede caer dentro de dos generalidades, indicando que si la zona presenta un aspecto y textura cristalina, la fractura fue de tipo frágil y por el contrario si se presenta con una apariencia fibrosa, es indicativo de una fractura de tipo dúctil. La cantidad de sección involucrada en esta etapa depende básicamente de la magnitud de las cargas aplicadas, y en el caso de la morfología característica es

dependiente de la forma, dimensiones y dirección de la carga en la parte del elemento fracturado. (Powell & Mahmoud, 1986)

2.8 Tipos de esfuerzos presentes en la fatiga

Los esfuerzos presentes en los elementos de máquina en operación tienen patrones definidos de comportamientos, y como se comentó anteriormente en este trabajo, dichos elementos deben estar sometidos a cargas con esfuerzos que siguen una repetitividad o un comportamiento alternante a lo largo de un periodo de tiempo definido para dar paso al fenómeno de fatiga.

Estos patrones de esfuerzos con cierta repetitividad forman etapas que corresponden a periodos completos que pueden ser observados y estudiados a través de representaciones gráficas.

Al estudiar la naturaleza de las cargas a las cuales se someten estos elementos se pueden llegar a definir comportamientos y clasificar la expectativa de vida de un material bajo ciertas condiciones de operación. Para estas clasificaciones se toma en cuenta un gráfico donde la representación del eje "Y" corresponde a la parte positiva para esfuerzos de tracción, el valor nulo corresponde a una zona de descanso donde no existen esfuerzos aplicados al elemento y la parte negativa representa los esfuerzos de compresión encontrados en el ciclo de vida. Mientras el eje "X" es representación del tiempo en ciclos de vida del material.

2.8.1 Ciclo de inversión total

En este caso se denomina ciclo de inversión total porque en el mismo periodo de cargas sometidas al material existe un instante de tiempo donde

se alcanza un valor máximo de esfuerzo de tracción tomando una magnitud positiva y al seguir el curso del tiempo el esfuerzo se invierte totalmente para alcanzar un valor de compresión de exacta magnitud al alcanzado en el de tracción pero de signo negativo, logrando así un valor de esfuerzo medio igual a cero (0), como se muestra en la figura 7.

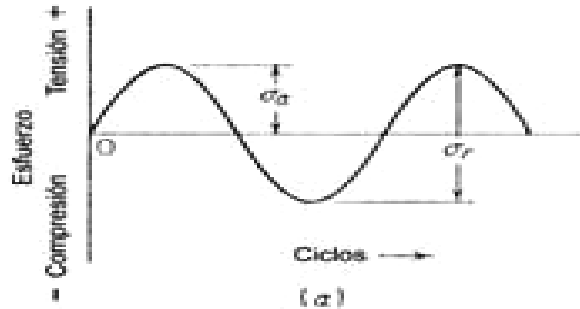


Figura 7 Gráfica esfuerzo vs ciclos de carga cíclica a inversión completa.

La representación de este tipo de esfuerzos se corresponde a un comportamiento donde se tenga presente un esfuerzo alternante regular donde en intervalos de tiempos iguales el material se somete a cargas de tracción y seguido a esto de compresión con la misma magnitud de esfuerzos, consiguiéndose en aplicaciones como en máquinas rotativas donde se alterna la naturaleza del esfuerzo por cada revolución del eje, logrando periodos uniformes de inversión de esfuerzos totales. (Powell & Mahmoud, 1986)

2.8.2 Ciclos de esfuerzos traccionantes repetidos.

En este tipo de esfuerzos se presentan distintos niveles de esfuerzos crecientes y decrecientes con la particularidad que se encuentran siempre en tensión, la parte positiva del grafico esfuerzo vs número de ciclos,

representando esfuerzos variantes pero siempre en tensión, con una resultante de esfuerzo medio siempre positivo.

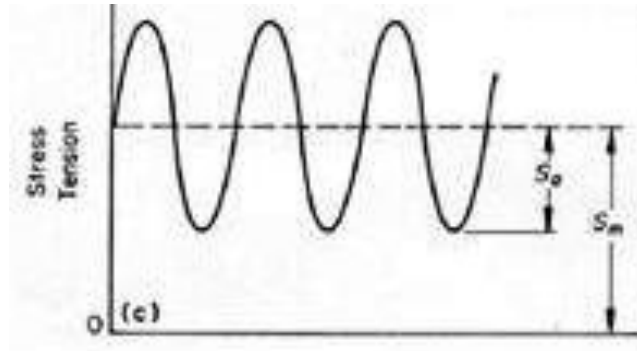


Figura 8 Gráfica de esfuerzo vs ciclos de una carga cíclica en tensión repetida.

Los esfuerzos traccionantes repetidos pueden presentarse en elementos que estén sometidos a tensión constante presentando cambios de velocidad en el movimiento, como por ejemplo máquinas de elevación y transporte donde los elementos vinculantes de la carga y la máquina se encuentra en un estado de tracción mientras sujeta la carga y además sufren cambios en magnitudes de esfuerzo cuando se someten a movimientos ascendentes o descendentes. (Powell & Mahmoud, 1986)

2.8.3 Ciclo de esfuerzos en tensión con reposo absoluto (carga-descarga).

Para los esfuerzos traccionantes con reposo absoluto se cuenta con periodos donde la carga adquiere un valor positivo con pendiente positiva mientras después de alcanzar un valor máximo de esfuerzo, este baja hasta ubicarse en la zona de reposo de la gráfica donde luego vuelve a sufrir un incremento en esfuerzo volviéndolo a posicionar en la región positiva de la

representación, dejando como resultado un valor de esfuerzo medio positivo, como se representa en la figura 9.

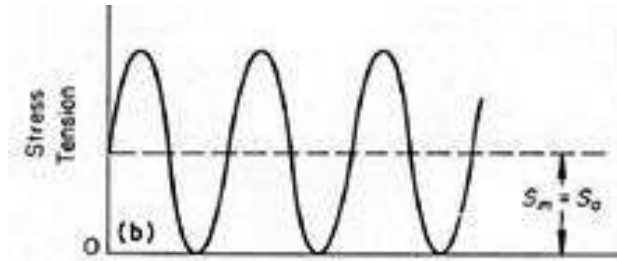


Figura 9 Gráfica de esfuerzos vs ciclos de una carga cíclica con esfuerzos en tensión con reposo absoluto.

Estos esfuerzos en tensión con reposo absoluto son probablemente uno de los más usuales en la industria bajo un patrón regular de cargas y periodos de tiempo, debido a su naturaleza de reposo alternante. (Powell & Mahmoud, 1986)

2.8.4 Ciclo de esfuerzos aleatorios.

En esta clasificación de esfuerzos se presentan todos los tipos de esfuerzos indicados anteriormente ya que se consiguen magnitudes positivas de esfuerzos que representan valores de crecimiento diferentes, magnitudes negativas bajo periodos de tiempo diferentes, así como periodos de arresto donde no existen cargas de ninguna naturaleza, como podemos observar en la figura 10.

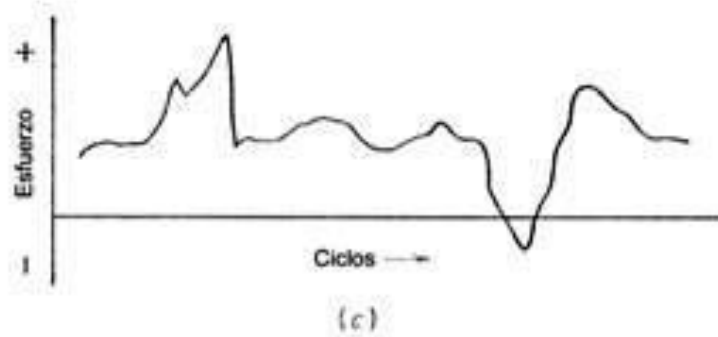


Figura 10 Gráfica de esfuerzos vs ciclos de un ciclo de esfuerzos aleatorios.

Se puede inferir que la realidad de muchos elementos de máquinas no es gobernada bajo patrones regulares donde se consigan periodos de tiempo establecidos, crecimientos constantes de esfuerzos y valores exactos de magnitudes máximas o mínimas, así que la condición de acercamiento que mejor describe la gran mayoría de elementos estudiados en fatiga es este tipo de esfuerzos mixtos que entre otras cosas originan la variación entre morfologías de superficie de fractura, otorgándole particularidades al estudio de las superficie, como distintos puntos de nucleación de grietas, velocidades variantes en la propagación de grietas, periodos de arresto prolongados que ocasionan la oxidación y corrosión en un sector particular de la superficie, entre muchas otras situaciones que no se pudieran dar explicación si se siguiera un patrón regular e invariable de ciclos y esfuerzos. En esta línea de ideas se pueden mencionar que las maquinas sometidas a este tipo de esfuerzos son las maquinas que muchas veces fallan sin haberlo esperado bajo ningún proceso o consideración en el diseño. (Powell & Mahmoud, 1986)

2.9 Límite de fatiga

El concepto de límite de fatiga está asociado al valor de esfuerzo por debajo del cual no ocurre fractura independientemente del número de ciclos de esfuerzos bajo los cuales este sometido el material.

Los factores involucrados que determinan este nivel de esfuerzos siempre están vinculados a particularidades encontradas en el elemento que se relacionan con situaciones como posibles concentradores de esfuerzos, debido a rugosidad superficial derivada del proceso de fabricación del elemento, esfuerzos residuales en la superficie del material que condiciona puntos para nucleación de grietas en potencia, así como ambientes en los cuales operan dichos elementos y las condiciones de corrosión presentes en el servicio del elemento. La unión de estos y otros factores determinan la variación en la resistencia de fatiga de un elemento, ya que a pesar de contar con un comportamiento definido para un material en específico, las particularidades encontradas en cada elemento hace que el nivel de esfuerzos para el cual un elemento se considera que tiene vida infinita o mayor a 10 millones de ciclos fluctúe alrededor de un punto conocido y ofreciendo un rango de esfuerzos que está íntimamente relacionado a las características que puede presentar el elemento mencionadas anteriormente.

El procedimiento más utilizado para determinar la curva correspondiente a la vida del material, consiste en ensayar un número de probetas similares, sometiendo cada una a un valor particular de carga fluctuante o alternante hasta su fractura; de esta forma, se obtienen valores de carga o esfuerzo fluctuante S y número de ciclos para la fractura N . A partir de esto datos se construye el diagrama $S-N$ realizando el mejor ajuste de los puntos experimentales, que graficados bajo la función logaritmo representan con una línea inclinada en la cual las probetas se rompen y otra horizontal, por debajo de la cual las probetas no fracturan. (Joa, 2010)

De la curva obtenida bajo el procedimiento antes explicado se puede obtener el valor correspondiente al límite de fatiga, que representa el valor de esfuerzo por debajo del cual no puede ocurrir fractura del material independientemente del número de ciclos ya que este límite determina la vida infinita representada en la práctica por un valor que excede a los 10 millones de ciclos y que por lo general se ubica entre el 35 y 60% del valor correspondiente a la resistencia de tracción del material.

Existe una particularidad para los materiales de origen no ferrosos como el aluminio y el magnesio utilizados ampliamente en la industria mundial, y es que este tipo de aleaciones no presentan un límite de fatiga completamente definido o que siga un comportamiento constante porque al observar la curva esfuerzos versus ciclos se observa que el decrecimiento sigue presentándose a pesar del número de ciclos de esfuerzo a los cuales se somete el elemento y esto conlleva a la inferencia que estos tipos de materiales van a fallar por fatiga en algún momento independientemente de la magnitud de la tensión máxima aplicada. Al presentar un comportamiento decreciente y asintótico con respecto al eje "x", el criterio a utilizar para determinar la equivalencia al límite de fatiga, es llamado límite de resistencia a la fatiga; que en este caso es el nivel de esfuerzo, que garantiza al menos un ciclaje correspondiente a 5×10^6 o 10 millones de ciclos, así que al tener esta expectativa de vida, se considera este valor de esfuerzo como un criterio de diseño importante para elementos compuestos de este tipo de materiales no ferrosos. (Callister, 1996)

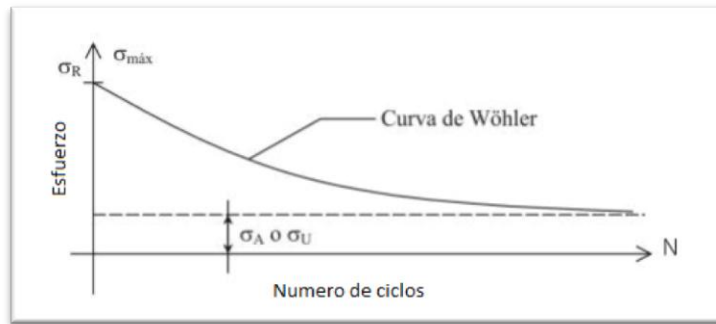


Figura 11 Curva de Wholer para fatiga

2.10 Vida a la fatiga

Se entiende por vida a la fatiga el parámetro que indica el número de ciclos (N_f) necesarios para ocasionar la falla de un material sometido a esfuerzo. Se puede dividir en tres etapas las cuales son la iniciación de grietas (N_i), la propagación de grietas (N_p) y la fractura súbita. La vida en condiciones de fatiga se puede establecer entonces en términos de la cantidad de ciclos, tal como:

$$N_f = N_i + N_p \quad Ec2$$

En donde:

N_i : Cantidad de ciclos que se requieren para iniciar una grieta discernible, lo que está influido principalmente por el nivel de esfuerzos, concentradores de esfuerzos, partículas de segunda fase, imperfecciones cristalinas y condiciones del medio ambiente.

N_p : Cantidad de ciclos que se requieren para propagar o hacer crecer la grieta en forma estable hasta un tamaño crítico, después del cual se presenta la fractura súbita; Dicho número es afectado principalmente por el nivel de esfuerzos, orientación microestructural y medio ambiente. (Callister, 1996)

2.11 Fatiga en materiales recubiertos

Es importante tomar en cuenta que los materiales se comportan de maneras diferentes ante el fenómeno de fatiga ya que su comportamiento bajo cargas alternantes está estrechamente vinculado con características inherentes al material. Como ha sido anteriormente expuesto existen un gran número de factores que determinan la nucleación de una grieta en un material más que su propia geometría y condiciones de operación, los factores van en un intervalo desde la superficie del material generado por el proceso de fabricación hasta discontinuidades presentes por diversos factores pasando por las características de composición de la superficie, si posee algún tipo de tratamiento superficial o recubrimiento para un tipo de aplicación. Partiendo de este hecho podemos agregar un factor extra al comportamiento de los materiales para la fatiga. Por tanto se puede inferir que así como las condiciones de aplicación del recubrimiento afectan de una forma u otra el comportamiento de la pieza, también lo hace la naturaleza propia del sustrato en el cual se va a depositar el recubrimiento, su composición química, la interfaz sustrato-recubrimiento, la forma en que el recubrimiento se adhiere al material base, incluso el propio material base puede representar una variación importante si se recubre con un tipo de material u otro, así como el ambiente en donde opere el elemento, si contiene agentes corrosivos que generen concentradores de esfuerzo en el recubrimiento, entre muchos otros escenarios.

En el caso de los materiales recubiertos por el método de HVOF, que es el caso que representa para nosotros mayor interés de estudio; se puede contar con un material de recubrimiento que va a ser fundido y proyectado a altas velocidades a un sustrato previamente preparado bajo algún proceso que garantice su correcta adhesión y anclaje del material base.

El equipo que va a realizar la deposición consta de diferentes regulaciones que permiten variar la cantidad de alimentación del material que va a ser fundido y proyectado, alimentación de concentración de oxígeno utilizado y concentración del combustible empleado para la fundición y proyección de las partículas al material.

Este conjunto de regulaciones otorgan una variación en el recubrimiento que se está realizando y es importante tomar en cuenta los efectos que estas regulaciones pueden tener en el proceso de deposición para estimar una condición óptima para el tipo de material base que se esté utilizando, la naturaleza del recubrimiento y la aplicación del elemento en su servicio como elemento de maquina bajo condiciones particulares.

En este tipo de procesos conseguimos una gran cantidad de variables que pueden modificar el comportamiento esperado del material, ya que el hecho de incrementar las propiedades superficiales y tribológicas del material, no quiere decir que se incrementen las propiedades volumétricas intrínsecas del substrato, incluso podemos conseguirnos con materiales como un acero 4340 con recubrimientos de 220 micras de Colmonoy 88 donde se consigue que el comportamiento a fatiga del material se reduce en gran medida después de ser aplicado el recubrimiento ya que la preparación previa del material fue realizado a través del granallado con partículas de alúmina y al hacer un estudio Fractográfico a través del método de microscopia electrónica de barrido se consiguieron puntos de nucleación de grietas en partículas de alúmina retenidas en la matriz cerca de la superficie. (Hernández, Oliveira, Berrios, Villalobos, Pertuz, & Puchi-Cabrera, 2000)

Dicha reducción en propiedades de fatiga de este material están asociadas con la fractura y desprendimiento parcial del recubrimiento desde el substrato a lo largo de la interfaz substrato-depósito y la reducción del área de los segmentos que soportan cargas del material compuesto durante las

pruebas de fatiga. Bajo algunos intervalos de esfuerzos alternantes los depósitos de HVOF contribuyen a prolongar la vida del material y por lo tanto la evaluación de fatiga en este tipo de materiales con este tipo de recubrimientos se debe tener muy en cuenta el espesor del depósito aplicado al sustrato. (Oliveira, Hernández, Berrios, Villalobos, Pertuz, & Puchi-Cabrera)

El espesor del recubrimiento juega un papel muy importante en las propiedades obtenidas del conjunto, para métodos de deposición por HVOF se debe entonces preparar la superficie del sustrato con proyección de partículas que generan impactos a altas velocidades y otorgan una superficie de adherencia correcta para el recubrimiento. Ahora bien, se debe tomar en consideración aspectos como un pulido previo a la superficie del material asegurando que no se mantengan discontinuidades previas asociadas al proceso de fabricación que arrastren más adelante posibles puntos de concentradores de esfuerzo.

Es pertinente considerar que al proyectar las partículas de alúmina en la superficie y luego recubrir el sustrato, se debe considerar un espesor de recubrimiento suficiente para cubrir posibles partículas de alúmina retenidas en la superficie, que suponen un punto ideal de nucleación de grietas, ya que es un concentrador de esfuerzo que se queda preso en la interfaz del recubrimiento y sustrato haciendo que la fatiga se genere gracias a este tipo de fenómenos. (Padilla, Velásquez, Berríos, & Puchi-Cabrera, 2001)

Existen factores que modifican el comportamiento de los recubrimientos como los tipos de cargas alternantes, ya que a diferentes frecuencias se pueden conseguir diferentes comportamientos. Un acero 1045 recubierto con una aleación de Colmonoy 88 depositado por HVOF de aproximadamente 410 micras de espesor fueron preparadas previamente con alúmina y probadas en ensayos de fatiga de flexión rotativa a una

frecuencia de 50 Hz y con incrementos de esfuerzos en el orden de los 5 MPa indicando una reducción notable en resistencia de fatiga de los elementos en contraposición con probetas del material base pulido sin recubrimiento y preparación con alúmina, pero al contrario cuando las muestras fueron probadas en una solución de cloruro de sodio con esfuerzos alternantes menores a 350 MPa se pudo observar un incremento notable en la vida de fatiga del material en comparación con muestras pulidas sin recubrir. (Puchi-Cabrera, Staia, Lesage, Chicot, Labarbera-Sosa, & Ochoa-Perez, 2006)

Este estudio demuestra que pruebas de acero 1045 bajo las condiciones mencionadas y recubiertas con Colmonoy 88 presentan un incremento de vida a la fatiga bajo ambiente corrosivo de cloruro de sodio y esfuerzos alternantes bajos, actuando el recubrimiento como una protección efectiva contra puntos de nucleación de grietas generadas por fatiga bajo corrosión evitando la formación de concentradores de esfuerzo en estas condiciones, y por el contrario a altas cargas alternantes el comportamiento del recubrimiento se inclina a delaminarse del substrato haciendo que quede expuesta la superficie que presenta la preparación previa con proyección de partículas de alúmina, donde se consiguen entallas que generan los concentradores de esfuerzo que dan paso a la reducción de su vida a la fatiga. (Puchi-Cabrera, Staia, Lesage, Chicot, Labarbera-Sosa, & Ochoa-Perez, 2006)

En diferentes escenarios de recubrimientos se pueden conseguir diferentes respuestas así que es de suma importancia conocer y determinar la aplicación del elemento de máquina y las condiciones de servicio, si el material es recubierto con unas condiciones de deposición y características que originan delaminación a altas cargas alternantes exponiendo posibles concentradores de esfuerzos conseguidos gracias a la proyección de partículas de alúmina, se debe tener esto en consideración para utilizar el

elemento en un ambiente donde las cargas alternantes no excedan el límite estudiado para el material y no se origine fractura indeseada del material antes de lo esperado.

Así como el ambiente de operación del elemento si contiene agentes corrosivos que son los principales causantes de concentradores de esfuerzos y nucleación de grietas en la superficie, se debe pensar en un recubrimiento que otorgue la protección necesaria al elemento para estas condiciones y es por estos motivos la gran importancia que representa el estudio de la naturaleza de recubrimientos, las condiciones de aplicación, los espesores, las frecuencias de pruebas entre otros factores que determinan una efectiva protección al elemento para lo que se busca específicamente, ya que es de muy poca efectividad un recubrimiento que aumente de forma considerable el comportamiento del material bajo condiciones que están muy alejadas a las reales de operación.

Es mediante estos estudios de fatiga con distintos tipos de recubrimientos y a distintos tipos de sustratos que se determinan los comportamientos a obtener bajo un conjunto de condiciones, ya que al manejar la cantidad de conceptos que se han plasmado en estas páginas se puede intuir que existen una gran cantidad de cosas que afectan el comportamiento del material recubierto y no solo se limita a las propiedades del recubrimiento como un ente aislado de un conjunto de parámetros.

2.12 Curva Esfuerzo vs Número de Ciclos

Existen múltiples ensayos para medir las propiedades de fatiga en materiales, uno de los más comunes es el ensayo de flexión rotativa, el cual se lleva a cabo bajo condiciones controladas, donde el esfuerzo medio, S_m ,

es nulo y la relación de esfuerzos $R = -1$. Los datos obtenidos de este ensayo son utilizados para realizar la curva $S-N$.

La curva $S-N$ o curva de Whöler se genera ensayando un número de probetas similares, sometiendo cada una a un valor particular de carga. Se comienza por un valor alto de esfuerzo, el cual usualmente tiene un valor de dos tercios del límite de fluencia, y se cuenta el número de ciclos (N) que resiste la probeta bajo esta carga. Este procedimiento se repite disminuyendo gradualmente el valor de la carga y contabilizándose el número de ciclos para cada ensayo.

Estos datos son representados en escala log-log, o semi-log. Es el número de ciclos (N) el que se representa en la escala logarítmica ya que este puede variar de unos millares a muchos millones, cuando se representan los valores de esfuerzo en escala logarítmica, lo que se busca es que la representación de los datos se aproxime a una línea recta.

Es posible separar en zonas características y bien definidas, la mayoría de las curvas $S-N$, a) zona de bajo y medio ciclaje y una zona b) de alto ciclaje. Otras zonas que pueden identificarse y que son independientes de las antes mencionadas son, c) vida finita y d) vida infinita.

Se considera bajo ciclaje al área de la curva que se encuentra entre 1 y 10^3 ciclos, donde los especímenes resisten altas cargas que producen deformación tanto plástica como elástica. A partir de los 10^3 ciclos se considera zona de alto ciclaje y esta se asocia a cargas más bajas, donde la deformación es netamente elástica y se obtienen vidas más prolongadas

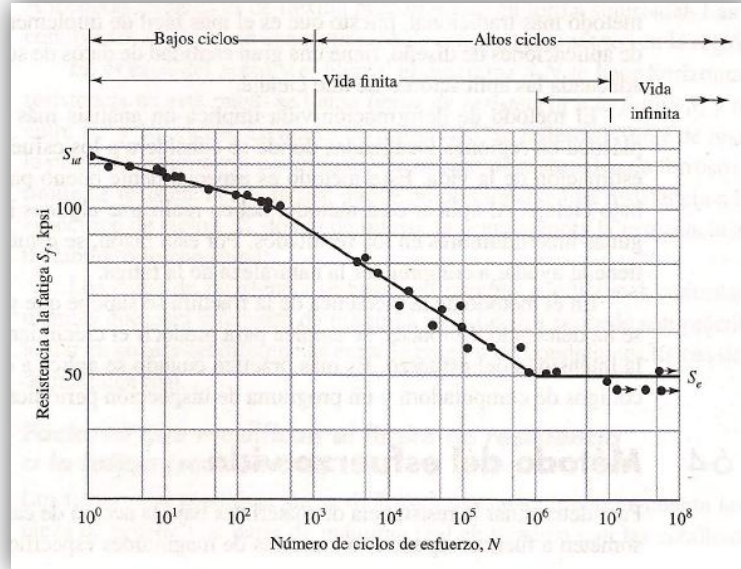


Figura 12 Diagrama S-N.

En la figura se aprecia un cambio brusco en el comportamiento de la curva, entre la zona de vida finita (10^0 a 10^6 ciclos) y vida infinita (más de 10^6 ciclos), esto para el caso de los aceros. A partir de la zona de vida infinita no se aprecian daños en el material, por lo que podríamos inducir que para esfuerzos por debajo de este valor, el material resistirá infinitamente los esfuerzos alternantes, por lo que no se evidenciara el fenómeno de fatiga.

2.13 Modelos curva Esfuerzo vs Ciclos

Desde que A. Whöler, alrededor de 1850, comenzó a estudiar en Alemania el comportamiento de los materiales sometidos a cargas cíclicas, muchas han sido las funciones sugeridas para presentar la conducta del material. Una de las más comunes es la relación de Basquin, en la cual se modela mediante una hipérbola, donde b es el llamado coeficiente de Basquin, el cual es de valor negativo, que para la mayoría de los metales su

valor se encuentra entre -0,05 y -0,12; S_f representa el valor del coeficiente de resistencia a la fatiga:

$$\text{Modelo de Basquin} \quad S_a = S_f(N_f)^b \quad \text{Ec3}$$

Otros modelos como el de Stromeyer, Palmgren o Weibull, son modificaciones o caracterizaciones del modelo de Basquin.

Para la zona de alto ciclaje, la cual incorpora el límite de fatiga, un modelo que da una aproximación para esta área es la ecuación de Stromeyer:

$$\text{Modelo de Stromeyer} \quad S_a = S_e + \frac{N_f}{c}^m \quad \text{Ec4}$$

Dónde:

S_e : Limite de fatiga del material

C y m : son valores constantes propios de cada material y se pueden determinar por mínimos cuadrados.

Ya que el modelo de Stromeyer posee poca exactitud con los resultados para bajo ciclaje, se introduce el valor K , que ajusta dichos resultados, a esta nueva ecuación se le conoce como modelo de Palmgren:

$$\text{Modelo de Palmgren} \quad S_a = S_e + \frac{N_f + K}{c}^m \quad \text{Ec5}$$

2.14 Modelo probabilístico de Weibull.

En la actualidad es de vital importancia recurrir a los modelos probabilísticos, para estudiar la prevención de fallas en los procesos industriales, ya que estos nos permiten contar con técnicas de predicción

adecuadas, las cuales son fundamentales para asegurar una producción de calidad.

La Distribución de Weibull es un complemento entre la Distribución Normal y la Distribución Exponencial, que son casos particulares de ella. Por su complejidad, sólo se usa cuando se anticipa que una de ellas es la que mejor describe la distribución de fallas o cuando se producen muchas fallas y los tiempos correspondientes no se ajustan a una distribución más simple. Este modelo tiene una extensa gama de uso, desde previsiones meteorológicas hasta prevención de fallas de cojinetes y mecanismos transmisores de potencia.

El modelo de Weibull permite estudiar la distribución de fallas de cierto componente que deseemos conocer, la cual a través de un registro de las fallas nos permite observar la variación en el tiempo, en el intervalo considerado como vida del elemento, además facilita la identificación de las fallas aparte de permitirnos contar con una herramienta de predicción de comportamientos.

Es posible modelar los esfuerzos a los que son sometidos tanto los materiales mediante la Distribución de frecuencias de Weibull, así como también pueden modelarse situaciones del tipo tiempo-falla, o bien puede indicar la vida útil y la seguridad de un elemento de maquina gracias a la capacidad de cambiar de forma dependiendo de la variación del valor del parámetro de forma β .

En 1951 Weibull propuso que la expresión empírica más simple que podía representar una gran variedad de datos reales podía obtenerse escribiendo:

$$\lambda \tau d\tau = \frac{\tau - \delta}{\alpha} \beta \quad \text{Ec6}$$

Por lo que la fiabilidad será:

$$R(\tau) = e^{-\frac{\tau-\delta}{\alpha}^\beta} \quad \text{Ec 7}$$

Dónde:

δ = Parámetro inicial de localización, el cual se utiliza para desplazar una distribución hacia un lado u otro. Este parámetro define el punto de partida u origen de la distribución.

α = Parámetro de escala o vida característica, Este es el parámetro que caracteriza a las distribuciones uniparamétricas. El parámetro de escala define cuán dispersa se encuentra la distribución.

β = parámetro de forma o pendiente de Weibull. Este parámetro define la forma de la distribución, y representa la pendiente de la recta de $F(t)$ vs t , describiendo el grado de variación de la tasa de fallas.

2.15 Factores que influyen en el comportamiento de la curva S/N

El comportamiento de los materiales sometidos a cargas fluctuantes se ve modificado por diversos factores que deben ser tomados en cuenta ya que estos cambian la resistencia a la fatiga, y al actuar en muchos casos en forma sinérgica podrían causar resultados no deseados en la respuesta del material. Entre estos factores se encuentran: la microestructura, tamaño, condición de la superficie, frecuencia de aplicación de carga y tensión media entre otros.

En cuanto a la microestructura, en la mecánica de sólidos se suelen modelar los metales como materiales homogéneos, isotrópicos y

elásticamente lineales. En un nivel microscópico, algunas de estas suposiciones no son reales y la fatiga de metales es significativamente influenciada por la Microestructura.

La composición química, tratamiento térmico y trabajo en frío tienen una amplia influencia en el límite de fatiga de un material. Estos tres factores tienen un enorme número de variaciones sinérgicas y las generalizaciones concernientes a sus efectos en el comportamiento de la fatiga no son prácticas. Sin embargo, algunas consideraciones pueden ser formuladas para otros aspectos microestructurales.

En lo que respecta al tamaño del grano, los granos finos generalmente proveen una mejor resistencia a la fatiga que los gruesos, excepto a elevadas temperaturas donde puede existir el efecto combinado de fatiga y fluencia lenta. Estos reducen las deformaciones locales a lo largo de las bandas de deslizamiento disminuyendo la cantidad de deslizamiento irreversible y proveen de mayores bordes de grano para asistir la deflexión o detención de grietas transcristalinas, reduciendo de esta forma la tasa de crecimiento de estas.

Igualmente, la anisotropía causada por el trabajo en frío incrementa la resistencia a fatiga cuando el material se somete a carga en la dirección del trabajo, a diferencia de cuando la carga es aplicada en una dirección transversal. Esto se debe al endurecimiento por deformación y también al producto de las estructuras orientadas en la dirección del trabajo en frío.

También, las inclusiones y porosidades actúan como concentradores de esfuerzo y son sitio común para la nucleación de microgrietas de fatiga, aunque también se producen fisuras en estos lugares durante el tratamiento térmico o el trabajo en frío del material. Bajo cualquiera de estas condiciones la resistencia a la fatiga es reducida por dichas discontinuidades.

En lo que se refiere al tamaño de la pieza, si el diámetro o espesor del espécimen es $<10\text{mm}$, entonces el comportamiento a fatiga (curvas S-N) es razonablemente independiente al diámetro o espesor. A medida que el diámetro o espesor incrementa hasta 50 mm, el límite de fatiga disminuye hasta un factor límite de alrededor de 0.7 a 0.8 del límite de la fatiga para especímenes menores de 10 mm en diámetro o espesor. Lo anterior es válido para el caso de flexión alternativa.

De la misma manera, en lo concerniente al acabado superficial, la mayoría de las fallas por fatiga se originan en la superficie, debido a que comúnmente el esfuerzo máximo se encuentra en esta zona, por lo tanto estas tendrán una influencia sustancial en el comportamiento a la fatiga. Los efectos de la superficie son causados por diferencias en la rugosidad, microestructura, composición química y esfuerzos residuales. La influencia será más pronunciada para vidas largas donde un mayor porcentaje de los ciclos transcurre en la nucleación de la grieta.

En las operaciones de mecanizado se producen inevitablemente pequeñas rayas y surcos en la superficie de la pieza por acción de las herramientas de corte. Estas marcas superficiales pueden limitar la vida a fatiga. Se ha observado que mejorando el acabado superficial mediante pulido aumenta significativamente la vida a fatiga.

Uno de los métodos más efectivos para aumentar la vida a la fatiga es mediante la introducción de esfuerzos residuales de compresión en una capa delgada superficial. Por consiguiente, cualquier tensión externa de tracción es parcialmente contrarrestada y reducida en magnitud por el esfuerzo residual de compresión. El efecto neto es que la probabilidad de nucleación de la grieta, y por tanto de fractura por fatiga se reduce.

Por otra parte, en lo que concierne a la frecuencia de aplicación de carga, su influencia en el comportamiento a la fatiga de los metales es

complicado por los efectos sinérgicos de la temperatura, ambiente corrosivo y sensibilidad del comportamiento esfuerzo-deformación del material con la tasa de deformación. Independientemente, las temperaturas elevadas y los ambientes corrosivos disminuyen la resistencia a la fatiga. El calentamiento del espécimen a frecuencias muy elevadas, debido al amortiguamiento de la histéresis, puede incrementar la temperatura del espécimen y cambiar el verdadero comportamiento a temperatura ambiente, lo cual es particularmente importante para metales de baja resistencia. En ausencia de corrosión y efectos de temperaturas y otros ambientes agresivos, los efectos de la frecuencia por encima de los 200 Hz pueden no ser tomados en cuenta. Mientras que para frecuencias en el rango de 1Hz a 200Hz los efectos en el comportamiento de fatiga son bajos para la mayoría de los aceros estructurales. Por lo contrario, si el intervalo de frecuencias es del mayor a los 1000 Hz, ocurren grandes cambios en la resistencia a la fatiga.

La dependencia de la vida a la fatiga con la amplitud de la tensión mediase observa en el diagrama S-N, donde el aumento de la tensión media conduce a una disminución de la vida a fatiga.

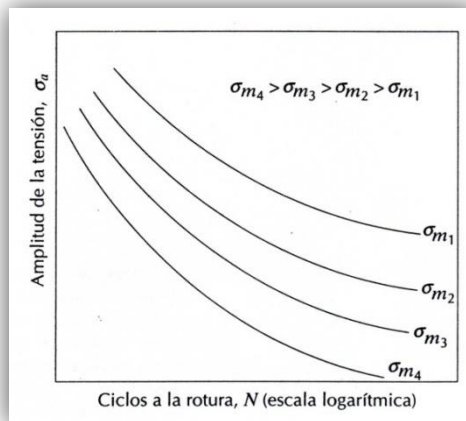


Figura 13 Influencia de la tensión media σ_m en el comportamiento a la fatiga.

Asimismo, el diseño de un componente puede tener una influencia significativa en sus características de fatiga. Cualquier entalla o discontinuidad geométrica puede actuar como un concentrador de tensiones y como lugar donde se puede nuclear la grieta de fatiga; estos detalles del diseño incluyen orificios, ranuras de chavetas, roscas y otros. Cuanto más aguda es la discontinuidad (es decir, cuanto menor es el radio de curvatura), más severa es la concentración de tensiones.

CAPITULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1 Diagrama de Flujo

A continuación se presenta un diagrama de flujo de los ensayos y la metodología a realizar en este trabajo de investigación.

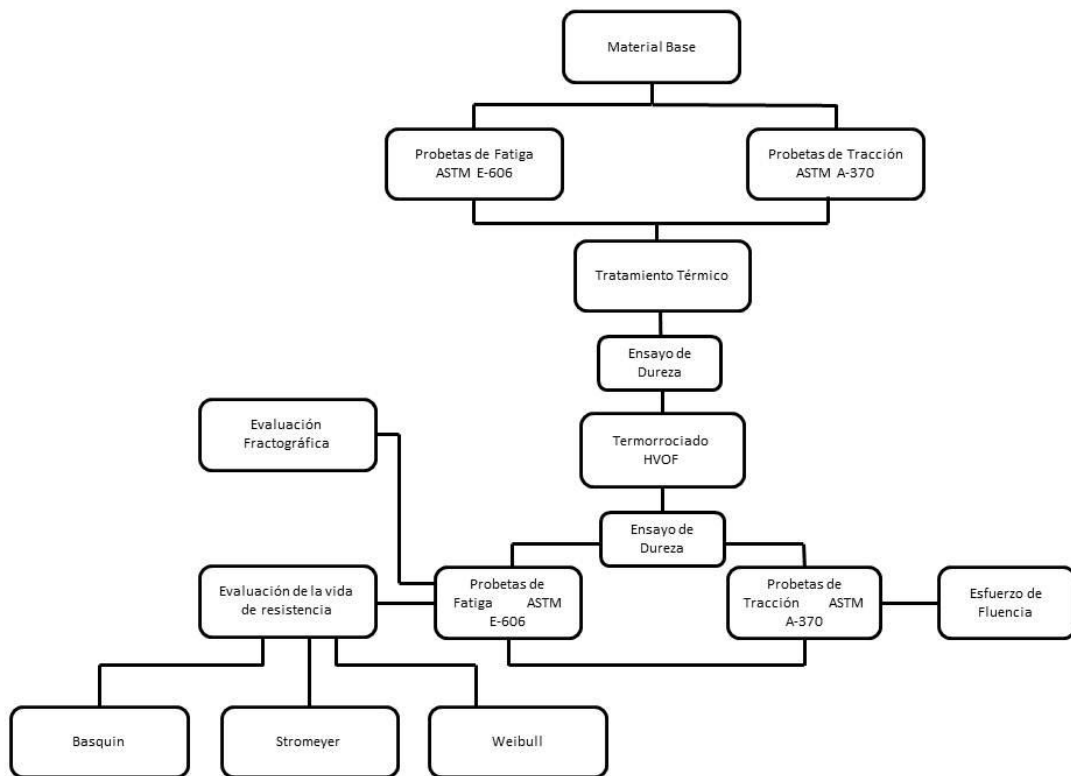


Figura 14 Diagrama de flujo

3.2 Material Base

El metal base de las probetas es un acero SAE4340 certificado, el cual fue proporcionado originalmente en forma de barras, de 6 m de largo. Estas barras fueron adquiridas en la empresa Ferrum, ubicada en la zona industrial de petare. Las probetas de tracción y de fatiga se fabricaron de acuerdo a las normas ASTM.

3.3 Dimensiones de probetas

El diámetro del hombro de las probetas de fatiga y de tracción es de 12.7 mm, ya que las mordazas de las maquinas respectivas de ensayo son capaces de soportar probetas con hombros de dicha dimensión.

La longitud mínima ($L_{min.}$) de las probetas de tracción es de 120 mm.

La longitud máxima ($L_{máx}$) de las probetas de fatiga es de 90 mm, ya que la máquina de ensayo ha sido diseñada para ensayar probetas entre 80 - 90 mm de longitud.

Las dimensiones de la sección de ensayo de las probetas de fatiga, según el manual de la máquina son las siguientes:

Diámetro mínimo de la sección de ensayo 6.35 mm.

Longitud de la sección de ensayo 38.1 mm.

Radio de acuerdo (R) entre la sección de ensayo y los hombros de la probeta 58.73 mm.

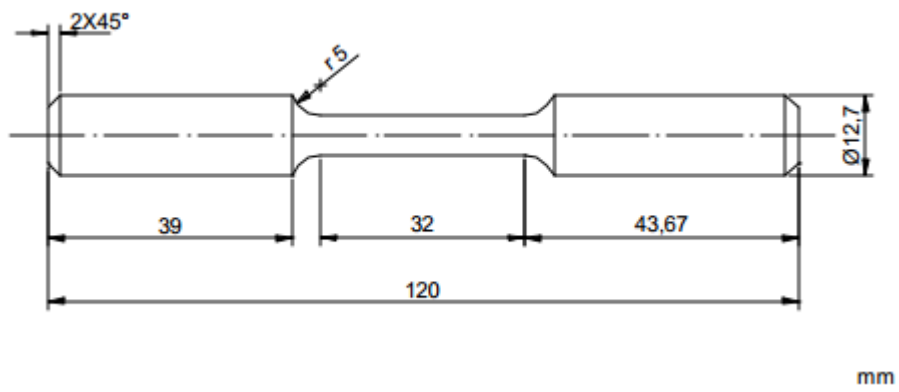


Figura 15 Probeta de tracción

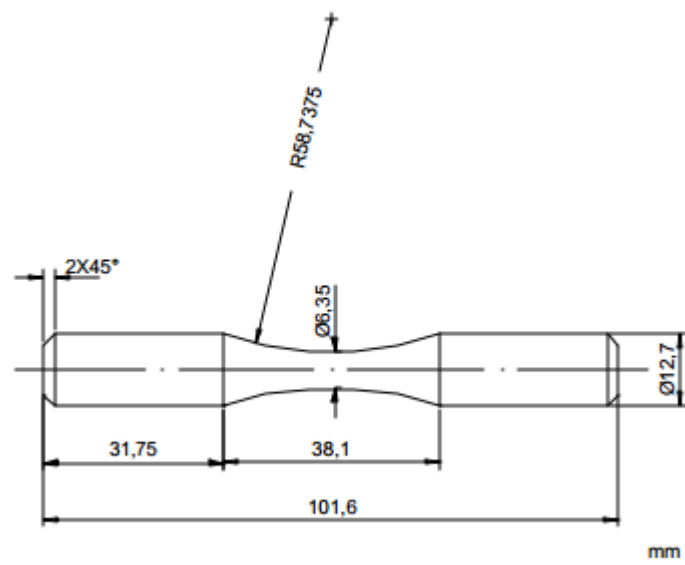


Figura 16 Probeta de fatiga

3.4 Cantidad de especímenes utilizados

A continuación en la tabla 4 se especifica la cantidad de probetas para los diferentes ensayos a realizar en este estudio, así como la respectiva norma que condiciona las características y dimensiones de las mismas.

Tabla 3 Probetas requeridas para la realización de los ensayos.

ENSAYO	CONDICIÓN	CANT	NORMA
Resistencia a la tracción	SAE 4340 + COLMONOY 88	5	A-370
Resistencia a la Fatiga al Aire	SAE 4340 + COLMONOY 88	24	ASTM E-606

3.5 Pulido Metalográfico

En primer lugar fue realizado un pulido metalográfico a las probetas de acero microaleado 4340 bonificado previo a la nitruración (tratamiento térmico) Las probetas presentaban entallas circunferenciales a lo largo de toda su superficie causadas por el proceso de fabricación por arranque de viruta, es por esto que también fueron pulidas. Para su pulido se utilizó un torno para hacerlas girar a una velocidad moderada para luego con una lija frotar toda la superficie de las muestras, de esta manera eliminando las entallas, a pesar que en el proceso de termorrociado por HVOF no es necesario alcanzar una superficie especular, luego del proceso de nitrurado se volvió a realizar un pulido leve con la intención de eliminar la capa blanca resultante del tratamiento térmico, además para la óptima adherencia del

recubrimiento se necesita una rugosidad establecida, el pulido previo a la deposición pretende partir de una condición totalmente uniforme desde el punto de vista superficial, para así de esta manera al realizarse el proceso de granallado o sandblasting, la rugosidad alcanzada por la superficie de estudio no presente ninguna perturbación anterior a éste. Estas probetas se utilizaron posteriormente para realizar el ensayo de indentación estática del tratamiento térmico y recubrimiento, para este ensayo fue necesario pulir dejando la superficie especular.

El procedimiento de pulido especular consistió en pasar cada una de las probetas por un conjunto de lijas de diferente densidad de grano, las lijas usadas fueron las siguientes: 120, 180, 240, 360, 400, 600 y 1200 granos por pulgada cuadrada. El procedimiento se basa en frotar la muestra contra la superficie de la lija hasta que todas las marcas presentes en la probeta estén en la misma dirección, luego se gira la probeta 90 grados y se lija hasta que se borren las marcas de la dirección anterior y todas estén orientadas en la dirección actual, en este momento se pasa a la lija siguiente de menor tamaño de grano.



Figura 17 Pulidora de disco Buehler

3.6 Proceso de nitruración

El proceso de tratamiento termoquímico de nitruración fue realizado en la empresa Ferrum Aceros, C.A. Ubicada al final de la Zona industrial, Petare. Esta es una empresa venezolana encargada de la venta y distribución de acero como también en realización de tratamientos térmicos y termoquímicos, que con su amplio recorrido en el mercado poseen la experiencia para la selección de los parámetros a utilizar en el proceso de nitrurado.

Dicho tratamiento fue realizado mediante el proceso TENIFER® el cual se lleva a cabo a temperaturas entre 480-620°C, aunque la temperatura estándar es de 580°C. El proceso se lleva a cabo en un crisol de material especial, en donde se encuentra la sal fundida compuesta por Cianato y Carbonato, el agente activo en el baño de nitrurado es el cianato que se calienta en presencia de oxígeno y luego se descompone carbonatos y nitrógeno este último al reaccionar con la superficie del acero se forma la capa de nitruros con los aleantes del mismo y como residuo quedan los carbonatos.

3.7 Preparación de los Especímenes Previo a la Deposición

Previo al proceso de rociado térmico es necesario realizar una serie de pasos para que la deposición del recubrimiento sobre el sustrato sea óptima, esto con el fin de garantizar el anclaje mecánico de las partículas fundidas de recubrimiento al sustrato.

3.7.1 Probetas de tracción y fatiga

Estas fueron unidas mediante una abrazadera, la cual permitió el acople de dichas probetas entre ellas en grupos de cuatro, y a su vez

permitió la rotación de estas para poder realizar el rociado a lo largo de toda el área circular de estudio.

Para obtener una superficie totalmente limpia de aceites grasas y óxidos se limpió la superficie de estudio con un solvente industrial comercialmente conocido como thinner y posterior a esto se calentó el montaje con un soplete, con el fin de evaporar por completo el solvente, la humedad condensada en la superficie de la muestra y además eliminar cualquier residuo de grasa o contaminante indeseado.



Figura 18 Limpieza con thinner y calentamiento previo al recubrimiento

3.7.2 Granallado o SandBlasting

Este procedimiento consiste en proyectar finos granos de alúmina angular, aproximadamente de 1 a 3 mm, a grandes velocidades y hacerlos impactar contra la superficie para así producir una rugosidad homogénea en ésta, esta rugosidad es necesaria para la adherencia exitosa del posterior recubrimiento ya que su adherencia depende de la calidad del anclaje mecánico al momento del impacto, este proceso es realizado justo antes del rociado térmico ya que se desea evitar el contacto prolongado con la

atmósfera oxidante del ambiente. El proceso se llevó a cabo en la empresa Plasmatec Ingenieros s.a., en un recinto designado para tal fin.



Figura 19 Sala de granallado o sandblasting y probetas luego de ser granalladas

3.7.3 Descripción de los polvos utilizados

Para el proceso de recubrimiento se utilizaron polvos fabricados para ser termo-rociado por técnicas de plasma o HVOF, la aleación NiCrBSiW, llamado comercialmente Colmonoy 88; es el resultado de un precipitado fino de múltiples fases duras (complejos de carburos de tungsteno-cromo (WC-Cr) y boruros de tungsteno-cromo (BW-Cr), así como componentes trimetálicos de elementos semejantes) presentes durante su manufactura, las cuales permanecen uniformemente distribuidas durante su transporte, termo-rociado y fusión, lo que conduce a una mayor dureza y resistencia al desgaste del depósito, eliminando los problemas en que se incurrían con el mezclado y combinación de partículas de Carburo de Tungsteno,

incrementado en los últimos años de 5 a 10 veces el tiempo de servicio de piezas de maquinarias.

Las aleaciones base Níquel de alta dureza, contienen cantidades substanciales de Boro y Silicio, disponen de la propiedad de ser auto fundentes, es decir a altas temperaturas ambos elementos reaccionan con óxidos para formar boro silicatos con un punto de fundición bajo, forman una escoria y protegen al resto de los elementos de la aleación del proceso de la oxidación.

Uno de los principales problemas para maximizar los beneficios de esta aleación es la gran diferencia entre las partículas de carburo de tungsteno y los elementos de la matriz. Una vez mezcladas, las partículas de carburo de tungsteno comienzan a segregarse dependiendo de la cantidad, tiempo de traslado y agitación que sufre el polvo antes de llegar al sitio de trabajo. Otros factores que deben ser tomados en cuenta son: el punto de fusión de los carburos de tungsteno (3316 °C aproximadamente), la diferencia de tamaño y geometría de las partículas así como el efecto de peso específico en el ciclo de fusión en donde las partículas de WC caen al fondo, depositándose en la frontera del recubrimiento-substrato, aumentando la porosidad y por lo tanto disminuyendo la adhesión.

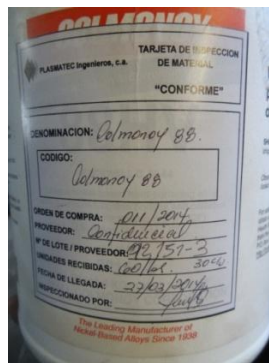


Figura 20 Presentación Comercial de la súper aleación base Níquel, Colmonoy 88

Tabla 4 composición Colmonoy 88

Composición	C	Si	Cr	B	W	Fe	Ni
%	0.8	4.0	15.0	3.0	17.3	3.5	Balance

3.7.4 Dureza del Colmonoy 88

El material de deposición llamado comercialmente Colmonoy 88 (NiCrBSiW), posee una dureza que varía entre 710 y 840 HB.

3.8 Deposición del recubrimiento

En el proceso de rociado térmico los parámetros de deposición a pesar de ser pocos, juegan un papel realmente importante en la calidad del posterior recubrimiento. Antes del proceso se conversó con el ingeniero encargado de la deposición de recubrimientos por termorrociado y se llegó a la conclusión de tomar como parámetros variables la relación oxígeno/combustible, la presión en la cámara de combustión y la tasa de alimentación de los polvos. La distancia de rociado a pesar de ser un parámetro muy importante se tomó como constante por ser un valor que en la práctica resulta difícil de medir y controlar, además de esto el operario recomendó una distancia de rociado con la que se ha alcanzado la mejor calidad de recubrimiento usando el mismo material y el mismo tamaño de grano.

La empresa Plasmatec S.A Ingenieros no posee un medidor de flujo para conocer exactamente la cantidad de oxígeno utilizada en la combustión, es por esto que el flujo de oxígeno permaneció constante durante todo el proceso y solo se varió la cantidad de combustible. El flujo de oxígeno permaneció fijo en un valor de $10,19 \text{ m}^3/\text{h}$ (360 pies cúbicos por hora en

condiciones estándar) y el flujo de combustible sufrió variaciones de 5,5 a 7,5 GPH, siendo la condición utilizada por la empresa de 6,5 GPH para alcanzar la mejor calidad de recubrimientos depositados cotidianamente en la operación de la empresa.

El alimentador de los polvos está conformado por un tornillo sin fin que al girar suministra una cierta cantidad de gramos por minuto, para saber la cantidad exacta se hizo una prueba preliminar a la deposición y se evidenció que a una velocidad de rotación de 380 rpm del tornillo sin fin se suministraban 100 gramos de polvo por minuto, siendo esta la condición utilizada por la empresa para este material y tamaño de grano. Basado en la experiencia del operario los valores se variaron en un 30% por debajo del valor utilizado comúnmente.

El equipo utilizado por Plasmatec Ingenieros para la deposición de recubrimientos por HVOF es un equipo de tercera generación que usa como combustible kerosene., en la figura 2.5 se muestra una imagen de dicho equipo, de izquierda a derecha: bombona de oxígeno, alimentador de polvos, control de flujo de combustible y agua de refrigeración, medidores de oxígeno y kerosene.



Figura 21 *Equipo de termorrociado HVOF propiedad de Plasmatec Ingenieros S.A.*

Estas condiciones se eligieron basándose en la experiencia de la empresa encargada de realizar la deposición de los recubrimientos.

Al encender el equipo se eligieron los parámetros deseados y se inició con el recubrimiento (figura 22), abarcando toda la superficie a recubrir con la llama lentamente, este proceso fue realizado controlando la temperatura con un pirómetro y se midió el espesor con un tornillo micrométrico en cada pasada, hasta alcanzar el espesor requerido de unos 3 micrómetros.



Figura 22 Proceso de rociado térmico por HVOF.

3.9 Ensayo de Tracción

El ensayo de tracción fue aplicado a las probetas con recubrimiento según la norma ASTM-A370. Se realizan estos ensayos para hallar los valores de esfuerzo de fluencia y resistencia máxima a la tracción y luego poder diseñar a partir de este último el ensayo de fatiga.



Figura 23 Máquina de ensayo de tracción Losenhausen, año 1969

Este ensayo se realizó en una máquina de ensayos universal marca Losenhausen (Figura 23). Esta máquina proporciona, mediante un sistema de poleas, la gráfica fuerza vs. elongación en megapondios y metros respectivamente. Para obtener los gráficos de Esfuerzo Vs. Elongación se deben utilizar los valores de las dimensiones iniciales de las probetas. Además de esto se debe realizar un ajuste a los valores de deformaciones conseguidos ya que la máquina no es infinitamente rígida y también sufre una deformación. Para realizar este ajuste se emplea la siguiente formula:

$$\Delta L_{exp} = \Delta L_{prob} + \Delta L_{maq}$$

Dónde:

ΔL : Variación de la longitud.

De la ley de Hooke (E.3) procedemos a despejar la variación de longitud (E.4).

$$F = \Delta L * K \quad (\text{E.3})$$

$$\Delta L = \frac{F}{K} \quad (\text{E.4})$$

Dónde:

F: Carga.

K: Rigidez.

Sustituyendo la ecuación E.4 en la ecuación E.2 obtenemos.

$$\frac{F}{K_{exp}} = \frac{F}{K_{prob}} + \frac{F}{K_{maq}} \quad (\text{E.5})$$

Al multiplicar por el inverso de la carga y despejar de la ecuación E.5 el valor de la K_{maq} , obtenemos.

$$K_{maq} = \frac{K_{prob} * K_{exp}}{K_{prob} - K_{exp}} \quad (\text{E.6})$$

El valor de la constante de elasticidad experimental se obtiene de la pendiente de la curva de zona elástica de la gráfica carga vs variación de longitud.

$$K_{exp} = m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (\text{E.7})$$

Por otra parte los valores de la variación de la longitud experimental se obtienen al leer de la gráfica producto del ensayo de tracción. Los valores de la variación de la longitud máquina se obtienen al sustituir en la ecuación E.18 el valor de la carga aplicada y de la constante previamente calculada.

Partiendo de (E.8) sabiendo que la deformación unitaria es (E.10) sustituimos en (E.9) y al despejar la Carga.

$$S = E * e \quad (\text{E.8})$$

$$S = \frac{F}{A_o} \quad (\text{E.9})$$

$$e = \frac{\Delta L}{L_o} (\text{E.10})$$

Dónde:

e= Deformación unitaria.

E = Modulo de Elasticidad del Acero.

S= Esfuerzo.

Lo= Longitud inicial.

Ao = Área transversal inicial.

Se obtiene la expresión.

$$F = \frac{E * A}{L_o} * \Delta L \quad (\text{E.11})$$

Igualando de la ecuación (E.11) con la ley de Hooke (E.3), se obtiene la expresión que indica el valor de la constante de elasticidad de la probeta.

$$K_{prob} = \frac{E * A}{L_o} \quad (\text{E.12})$$

Previo al ensayo se registró la longitud inicial de la probeta, y el diámetro del cuello, con este se calcula el área de sección transversal de la probeta.

$$A_o = \frac{\pi * d^2}{4} \quad (\text{E.13})$$

Donde d: Diámetro de la probeta.

Despejando de la ecuación (E.2) se obtiene el valor de la longitud corregida de la probeta.

$$\Delta L_{prob} = \Delta L_{exp} - \Delta L_{maq} \quad (\text{E.14})$$

Una vez calculada la variación de la longitud de la probeta se procede a realizar la gráfica esfuerzo ingenieril (S) vs deformación unitaria (e), y esfuerzo real (σ) vs deformación real (ϵ).

Dónde:

$$e_i = \frac{\Delta L_i}{L_o}$$

$$e_i = \frac{L_i - L_o}{L_o}$$

$$e_i = \frac{L_i}{L_o} - 1$$

$$\frac{L_i}{L_o} = e_i + 1 \text{ (E.24)}$$

$$\sigma = \frac{F}{A_i}; A_i = \frac{A * L_o}{L_i}$$

$$\sigma = S * \frac{L_i}{L_o}$$

Sustituyendo en la ecuación anterior la ecuación, se obtiene que:

$$\sigma = S * 1 + e_i \quad \text{(E.15)}$$

$$\varepsilon = \ln 1 + e_i \quad \text{(E.16)}$$

Una vez hechas estas correcciones se pudo proceder a hallar la curva de Esfuerzo Vs. Deformación y, de esta curva, se podrán obtener a su vez los valores de esfuerzos y propiedades que se necesitan para el diseño del ensayo de fatiga.

3.10 Ensayo de fatiga al aire

Los ensayos de fatiga fueron realizados en una máquina de flexión rotativa fabricada por Fatigue Dynamics Inc., modelo RBF-200. Ésta máquina está diseñada para aplicar ciclos de carga invertidos en voladizo sobre probetas de forma cilíndrica, además de esto dicha maquina posee un

variador de frecuencia que permite regular la velocidad de giro del ensayo entre 500 rpm y 10000 rpm y un contador de ciclos que indica el número de ciclos a la cual el ensayo termina. El momento flector es causado por una barra calibrada que permite colocar un peso graduado a una distancia determinada para así lograr el esfuerzo del momento flector deseado.



Figura 24 Máquina de fatiga por flexión rotativa marca Fatigue Dynamics, modelo RBF-200.

Se realizaron 20 ensayos de fatiga recubiertas con una súper aleación base Níquel comercialmente conocida como Colmonoy, con 4 niveles distintos de esfuerzos (565 591 623 651 MPa), todos estos inferiores al esfuerzo de fluencia obtenido en el ensayo de tracción.

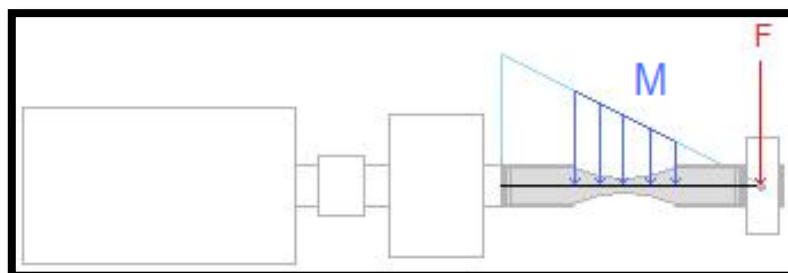


Figura 25 Esquema gráfico de la fuerza y el momento en la máquina de fatiga

El montaje de las probetas se realizó sujetando sus extremos mediante mordazas acopladas al eje del motor y a un eje cónico a través del cual se aplica una carga sobre la probeta ya que el mismo está unido a una barra graduada en función del momento flector (M) el cual es producido por un contrapeso móvil. En vista que el nivel de esfuerzo necesario en cada ensayo se aplica a través de la barra calibrada en función del momento flector, se debe calcular el valor del momento flector para cada uno de los niveles de esfuerzo preestablecidos. Para ello se utilizó la siguiente ecuación:

$$S = \frac{Mx C}{I} \rightarrow M = \frac{Sx I}{C} \quad Ec8$$

Dónde:

M es el Momento flector dado en N.m

S es el esfuerzo aplicado dado en MPa

I es el momento polar de inercia dado en mm^4

C es la distancia desde el eje neutro de carga hasta la superficie de la probeta dado en mm.

$C=D/2$, D es el diámetro de la probeta medido en mm.

Para una barra circular se tiene que

$$I = \frac{\pi x D^4}{64} \quad Ec9$$

Sustituyendo Ec 7 en Ec 6 se tiene la Ec8:

$$M = \frac{S \times \pi \times \frac{D^4}{64}}{\frac{D}{2}} = \frac{S \times \pi \times D^3}{32} \quad Ec10$$

Es por ello que la ecuación para el momento flector será:

$$M = 11,0955 \times Sx D^3 \text{ MPamm}^3 \quad Ec11$$

Todos los ensayos de fatiga se realizaron a una frecuencia de 50 Hz y a una velocidad de 3000 rpm, aunque este último no tenga mayor repercusión en los resultados, se ensayaron a una misma velocidad para disminuir la dispersión de los resultados. Los datos obtenidos de estos ensayos fueron el número de ciclos de falla a fatiga de las probetas para cada uno de los niveles de esfuerzo. Estos datos se agruparon en una tabla para luego proceder a realizar el tratamiento matemático que nos permitió la elaboración de las correspondientes graficas S-N del material y así comparar esta curva con las curvas del sustrato sin recubrir, el sustrato recubierto con Colmonoy 88. Dichos valores fueron modelados por medio de la ecuación propuesta por Basquin a partir de una simple regresión lineal en escala doble logarítmica y de esta forma se establecieron los valores del coeficiente pre-exponencial como el antilogaritmo del intercepto con el eje de los esfuerzos y directamente la pendiente el exponente de Basquin.

3.11 Ensayo de indentación estática

Para conocer la dureza superficial que le proporciona el recubrimiento a nuestro sustrato se realizaron ensayos de indentación estática. Para garantizar confiabilidad se tomaron mediciones de 3 probetas por cada condición de termo-rociado, las cuales fueron especificadas anteriormente, sumando un total de 27 especímenes, a través de un durómetro de base cuadrada marca Buehler.



Figura 26 Equipo de microindentación estática BUEHLER

Este durómetro trabaja con un indentador piramidal de diamante con un Angulo de base de 136°. Para obtener las dimensiones de las huellas es necesario medir las diagonales a través de oculares. Además se debe ajustar el foco a través de tornillos micrométricos.

Luego de ser medidas estas diagonales se utiliza la siguiente formula la cual determina el valor de dureza en escala Vickers.

$$HV = \frac{1.854 L}{d^2} \quad Ec12$$

Dónde:

L = carga aplicada

d = el promedio de la longitud de las diagonales medidas en la huella.

Este procedimiento se realizó con un barrido de cargas de 10, 25, 100, 300 y 500 gr, para cada condición de deposición, todo esto con la intención de lograr un muestreo representativo de la dureza, además de observar las

dependencia funcional existente entre la carga y los valores obtenidos en el ensayo.

3.12 Estudio fractográfico

Utilizando un microscopio electrónico de barrido se realizó el análisis fractográfico de las probetas ensayadas con el objetivo de observar y estudiar con detalle la superficie de fractura mediante el uso de electrones secundarios y el comportamiento recubrimiento-sustrato a través del uso de electrones primarios sobre secciones perpendiculares a la superficie. Se seleccionaron 2 probetas para realizar dicho estudio; un espécimen con el mayor nivel de esfuerzo y bajos ciclajes de vida, otra probeta en representación del menor nivel de esfuerzo y alto número de ciclos, todo esto con el fin de observar el comportamiento en toda la gama de factores posibles.

Para poder realizar el montaje en el microscopio electrónico de barrido las probetas deben ser cortadas en pequeños segmentos de 1 cm. Se realizaron cortes a través de la cortadora de disco abrasivo marca BUEHLER SAMPLMET 2, a muestras para observar su superficie de fractura y poder inferir en los posibles puntos de iniciación de grietas, además se le realizaron cortes longitudinales y transversales respectivamente para luego ser montadas en resinas termo-estables. Posteriormente se procedió al devastado de estas a través de lijas de 120, 180, 240, 360, 400, 600, 800 y 1200 granos, y finalmente se pulieron con una solución de alúmina y agua en una pulidora con disco de paño para poder lograr superficies especulares.



Figura 27 Cortadora de disco abrasivo marca BUEHLER SAMPLMET 2

El estudio se realizó en el Laboratorio de Microscopia Electrónica de la Universidad Central de Venezuela, con el uso de un microscopio de barrido eléctrico marca Hitachi S-240, con un voltaje de aceleración de 25 KV. Las probetas fueron barridas utilizando un cañón de electrones en modo de electrones primarios y secundarios. Para la disposición de las probetas se utilizó un adhesivo y una capa de grafito conductor entre una superficie de aluminio y las probetas dispuestas para su estudio de forma garantizar una óptima conductividad del sustrato.



Figura 28 Equipo de Microscopia Electrónica de Barrido (MEB)

CAPITULO IV

ANALISIS Y RESULTADOS

En esta sección expondremos los resultados obtenidos de los diferentes ensayos realizados, expuestos en tablas, fotos, y figuras para facilitar el análisis. Iniciaremos el análisis con las tablas de los resultados del ensayo a tracción de cuatro probetas nitruradas y recubiertas con la súper aleación base Níquel, luego procederemos al estudio de microindentación estática tanto en el sustrato como en el recubrimiento, continuaremos con el ensayo de fatiga de flexión rotativa de veinte probetas con las características mencionadas anteriormente, para culminar con las imágenes de las probetas fracturadas obtenidas del estudio de microscopía electrónica de barrido.

4.1 Ensayo de tracción

Se realizó el ensayo de tracción a cuatro probetas termoquímicamente tratadas por nitruración y recubiertas con una súper aleación base Nickel comercialmente conocida como Colmonoy 88, estas probetas fueron construidas bajo la norma ASTM 370.

A continuación se presentaran las tablas con los resultados de los ensayos de las cuatro probetas.

Tabla 5 Tabla Ensayo de tracción probeta N°1

Punto N°	Esfuerzo Nominal S[MPa]	Deformación Nominal e	Esfuerzo Real σ [MPa]	Deformación Real ϵ
1	0,000	0,000000	0,000	0,000
2	189,086	0,001049	189,284	0,001
3	378,172	0,001723	378,824	0,002
4	567,258	0,002397	568,618	0,002
5	756,344	0,002320	758,099	0,002
6	850,887	0,004721	854,904	0,005
7	907,613	0,017048	923,086	0,017
8	926,521	0,028039	952,500	0,028
9	945,430	0,050291	992,977	0,049
10	850,887	0,091058	928,367	0,087
11	756,344	0,111179	840,433	0,105
12	680,710	0,125399	766,070	0,118

Tabla 6 Tabla Ensayo de tracción Probeta N°1

Longitud inicial L_0 [mm]	Diámetro inicial D_0 [mm]	Fuerza máxima F_{max} [Mp]	Longitud final L_f [mm]	Diámetro final D_f [mm]
30,3	6,7	3,5	34,3	5
Área inicial A_0 [mm ²]	Cte. de elasticidad muestra $K_{muestra}$	Área final A_f [mm ²]	Cte. de elasticidad experimental $K_{experimental}$	Esfuerzo S_y
35,26	400000,000	19,63	70632,07063	871,5

Tabla 7 Ensayo de tracción probeta N°2

Punto N°	Esfuerzo Nominal S [MPa]	Deformación Nominal e	Esfuerzo Real σ [MPa]	Deformación Real ϵ
1	0,000	0,000000	0,000	0,000
2	188,033	0,000649	188,155	0,001
3	376,065	0,000717	376,335	0,001
4	564,098	0,000785	564,540	0,001
5	752,130	0,002307	753,865	0,002
6	846,146	0,004086	849,604	0,004
7	902,556	0,009401	911,041	0,009
8	921,359	0,017961	937,908	0,018
9	940,163	0,026812	965,370	0,026
10	958,966	0,046717	1003,766	0,046
11	846,146	0,078270	912,374	0,075
12	695,720	0,098522	764,264	0,094

Tabla 8 Ensayo de tracción Probeta N°2

Longitud inicial L_o [mm]	Diámetro inicial D_o [mm]	Fuerza máxima F_{max} [Mp]	Longitud final L_f [mm]	Diámetro final D_f [mm]
29,9	6,7	3,55	33	4,9
Área inicial A_o [mm ²]	Cte. de elasticidad muestra $K_{muestra}$	Área final A_f [mm ²]	Cte. de elasticidad experimental $K_{experimental}$	Esfuerzo S_y
35,26	400000,000	18,86	102324,5402	849

Tabla 9 Ensayo de tracción probeta N°3

Punto N°	Esfuerzo Nominal S [MPa]	Deformación Nominal e	Esfuerzo Real σ [MPa]	Deformación Real ϵ
1	0,000	0,000000	0,000	0,000
2	193,597	0,000369	193,668	0,000
3	387,194	0,000737	387,480	0,001
4	580,791	0,001706	581,782	0,002
5	774,388	0,002375	776,228	0,002
6	871,187	0,004962	875,509	0,005
7	909,906	0,011642	920,500	0,012
8	929,266	0,020388	948,212	0,020
9	935,074	0,027516	960,804	0,027
10	871,187	0,048206	913,183	0,047
11	774,388	0,063037	823,203	0,061
12	696,949	0,071598	746,850	0,069

Tabla 10 Ensayo de tracción Probeta N°3

Longitud inicial L_o [mm]	Diámetro inicial D_o [mm]	Fuerza máxima F_{max} [Mp]	Longitud final L_f [mm]	Diámetro final D_f [mm]
30	6,7	3,44	32,4	5,1
Área inicial A_o [mm ²]	Cte. de elasticidad muestra $K_{muestra}$	Área final A_f [mm ²]	Cte. de elasticidad experimental $K_{experimental}$	Esfuerzo S_y
35,26	400000,000	20,43	73577,50237	860

Tabla 11 Ensayo de tracción probeta N°4

Punto N°	Esfuerzo Nominal S [MPa]	Deformación Nominal e	Esfuerzo Real σ [MPa]	Deformación Real ϵ
1	0,000	0,000000	0,000	0,000
2	188,556	0,000578	188,665	0,001
3	377,113	0,001157	377,549	0,001
4	565,669	0,001735	566,650	0,002
5	754,225	0,002313	755,970	0,002
6	848,503	0,004340	852,186	0,004
7	905,070	0,010421	914,502	0,010
8	923,926	0,017081	939,708	0,017
9	942,782	0,034166	974,993	0,034
10	961,637	0,058201	1017,605	0,057
11	867,359	0,087448	943,208	0,084
12	754,225	0,110035	837,217	0,104

Tabla 12 Ensayo de tracción Probeta N°4

Longitud inicial L_o [mm]	Diámetro inicial D_o [mm]	Fuerza máxima F_{max} [Mp]	Longitud final L_f [mm]	Diámetro final D_f [mm]
29,6	6,8	3,56	33,2	5,1
Área inicial A_o [mm²]	Cte. de elasticidad muestra K_{muestra}	Área final A_f [mm²]	Cte. de elasticidad experimental K_{experimental}	Esfuerzo S_y
36,32	400000,000	20,43	66575,4902	849,5

De los ensayos realizados pudimos obtener el esfuerzo de fluencia promediando los esfuerzos obtenidos con cada probeta, el resultado obtenido fue de 857MPa, con este resultado observamos un ablandamiento con respecto a 1174MPa siendo este el esfuerzo de fluencia de las probetas ensayadas solo con nitrurado.

4.2 Micro indentación

A partir de las probetas SAE 4340 nitruradas y recubiertas con la superaleación base Níquel, se tomó una muestra al azar con la finalidad de realizar el estudio de microindentación estática que nos proporciona los valores de dureza en distintas zonas, tanto en el sustrato como en el recubrimiento.

En la siguiente tabla se presentan los valores de dureza Vickers de los depósitos de la súper aleación base Níquel.

Tabla 13 Dureza del recubrimiento Colmonoy 88 aplicado al acero SAE 4340

Superficie			Intermedio			Zona Inferior		
D1	D2	HV	D1	D2	HV	D1	D2	HV
29	30,5	628,6	28,3	29,9	657	36,1	33,8	455,4
28,8	30,2	639,3	33,6	32,9	503,2	34,6	36,6	466
32	32	553,6	34,4	33,9	477	32,4	33,4	514
Promedio		607,16	Promedio		545,73	Promedio		478,46

Tabla 14 Dureza Vickers a cargas variables en el recubrimiento

Carga	D1	D2	HV	D prom	1/Dprom
50	12,5	13,5	548,60	13	0,07692308
50	12,5	13,8	536,20	13,15	0,07604563
50	13,3	13,5	516,40	13,4	0,07462687
100	15,6	15,6	762	15,6	0,06410256
100	15,3	15,3	752,3	15,3	0,06535948
100	16	16,5	702,3	16,25	0,06153846
200	23	24,3	663,1	23,65	0,0422833
200	23,5	25,4	620,4	24,45	0,0408998
200	22,2	23,3	716,6	22,75	0,04395604
300	29,3	29,3	639,3	29,3	0,03412969
300	27,7	28,4	707,1	28,05	0,03565062
300	26,8	27,4	757,5	27,1	0,03690037
500	36,1	38	675,5	37,05	0,02699055
500	34,6	35,8	748,3	35,2	0,02840909
500	39,2	39,7	595,8	39,45	0,02534854
1000	57	56,2	578,9	56,6	0,01766784
1000	54	55,2	622	54,6	0,01831502
1000	53,2	53,3	651,5	53,25	0,01877934

Con estos datos se realiza la gráfica de dureza Vickers contra el inverso de la diagonal promedio, para obtener de esta manera la dureza intrínseca, la cual es obtenida al intersectar la línea tendencia de todos los puntos graficados con el eje Y.

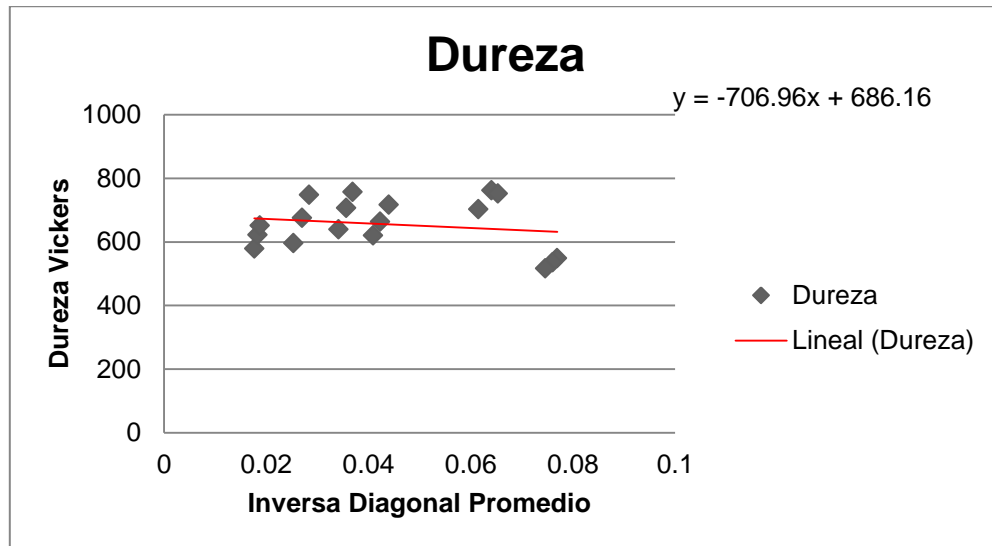


Figura 29 Grafico de dureza Vickers vs el inverso de la diagonal promedio

En la tabla 15 se observan los valores de dureza en diferentes zonas de las probetas. Seguidamente en la tabla 16 se toman los valores del trabajo especial de grado realizado por Paspargelis S. y Perdigón O. (2014), de dureza de las probetas tratadas termoquímicamente sin la deposición del recubrimiento.

Tabla 15 Dureza del sustrato SAE 4340 nitrurado recubierto

N° de Probetas	Capa Blanca (11.0 μm)	Zona de Difusión (38.5 μm)	Zona de Difusión (52 μm)
Probeta 1	270	320,8	313,4
Probeta 2	308	286,2	289,4
Probeta 3	309,8	313	349
Probeta 4	302,8	344,7	319
Probeta 5	319	324,6	320,8
Promedio	301,92	317,86	318,32

Tabla 16 Ensayo de dureza solo con tratamiento termoquímico (Perdigón y Paspigelis 2014)

N° de Probetas	Superficie	Capa Blanca (11.0 μm)	Zona de Difusión (38.5 μm)	Zona de Difusión (52 μm)
Probeta 1	712,1	648,25	440,1	431,25
Probeta 2	768,8	661,85	406	414,95
Probeta 3	749,2	567,4	445,1	401,1
Probeta 4	777,5	645	444,75	356,35
Promedio	751,9	630,625	433,98	400,91

Como podemos observar en las tablas anteriores, se encuentra una disminución considerable en la dureza del acero 4340 nitrurado y recubierto en comparación con el estudio sin recubrimiento, esto nos indica que la deposición del recubrimiento ablando el sustrato, toda la dureza ganada por el proceso de nitruración se perdió ante la alta temperatura en la deposición de la súper aleación por HVOF, esto nos indica que en vez de ver un

aumento en la dureza del sustrato causado por el efecto sharpening, donde las partículas golpean la superficie y causan un endurecimiento de la zona.

4.3 Ensayo de fatiga

A partir del esfuerzo de fluencia obtenido de los ensayos de tracción, se tomaron cuatro porcentajes para obtener los cuatro niveles correspondientes de esfuerzo para el cálculo necesario del momento flector en el estudio de fatiga rotativa.

A continuación se presentan las tablas de los resultados correspondientes a su nivel de esfuerzo:

Tabla 17 Resultados de los ensayos de fatiga a 565 MPa

Probeta	Diámetro	Momento	Esfuerzo (MPa)	Nº de Ciclos
1	6,52	136,241836	565	301000
2	6,57	139,400332	565	457800
3	6,67	145,86302	565	733800
4	6,87	159,381501	565	159000
5	6,64	143,903693	565	213200
Promedio				372960
Desviación estándar				231237,817

Tabla 18 Resultados de los ensayos de fatiga 591 MPa

Probeta	Diámetro	Momento	Esfuerzo (MPa)	N° de Ciclos
6	6,65	151,206921	591	0
7	6,49	140,553228	591	790800
8	6,64	150,52581	591	478400
9	6,67	152,575301	591	351800
10	6,65	151,206921	591	0
Promedio				540333,333
Desviación estándar				336328,054

Tabla 19 Resultados de los ensayos de fatiga 623 MPa

Probeta	Diámetro	Momento	Esfuerzo (MPa)	N° de Ciclos
11	6,6	155,825707	623	88400
12	6,61	156,535079	623	150300
13	6,69	162,287718	623	168500
14	6,54	151,614432	623	266700
15	6,55	152,310975	623	308200
Promedio				196420
Desviación estándar				99339,6077

Tabla 20 Resultados de los ensayos de fatiga 651 MPa

Probeta	Diámetro	Momento	Esfuerzo (MPa)	Nº de Ciclos
16	6,66	167,310397	651	178900
17	6,56	159,886487	651	106300
18	6,67	168,065179	651	84400
19	6,79	177,300338	651	71400
20	6,65	166,557877	651	77200
Promedio				103640
Desviación estándar				44101,6213

En el siguiente gráfico (figura 30) se proyectan los valores obtenidos en los ensayos de fatiga rotativa al aire para los cuatro niveles de esfuerzo estudiados, a partir de estos valores se obtiene la recta de tendencia.

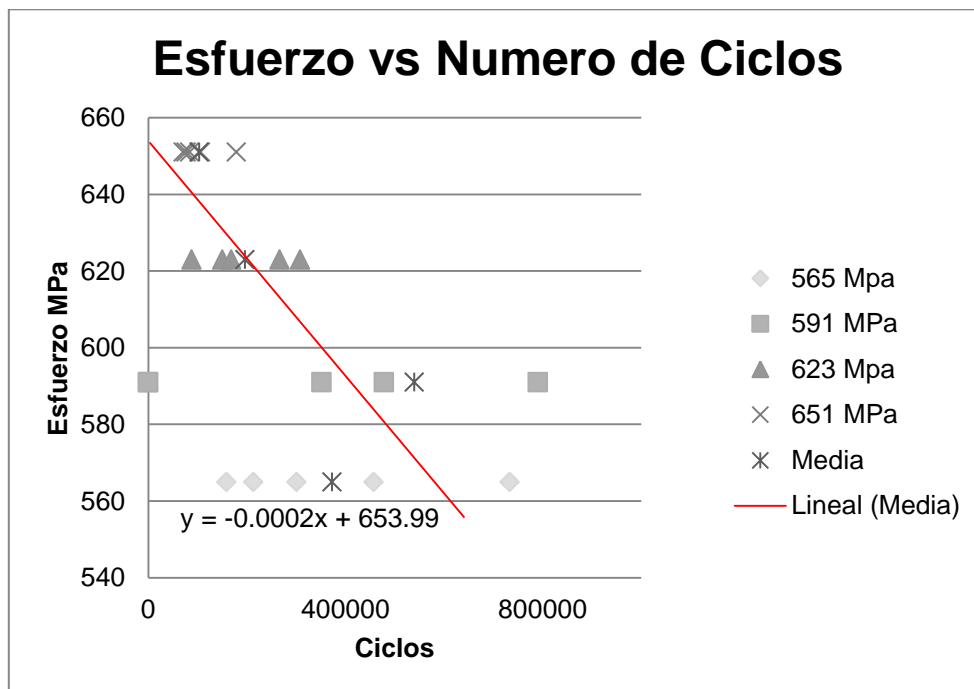


Figura 30 Gráfica esfuerzo vs ciclos

La gráfica mostrada anteriormente se obtuvo a partir de lo establecido en la norma respectiva, tomando el conjunto total de puntos y aplicando la regresión correspondiente. En ocasiones es cuestionada esta manera de operar por el grado de incertidumbre al valor real de la vida a la fatiga, por esta razón se aplica el tratamiento estadístico previo a los datos experimentales, esto origina una nueva gráfica que representa mejor el comportamiento vida-resistencia del material.

Se observa en el gráfico (Figura 30) que a niveles bajos de esfuerzos hay una mayor dispersión de los resultados, a niveles altos, los resultados están en grupos más cerrados. A esfuerzos bajos los eventos que condicionan la vida a la fatiga de las piezas es la nucleación, por el contrario para altos niveles de esfuerzos es la etapa de propagación.

Con los datos obtenidos se construyen las curvas de vida empleando el método de distribución de Weibull, haciendo uso del programa Weibull++ 9. En la Figura 31 se observan las curvas de Función de Densidad de Probabilidad o Distribución de Probabilidad para variables aleatorias continuas vs el número de ciclos para cada nivel de esfuerzo.

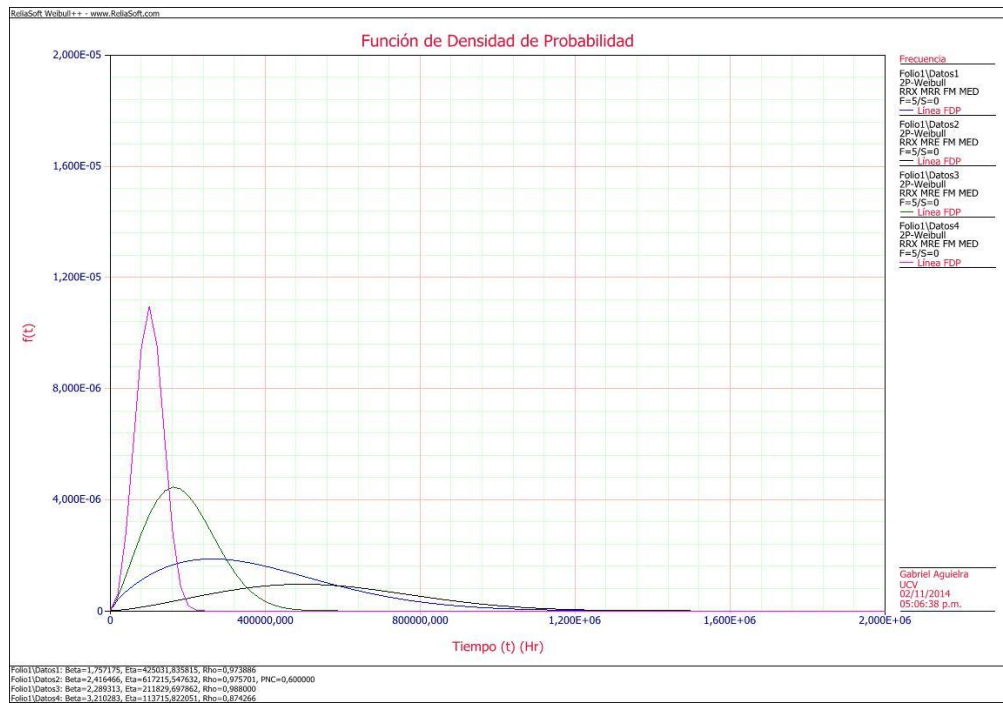


Figura 31 Función de densidad de probabilidad de Weibull para fatiga al aire del acero SAE 4340 nitrurado y recubierto con súper aleación base Níquel

A simple vista se observa la dependencia entre la forma de la curva y el nivel de esfuerzo bajo el que se realizó el ensayo. A medida que incrementa el nivel de esfuerzo, la amplitud de la curva se estrecha rápidamente generando curvas más cerradas. Esto sugiere una disminución en la desviación estándar y esto acarrea una mayor certeza de que el valor en tiempo de ocurrencia del evento de falla estará más cerca de la denominada vida media.

En la siguiente tabla se presenta los valores de la distribución reportando el esfuerzo empleado, la vida media promedio y el tipo de distribución de Weibull utilizada.

Tabla 21 Esfuerzos y vida media corregida por Weibull

Esfuerzo (MPa)	Vida Media	Distribución Empleada
565	425031	Weibull 2 Parámetros
591	617215	Weibull 2 Parámetros
623	211829	Weibull 2 Parámetros
651	113716	Weibull 2 Parámetros

Con estos valores de vida media para cada nivel de esfuerzo, se procede a graficar las curvas Esfuerzo vs Ciclos

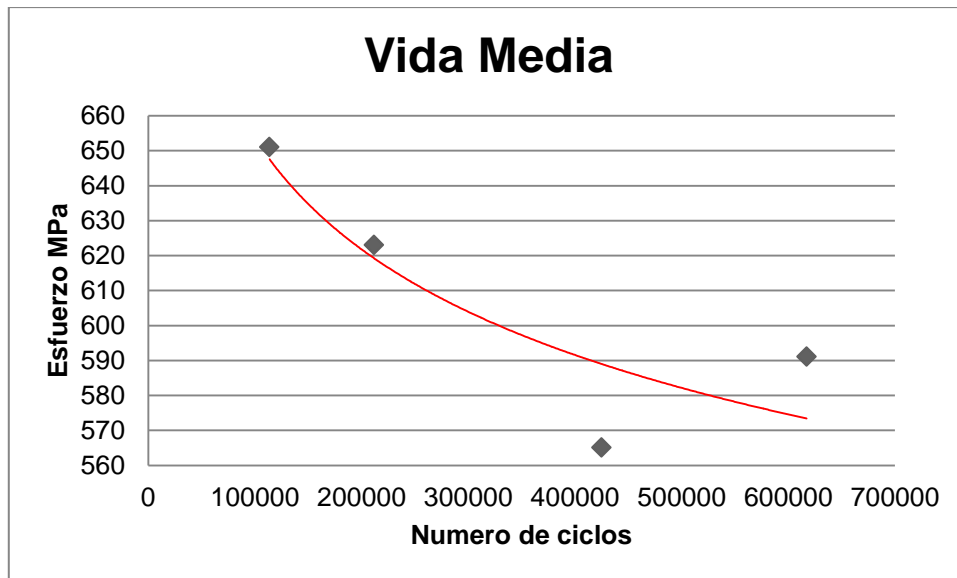


Figura 32 Curva Esfuerzo vs Ciclos corregida por Weibull

De igual manera se presenta la gráfica anterior en base logarítmica a partir de la tabla

Tabla 22

Log (S)	Log (N)
2,752048448	5,62842061
2,771587481	5,79043647
2,794488047	5,32598542
2,813580989	5,05582157

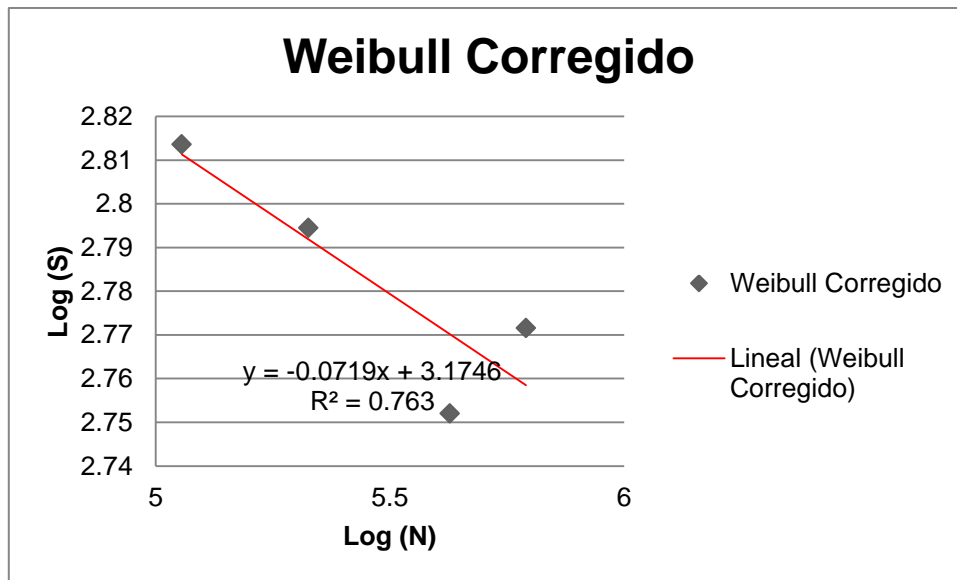


Figura 33 Log (S) vs Log (N) del acero SAE 4340 Niturado y recubierto con súper aleación base Níquel

Con la recta obtenida en la Figura 33 para la fatiga de las probetas nitruradas y recubiertas, se pueden determinar los parámetros de las ecuaciones de Basquin.

Tabla 23 Datos de la curva obtenida a partir de la gráfica Log(S) vs Log(N) del acero SAE4340 Niturado y Recubierto.

Pendiente	Interseccion (ejeY)	R ²
-0,0718605	3,17457784	0,76303655

Tabla 24 Parámetros obtenidos para la ecuación de Basquin

b	Sf
-0,0718605	1494,78193

De esta manera se expresa la ecuación de Basquin como:

$$S_a = 1494,78(N_f)^{-0.07186} \quad Ec13$$

Obteniendo estos datos podemos comparar con un ensayo de fatiga al aire realizado a un acero SAE 4340 sin tratamiento termoquímico de nitruración hecho por M. Moreno y L. Cabeza at (2004) donde reflejan la siguiente tabla de resultados.

Tabla 25 Resultados ensayo de fatiga acero SAE 4340

Esfuerzos (MPa)	539	571	603	634
N° de Ciclos	554.700	242.600	190.200	127.900
	495.000	422.000	174.400	91.500
	581.700	274.600	206.600	131.900
	383.000	281.000	203.300	111.600
	877.200	298.900	229.300	143.600
	1.499.500	226.400	152.800	136.800
	731.850	290.917	192.767	123.883

Como se hizo anteriormente para los datos obtenidos en este trabajo de grado, se aplicará la metodología de Weibull nuevamente para tener la mayor precisión al momento de comparar gráficas.

De esta manera surge la siguiente tabla con los valores corregidos por Weibull expresado logarítmicamente

Tabla 26 Resultados corregidos de ensayo de fatiga en acero SAE 4340

Log(S)	Log(Nf)
2,731589	5,84798
2,756636	5,466105
2,780317	5,289297
2,802089	5,09741

A continuación se muestra una gráfica comparativa entre el acero SAE 4340 nitrurado y recubierto con súper aleación base Níquel y SAE 4340 en su estado original

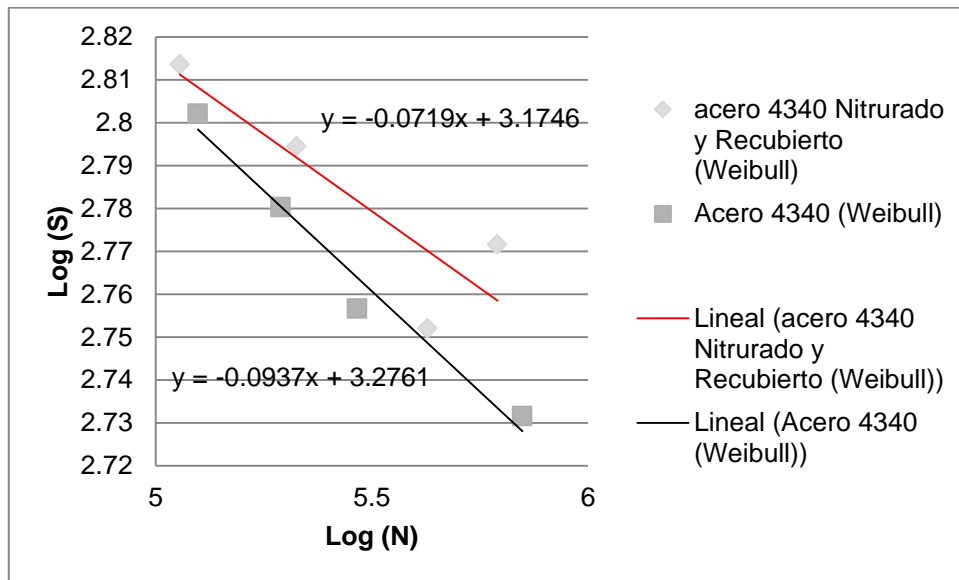


Figura 34 Comparación Logarítmica del ensayo de fatiga a distintos niveles de esfuerzos entre el acero SAE 4340 nitrurado y recubierto y en su estado original

Tabla 27 Comparación entre esfuerzos iguales de 4340 y 4340 nitrurado recubierto en escala logarítmica

Log(S)	Log(Nf) 4340	Log(Nf) Nitrurado y Recubierto
2,731589	5,84798	6,16148818
2,756636	5,466105	5,81312935
2,780317	5,289297	5,48376912
2,802089	5,09741	5,18095967

Los resultados anteriores demuestran un aumento en la resistencia a la fatiga con respecto al material base de un 20%.

4.4 Análisis de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)

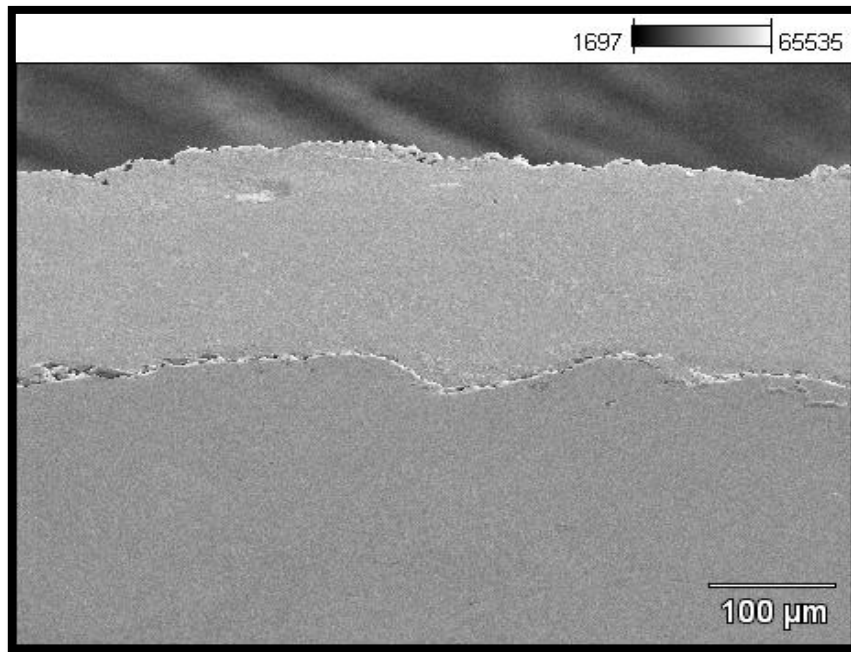


Figura 35 Probeta 19 (651MPa). Corte longitudinal visto a 300X, voltaje de aceleración 18kV

De la figura anterior, podemos observar un anclaje mecánico deficiente entre el sustrato y el recubrimiento, es posible que esta condición pueda ser asociada a la dureza superficial de la sustrato, en condiciones normales, el acero SAE 4340 es capaz de permitir un anclaje adecuado al ser sometido a un recubrimiento mediante la técnica de termorrociado por HVOF, sin embargo al estar tratado termoquímicamente por nitruración previo a la deposición del recubrimiento y la composición de la súper aleación base Níquel, no permiten que se alcance los valores de ductilidad en la superficie del sustrato ni los de energía cinética de las partículas proyectadas que garantizarían un buen anclaje mecánico. Como consecuencia se aprecia un rápido deterioro durante la aplicación de las cargas cíclicas que originan el desprendimiento del recubrimiento para todas las cargas aplicadas, esto puede detallarse en las figuras 36, 37 y 38

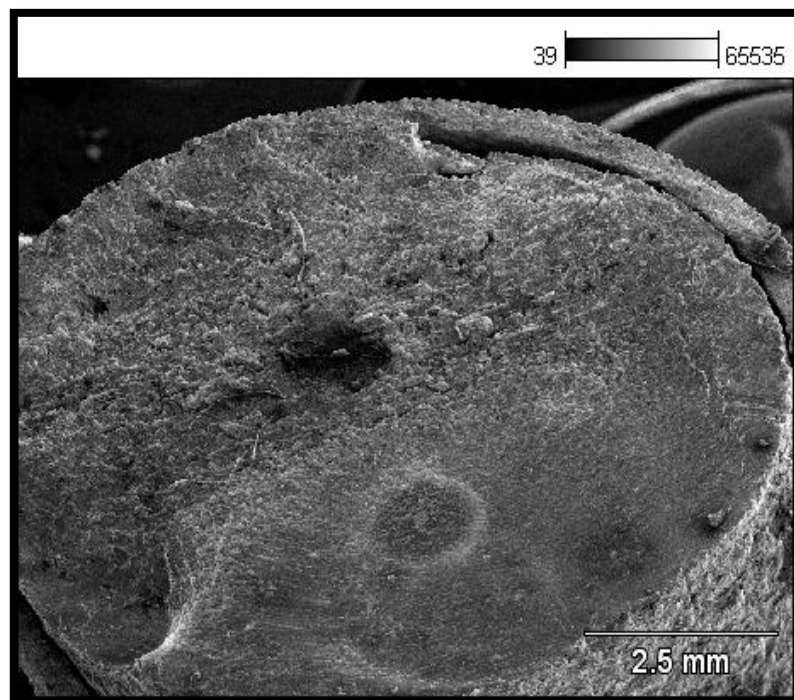


Figura 36 Probeta 19 (651MPa). Corte transversal visto a 20X, voltaje de aceleración 18kV

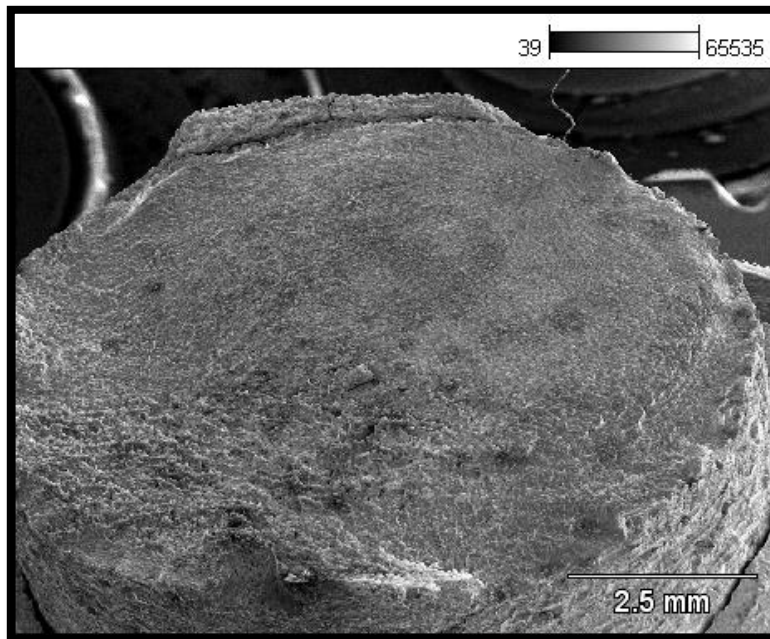


Figura 37 Probeta 2 (565MPa) Corte Transversal visto a 20X, voltaje de aceleración 18kV

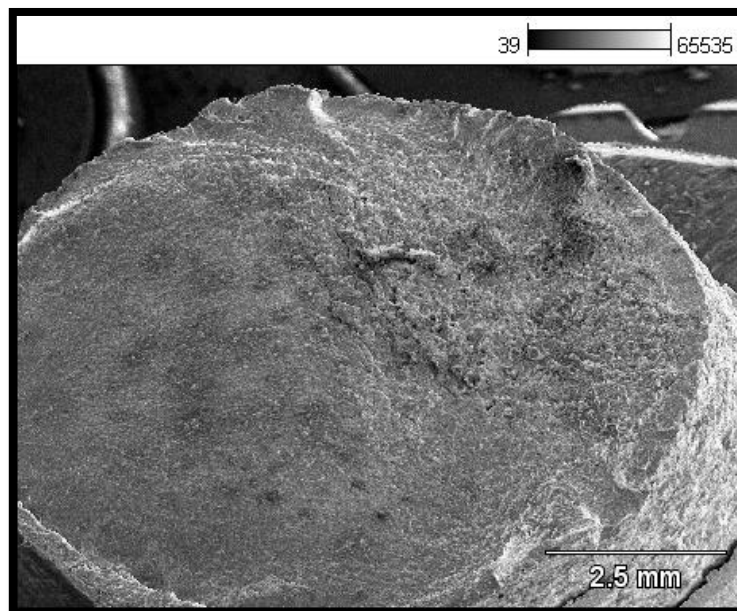


Figura 38 Probeta 2 (565MPa) Corte Transversal visto a 20X, voltaje de aceleración 18kV

Como comentamos anteriormente, es muy claro el desprendimiento del depósito, cosa que asevera lo supuesto de la caracterización preliminar de la condición de adherencia de la intercara, estas imágenes demuestran que es muy probable que una vez nucleada una grieta superficial, esta cambie la dirección de avance en la intercara a través de la interface, desprendiendo el recubrimiento. Este cambio en la dirección de la grieta se genera por la condición típica de esfuerzos residuales en compresión que se generan localmente, se puede atribuir a esta razón el hecho de que observemos un incremento en la vida a la fatiga, en comparación con el substrato original, ya que esta desviación en la dirección de propagación de la grieta, supone un mayor recorrido antes de retomar su dirección de propagación original, la cual sería transversal al eje de aplicación de la carga, con el consecuente consumo de la sección transversal y finalmente la sobrecarga que ocasionará la fractura.

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Una vez analizados los resultados obtenidos en el presente estudio, se presentan a continuación las conclusiones más relevantes:

- El acero SAE 4340 nitrurado y recubierto con la súper aleación en base Níquel conocida comercialmente como Colmonoy 88, presentó un aumento en la resistencia a la tracción en comparación con el material sin tratamiento ni recubrimiento.
- El conjunto sustrato tratamiento termoquímico recubrimiento presenta una mejor expectativa de vida bajo condiciones de fatiga comparado con el sustrato sin tratar termoquímicamente y sin recubrir.
- En la mayoría de las muestras no se observaron grietas adicionales paralelas a la superficie de fractura lo cual nos indica que la cantidad de ciclos que se presentan desde el inicio de la primera grieta discernible hasta la fractura es muy bajo, lo cual no permite la generación de grietas adicionales.
- No es posible hacer el cálculo de la tenacidad de fractura debido a que el intervalo de tiempo en que se crea la primera grieta hasta que se fractura la probeta es muy corto, impidiendo a que se generen grietas adicionales a la superficie de fractura.
- No se genera una superficie adecuada para un buen anclaje mecánico debido a que el endurecimiento superficial es mayor a la energía cinética con que se deposita el recubrimiento.
- Lo que se gana en dureza superficial gracias al tratamiento termoquímico y que eso confiere esfuerzo residuales en compresión a

la superficie del substrato lo pierdo con el ablandamiento que experimenta el material al recibir las partículas a alta temperatura.

5.2 Recomendaciones

- Se recomienda la adquisición de pinzas nuevas para las máquinas de ensayos de fatiga, ya que, están desgastadas y es difícil que la probeta quede centrada adecuadamente lo cual genera cargas externas que producen desviaciones en los resultados.
- Realizar el estudio de vida a la fatiga en medio corrosivo.
- Al momento del montaje de las probetas para llevar a cabo el recubrimiento, cubrir toda la superficie de los hombros para evitar que se deposite recubrimiento en los mismos ya que esto puede llegar a provocar deslizamientos o vibraciones a la hora del ensayo en la máquina de fatiga.
- No es adecuado someter a un tratamiento termoquímico a la probeta previo a la proyección térmica ya que genera un mayor costo en la pieza sin que impliquen mejoras en sus propiedades.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- 1 ASTM DESIGNATIONS A-370-03A (2003) Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products. Editorial ASTM International.
- 2 ASTM DESIGNATIONS E-606-04 (2005) Standard Practice for Strain-Controlled Fatigue Testing. Editorial ASTM International. Cincinnati.
- 3 ASM HANDBOOK (1992) Metallography and Microstructures Volumen 9. 9th edition.
- 4 ASTM HANDBOOK (1985) Failure Analysis and Prevention Volumen 10. 9na.edición.
- 5 Aviles, R. (2005). Análisis de Fatiga en Máquinas. Thomson.
- 6 Ban, Z. G. y Shaw, L. L. (2003). "Characterization of thermal sprayed nanostructured WC-Co coatings derived from nanocrystalline WC-18wt.%Co powders".
- 7 Berget, J., Rogne, T. y Bardal, E. (2007). "Erosion-corrosion properties of different WC-Co-Cr coatings deposited by the HVOF process". Elsevier.
- 8 Callister, W. (2004) "Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales". Barcelona, España: Reverté..
- 9 Cho T y otros (2008) "A study on HVOF coatings of micron and nano WC-CO powders". Surface & Coatings Technology
- 10 C.J. Villalobos-Gutiérrez y otros (2008) "Fatigue and Corrosion-Fatigue Behavior of an AA6063-T6 Aluminum Alloy Coated with a WC-10Co-4Cr Alloy Deposited by HVOF Thermal Spraying".
- 11 Crisanto, José. (2012) "Comportamiento a la fatiga del acero SAE 4340 recubierto con película delgadas, obtenidas por deposición física en fase vapor asistida por plasma (PAPVD)". Escuela de Ingeniería Mecánica,

Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela

- 12 E.S. Puchi-Cabrera y otros (2006) “ Fatigue performance of a SAE 1045 steel coated with a Colmonoy 88 alloy deposited by HVOF thermal spray” Surface & coating technology.
- 13 F. Oliveira y otros (2001) “Corrosion-fatigue properties of a 4340 steel coated with Colmonoy 88 alloy, applied by HVOF thermal spray” Surface & coating technology.
- 14 Hernandez J y Rada L. (2011) “Evaluación del comportamiento a la fatiga al aire y fatiga corrosión de un acero micro aleado 4340 recubierto con depósitos de WC-12%CO reforzados por nanotubos de carbono”.Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela
- 15 Joa Cecilia. (2010) “ Estudio del comportamiento a la fatiga de un acero estructural de tipo SAE 4340 templado y revenido, recubierto con una película de CrN obtenida por un proceso de deposición física en fase vapor asistido por plasma” Caracas, Venezuela.
- 16 L. Hernandez y otros(2000) “ Fatigue properties of a 4340 steel coated with a Colmonoy 88 deposit aplied by High velocity oxygen fuel” Surface & coating technology.
- 17 Mingheng Lly otros (2004) “Model-Based Estimation and Control of Particle Velocity and Melting in HVOF Thermal Spray” Chemical Engineering Science.
- 18 Paspirgelis S y Perdigon O. (2014) “estudio de la vida de la fatiga al aire del acerosae 4340 tratado termoquímicamente con el proceso de nitruración”
- 19 Powell, G. W. y Mahmoud, S. E. (1986). Metals Handbook, Failure analysis and prevention. Asm Intl.
- 20 Weibuull, W. (1961) “Fatigue Testing and Analysis of results”. Oxford: Pergamond Press.

- 21 Yunfei Q., Traugott E. Fischery Andrew Den“The Effects of Fuel Chemistry and Feedstock Powder Structure on the Mechanical and Tribological Properties of HVOF Thermal-Sprayed WC–Co Coatings With Very Fine Structures