

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO A LA FATIGA DE UN ACERO MICROALEADO 4340 RECUBIERTO CON DEPÓSITOS NANOESTRUCTURADOS DE WC-12%Co SINTETIZADOS POR TERMORROCIADO.

Presentado Ante La Ilustre

Universidad Central de Venezuela

Por Los Bachilleres:

Gonzalo I. Rodríguez del Villar F.

Eduardo A. Salazar T.

Para optar por el título de

Ingeniero Mecánico.

Caracas 2010

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO A LA FATIGA DE UN ACERO MICROALEADO 4340 RECUBIERTO CON DEPÓSITOS NANOESTRUCTURADOS DE WC-12%Co SINTETIZADOS POR TERMORROCIADO.

TUTOR ACADÉMICO: Profesor Crisanto J. Villalobos G.

Presentado Ante La Ilustre
Universidad Central de Venezuela

Por Los Bachilleres:

Gonzalo I. Rodríguez del Villar F.

Eduardo A. Salazar T.

Para optar por el título de
Ingeniero Mecánico.

Caracas 2010



Universidad Central de Venezuela
Facultad de Ingeniería
INGENIERIA MECÁNICA
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍA DE PRODUCCIÓN

Caracas, 11 de noviembre de 2010

Prof. GERARDO RAMÍREZ
Jefe de la División de Control de Estudios
Facultad de Ingeniería

Presente.-

Quienes suscriben, Miembros del Jurado Examinador designado por el Consejo de la Escuela de Ingeniería Mecánica, nos dirigimos a usted con la finalidad de informarle que hemos decidido otorgarle a los Bachilleres:


**GONZALO RODRÍGUEZ, C.I.V. 18.588.266 y
EDUARDO SALAZAR, C.I.V.- 18.752.250**

“MENCIÓN TRABAJO ESPECIAL DE GRADO”

Por la excelencia demostrada en la realización del Trabajo Especial de Grado titulado:


**“EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO A LA FATIGA DE UN
ACERO MICROALEADO 4340 RECUBIERTO CON DEPÓSITOS
NANOESTRUCTURADOS DE WC-12%Co SINTETIZADOS POR
TERMORROCIADO”**

Sin otro particular a que hacer referencia, quedamos de usted,


Prof. María de los A. Rodríguez
Jurado




Prof. José Gregorio La Riva
Jurado


Prof. Crisanto Villalobos
Tutor

DEDICATORIA

A nuestras familias, quienes brindaron apoyo incondicional, principios y valores que desarrollaron cualidades para lograr las metas que nos hemos planteado.

A nuestra alma mater que nos brindó la oportunidad y herramientas para nuestro desarrollo integral como profesionales comprometidos con los requerimientos de nuestro país.

A nuestros compañeros universitarios que conformaron una fortaleza en el proceso de formación universitaria.

A mi compañero de tesis que siempre mostro un apoyo incondicional y motivación para culminar esta etapa.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por otorgarnos la oportunidad de vivir.

A la Universidad Central de Venezuela por brindarnos su esencia y hacer de nosotros profesionales íntegros, éticos y abnegados con los buenos principios de la práctica profesional y actuación en la vida.

A nuestro tutor académico y amigo, profesor Crisanto Villalobos quien de forma incondicional nos brindo apoyo, conocimientos e invalorable experiencias que fortalecieron nuestra personalidad y nuestra preparación para las etapas restantes en nuestras vidas.

A nuestros padres, madres y hermanos que se mantuvieron a nuestro lado en todo nuestro recorrido universitario brindando alegría, optimismo y entendimiento para motivarnos en este camino y fortalecernos internamente.

A todas las personas que de una forma u otra formaron parte de este camino y representaron motivación y apoyo para el correcto aprendizaje a lo largo de nuestra carrera universitaria.

**Rodríguez del Villar F. Gonzalo I.
Salazar T. Eduardo A.**

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO A LA FATIGA DE UN ACERO MICROALEADO 4340
RECUBIERTO CON DEPÓSITOS NANOESTRUCTURADOS DE WC-12%Co SINTETIZADOS POR
TERMORROCIADO.**

**Tutor Académico: Prof. Crisanto J. Villalobos G.
Tesis. Caracas, Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería.
Escuela de Ingeniería Mecánica. Año 2010, 88 pp.**

Palabras Claves: Resistencia a la fatiga, AISI 4340, Recubrimiento, Fatiga, nWC-12%Co.

Resumen

El presente trabajo tiene por objeto la evaluación del comportamiento a la fatiga de probetas de acero 4340 recubiertas con polvos nanoestructurados de WC-12%Co a través del método de deposición de proyección de partículas fundidas a altas velocidades HVOF, además también se realizó una optimización del método de deposición del recubrimiento. Los ensayos de fatiga al aire se llevaron a cabo en condición de flexión rotativa con muestras recubiertas. Para lograr el objetivo se recubrieron 13 probetas, obteniendo espesores en el rango de 400 y 500 micras. La evaluación del comportamiento del sustrato recubierto se realizó en el intervalo de vida finita en términos de resistencia a la fatiga con esfuerzos que variaron entre 471Mpa y 650Mpa. En la optimización realizada en este estudio se recubrieron 6 muestras con condiciones de deposición diferentes, los parámetros a variar para lograr las 6 condiciones diferentes fueron la tasa de alimentación de los polvos y el flujo de combustible, en valores comprendidos entre (70 y 100 gr/min) y (5-6, 6-7, 7-8 GPH) respectivamente. A las 6 muestras antes descritas se les realizó un ensayo de microindentación estática con un barrido de cargas comprendido entre 100 gr y 500gr, dando como resultado una menor dispersión en los datos y por ende una condición mecánica más homogénea en la condición de flujo de combustible de 6-7 GPH. Finalmente de los resultados obtenidos en estas pruebas preliminares pareciera ser que la condición que garantizaría en principio un sólido más denso, más homogéneo desde el punto de vista de la distribución químico elemental y por ende de los micro constituyentes que allí coexisten, asociado esto definitivamente a una condición más uniforme en cuanto a la respuesta mecánica esperada, sería la que combina un flujo de combustible del orden de los 6-7 GPH y una tasa de alimentación de polvos de 70 gr/min. Así mismo el estudio fractográfico permitió establecer algunas luces en relación a los mecanismos de falla operantes y la influencia de estos depósitos en el evento de nucleación estando asociado este fundamentalmente a partículas de alúmina provenientes del arenado previo que se realiza para mejorar el anclaje mecánico de las partículas de recubrimiento proyectadas sobre el sustrato.

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS	4
OBJETIVO GENERAL	4
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
1. MARCO TEÓRICO.....	5
1.1 Nanotecnologías	5
1.2 Sustrato.....	6
1.2.1 Introducción a los aceros.....	6
1.2.2 Acero AISI 4340	7
1.2.3 Tratamientos térmicos.....	8
1.3 Técnica de deposición.....	10
1.3.1 Generalidades.....	10
1.3.2 Rociado térmico	10
1.3.3 Procesos de Rociado Térmico.....	11
1.3.4 Rociado térmico a velocidades hipersónicas HVOF.....	12
1.4 Aplicaciones del proceso de HVOF.....	13
1.4.1 Restauración de piezas desgastadas	13
1.4.2 Protección contra la corrosión.....	14
1.4.3 Incremento de la resistencia al desgaste.....	14
1.5 Variables presentes en el proceso de deposición	15
1.5.1 Velocidad de alimentación de los polvos.....	15

1.5.2 Distancia de rociado.....	15
1.5.3 Relación oxígeno-combustible.....	16
1.5.4 Presión en la cámara de combustión	18
1.5.5 Morfología de los polvos	19
1.6 Fatiga.....	22
1.7 Etapas presentes en el fenómeno de fatiga.....	23
1.8 Tipos de esfuerzos presentes en la fatiga	29
1.8.1 Ciclo de inversión total:	30
1.8.2 Ciclos de esfuerzos traccionantes repetidos.....	31
1.8.3 Ciclo de esfuerzos en tensión con reposo absoluto (carga-descarga).	32
1.8.4 Ciclo de esfuerzos aleatorios.....	33
1.9 Límite de fatiga	35
1.10 Vida a la fatiga	37
1.11 Fatiga en materiales recubiertos.....	38
2. MARCO METODOLÓGICO.....	43
2.1 Diagrama de Flujo.....	43
2.2 Cantidad de especímenes utilizados.....	44
2.3 Preparación de los Especímenes Previo a la Deposición	44
2.3.1 Pulido Metalográfico.....	45
2.3.2 Limpieza y Montaje	46
2.3.3 Granallado o sand blasting	48
2.4 Deposición del recubrimiento	49
2.4.1 Microindentación estática	52
2.5 Descripción de los polvos utilizados.....	54

2.6 Fatiga al Aire.....	54
2.7 Estudio Fractográfico	57
3. ANÁLISIS Y RESULTADOS DEL ESTUDIO.....	59
3.1 Estudio de Micro Indentación Estática	59
3.2 Fatiga.....	69
3.3 Análisis Fractográfico	73
4.1 CONCLUSIONES	85
4.2 RECOMENDACIONES.....	86
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Representación del proceso de termorrociado HVOF 13

Figura 1.2 Gráfico de la dureza vs los parámetros de deposición de un recubrimiento de WC-Co (T.Y CHO 2008)..... 20

Figura 1.3 Gráfico de la porosidad vs los parámetros de deposición de un recubrimiento de WC-Co (T.Y CHO 2008) 21

Figura 1.4 Gráfico del coeficiente de fricción vs los parámetros de deposición de un recubrimiento de WC-Co (T.Y CHO 2008) 21

Figura 1.5 Morfologías características de superficie de fractura ocasionadas por fatiga. AVILES, R (2005) “Análisis de fatiga en máquinas” 24

Figura 1.6 Morfologías características vinculadas con..... 28 factores como varios puntos de nucleación de grietas y las formas..... 28 originadas a partir de estas particularidades.(Joa, C., 2010)..... 28

Figura1.7 Gráfica representativa de una carga cíclica a inversión completa. 30

Figura 1.8 Gráfica representativa de una carga cíclica en tensión repetida. 31

Figura 1.9 Gráfica representativa de una carga cíclica con esfuerzos en tensión con reposo absoluto. 32

Figura 1.10 Grafica representativa de un ciclo de esfuerzos aleatorios. 33

Figura 2.1Fotografía del proceso de lijado. 46

Figura 2.2 Imagen de una de las probetas de dureza utilizadas. 47

Figura 2.3 Imagen del montaje realizado a las probetas de dureza (tercera muestra de izquierda a derecha) 47

Figura 2.4 Acabado de las probetas de dureza luego del granallado. 48

Figura 2.5 Equipo de rociado térmico por HVOF. 50

Figura 2.6 Proceso de rociado térmico por HVOF. 51

Figura 2.7 Equipo de indentación estática. 52

Figura 2.8 Equipo de microindentación estática BUEHLER 52

Figura 2.9 Polvos utilizados para la deposición de la película de recubrimiento. 54

Figura 2.10 Máquina de fatiga por flexión rotativa marca Fatigue Dynamics, modelo RBF-200.....	55
Figura 2.11 Microscopio electrónico de barrido marca Hitachi S-2400.....	58
Figura 3.1 Gráfica dureza vs inverso de la diagonal promedio condición 5-6 GPH 70 gr/min.	63
Figura 3.2 Gráfica dureza vs inverso de la diagonal promedio condición 6-7 GPH 70 gr/min.	64
Figura 3.3 Gráfica dureza vs inverso de la diagonal promedio condición 7-8 GPH 70 gr/min.	64
Figura 3.4 Gráfica dureza vs inverso de la diagonal promedio condición 5-6 GPH 100 gr/min.	65
Figura 3.5 Gráfica dureza vs inverso de la diagonal promedio condición 6-7 GPH 100 gr/min.	65
Figura 3.6 Gráfica dureza vs inverso de la diagonal promedio condición 7-8 GPH 100 gr/min.	66
Figura 3.7 Gráfica de dureza comparativa de los diferentes flujos de combustible a una tasa de alimentación de 70 gr/min.	66
Figura 3.8 Gráfica de dureza comparativa de los diferentes flujos de combustible a una tasa de alimentación de 100 gr/min.	67
Figura 3.9 Gráfica de dureza comparativa de las diferentes tasas de alimentación a un flujo de combustible de 5-6 GPH.....	67
Figura 3.10 Gráfica de dureza comparativa de las diferentes tasas de alimentación a un flujo de combustible de 5-6 GPH.....	68
Figura 3.11 Gráfica de dureza comparativa de las diferentes tasas de alimentación a un flujo de combustible de 5-6 GPH.....	68
Figura 3.12 Grafica logS-logN comparativa del 4340 bonificado, 4340 recubierto con colomonoy 88 y 4340 recubierto con WC-12%Co nanoestructurado.....	71
Figura 3.13 Vista general de la zona de fractura del conjunto sustrato recubrimiento ensayado a fatiga al aire. a) La falla ocurrió a los 3.239.300 ciclos de aplicación de la	

carga y el ensayo fue realizado a 492 MPa. b) La falla ocurrió a los 58600 ciclos de aplicación de la carga y el ensayo fue realizado a 650 MPa.	73
Figura 3.14 Detalle de la zona de iniciación de la grieta.	74
Figura 3.15 Detalle de la partícula de alúmina causante de la nucleación de la grieta.	75
Figura 3.16 Análisis químico de la partícula de alúmina y del recubrimiento.	76
Figura 3.17 Detalle del conjunto sustrato recubrimiento en la zona de fractura	78
Figura 3.18 Detalle de la interfaz sustrato recubrimiento.	79
Figura 3.19 Interfaz sustrato recubrimiento.	80
Figura 3.20 Detalle del espesor del recubrimiento.	81
Figura 3.21 Análisis químico de una sección sustrato recubrimiento.	82
Figura 3.22 superficie de fractura donde se muestran estriaciones del material.	84

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Composición química en porcentaje de peso del acero AISI 4340.....	8
Tabla 1.2 Probetas requeridas para la realización de los ensayos.....	44
Tabla 2.1 Resumen de condiciones.....	51
Tabla 3.1 Dureza y diagonal promedio del ensayo de indentación estática realizado a la condición 5-6 GPH y 70 gr/min.....	60
Tabla 3.2 Dureza y diagonal promedio del ensayo de indentación estática realizado a la condición 6-7 GPH y 70 gr/min.....	60
Tabla 3.3 Dureza y diagonal promedio del ensayo de indentación estática realizado a la condición 7-8 GPH y 70 gr/min.....	60
Tabla 3.4 Dureza y diagonal promedio del ensayo de indentación estática realizado a la condición 5-6 GPH y 100 gr/min.....	61
Tabla 3.5 Dureza y diagonal promedio del ensayo de indentación estática realizado a la condición 6-7 GPH y 100 gr/min.....	61
Tabla 3.6 Dureza y diagonal promedio del ensayo de indentación estática realizado a la condición 7-8 GPH y 100gr/min.....	61
Tabla 3.7 Resultados obtenidos de los ensayos de fatiga al aire.....	69
Tabla 3.8 Porcentaje de peso de los elementos.....	77
Tabla 3.9 Porcentaje en escala relativa de elementos.....	77

INTRODUCCIÓN

En la actualidad es de vital importancia el estudio de los materiales, ya que el hombre moderno se ha dado a la tarea de diseñar y construir máquinas cada vez más complejas que exigen materiales cada vez más resistentes y duraderos, a fin de satisfacer sus necesidades. Este requerimiento ha impulsado a la ciencia y a la tecnología a investigar en torno a las características intrínsecas de toda res extensa con lo cual se ha logrado mejorar las propiedades de estas sustancias, garantizando un buen desempeño durante el uso de los distintos componentes y elementos de máquina, lo cual se traduce en dispositivos más eficientes, compactos y económicos y es aquí donde esta actividad generadora de conocimiento, tanto básico fundamental, como de naturaleza tecnológica, aporta de forma sustantiva a enriquecer las disciplinas asociadas al diseño en ingeniería lo cual sigue siendo un área de vital importancia en el crecimiento y desarrollo de nuestras sociedades.

Ahora bien en los últimos años las tendencias y horas hombre dedicadas al desarrollo de estos nuevos materiales se ha dividido en dos grandes ramas, una de ellas, la cual ha sido objeto de importantes avances en las últimas décadas es la así llamada Ingeniería de Superficie, dentro de la misma podemos citar a su vez dos tendencias, la primera se basa en la modificación de las porciones superficiales en los materiales volumétricos y la otra la incorporación de depósitos altamente coherentes sobre estas superficies. La finalidad de estos recubrimientos, es mejorar las características de naturaleza superficial que exponen los materiales en general y que son comúnmente denominados dentro de estos sistemas como substratos, en los cuales se ven incorporados cambios importantes en propiedades tales como la dureza, el coeficiente de fricción entre pares tanto en seco como en húmedo, la resistencia al desgaste, estabilidad química ante fenómenos de degradación como por ejemplo la corrosión, estos aspectos que hemos enunciado debemos en principio considerar este un ejercicio académico netamente de carácter enunciativo no limitativo de las

Introducción

bondades que esta rama de las ciencias aporta al desarrollo tecnológico. Todo lo anteriormente expuesto conlleva a la generación o disponibilidad en los mercados de materiales con mejores propiedades que puedan satisfacer las necesidades de la industria, en el entendido que cuando se inicia un proceso de diseño, el individuo involucrado en la materialización del objeto debe tener un conocimiento veraz y preciso del uso y expectativas de rendimiento del mismo durante el servicio, respondiendo a cabalidad ante los estímulos mecánicos externos derivados del servicio en sí mismo, es por esto que la ingeniería esta especialmente interesada en esta tecnología. Una de estas tecnologías es el proceso de proyección térmica a velocidad híper 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, o los de última generación, que implican el uso y manejo de plasmas de baja densidad confinados en reactores de ultra alto vacío.

El campo de la nanotecnología en los materiales ha tenido un gran crecimiento en los últimos años, esto es debido tanto a su novedad como a sus propiedades atractivas. Aunque muchos estudios enfocan su objetivo en la síntesis y procesamiento de materiales nanoestructurados, se ha evidenciado una concientización del potencial de los recubrimientos nanoestructurados para reemplazar a los recubrimientos existentes y a crear nuevas aplicaciones. El termorrociado ha sido ampliamente aceptado como la forma más económica y efectiva para depositar recubrimientos nanoestructurados, 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.

Debido a este desarrollo se hace imperativa la necesidad de estudiar el comportamiento mecánico derivado de las nuevas características aportadas por la presencia de este tipo de recubrimiento nanoestructurado sobre el sustrato, sobre todo en aspectos no tanto relacionados con mecanismos de desgastes derivados de usos que impliquen contacto y movimiento relativo entre dos cuerpos bajo sistemas

estáticos de carga, sino mas bien el efecto que sobre el comportamiento macro mecánico de estos substratos modificados implica la presencia de estas películas bajo la acción de sistemas dinámicos de carga. Es por ello que se ha planteado la realización de este trabajo, que tiene como objeto, el estudio del comportamiento a la fatiga de una aleación de acero microaleado 4340 bonificado, sobre el cual se ha incorporado un deposito de carburo de tungsteno con 12% de cobalto de granulometría nanométrica por la vía del termo rociado a altas velocidades. Con lo cual se persigue entre otras cosas, obtener una aproximación racional de la vida de estos conjuntos, para luego extrapolar de forma sistemática, estas propiedades a lo que representa un elemento estructural, elementos de máquina, partes y piezas en general que están sometidas a cargas cíclicas.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar el comportamiento a la fatiga de especímenes de acero micro aleado 4340 en condición de bonificado, recubiertos con nano polvos de carburo de tungsteno y 12% de cobalto (WC-12%Co) obtenidos a través de la técnica de proyección térmica a velocidades híper sónicas conocido por sus siglas en ingles HVOF.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar las condiciones óptimas de deposición en base a la calidad reflejada en el conjunto sustrato-recubrimiento en términos de su dureza y resistencia mecánica.
- Evaluar el comportamiento a la fatiga de los especímenes recubiertos a partir de las dependencias funcionales existentes entre el esfuerzo alternante y el número de ciclos a falla en el régimen de vida finita.
- Correlacionar los aspectos estructurales observados en las superficies de fractura con los mecanismos de falla experimentados por los especímenes.
- Comparar el comportamiento macro mecánico, tanto estático como dinámico, de estos conjuntos nano estructurados con sistemas químicamente equivalentes convencionales.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 Nanotecnologías

Las tecnologías Nanoscópicas comprenden la nanociencia y la nanotecnología, la nanociencia se refiere al estudio científico de las propiedades del mundo nanométrico y por otra lado la nanotecnología es el estudio, creación, diseño, síntesis, manipulación y aplicación de materiales, aparatos y sistemas funcionales a través del control de la materia a nano escala, y la explotación de fenómenos y propiedades de esta, con aplicaciones diversas (*Estudio de prospectiva tecnológica en nanotecnología 2008*). Nano es un prefijo que se refiere a la millonésima parte de un metro, es decir $1 \times 10^{-6}m$, y es la unidad de medida que es usada en la nanotecnología. Los nanomateriales son materiales cuya dimensión se encuentra entre 1 y 100 nanómetros y estos están subdivididos en nanopartículas, nanocapas y nanocompuestos. Dentro de los nanomateriales los nanopolvos son los que más estudios presentan, ya que se han encontrado grandes avances y aplicaciones para estos. Luego se encuentran los nanotubos de carbono, los nanoalambres, las nanofibras, entre otros.

Los productos o aplicaciones nanotecnológicas son muy diversas, ya que esta es una ciencia interdisciplinaria y además debido a su corto período de estudio todavía se encuentra en una fase de desarrollo en la cual todavía falta mucho por investigar y conocer. Sus principales aplicaciones se dan en la industria médica, en la generación de energía, en las tecnologías de recubrimientos y películas y es usada ampliamente en la electrónica. En el 2005 se comercializó a nivel mundial un total de 9,4 billones de dólares en productos nanoscópicos y se estima que para el 2011 sea de aproximadamente 25,2 millones. A nivel mundial la inversión en nanotecnología para el 2004 fue de 4,8 billones de dólares y cada año aumenta progresivamente, algunos investigadores prevén que esta ciencia es el futuro de la investigación mundial y una

Marco Teórico

empresa especializada en proyecciones, la compañía Deloitte, presentó un informe que establece que en el 2030 la nanotecnología será la base de toda la industria manufacturera. A su vez la NASA (National Aeronautics and Space Administration) y la NSF (National Science Foundation) consideran la nanotecnología como prioridad número 1 dentro de su cartera de proyectos.

Aunque actualmente en nuestro país es poca la investigación que se realiza en la materia, esta presenta un comportamiento creciente, lo que significa que el interés de los científicos nacionales por esta ciencia está en crecimiento. Para el año 1996 sólo 6 publicaciones venezolanas fueron realizadas en materia nanotecnológica, mientras que en el 2005 las publicaciones aumentaron hasta 26.

1.2 Sustrato

1.2.1 Introducción a los aceros

Los aceros son aleaciones de hierro-carbono en las cuales el porcentaje en peso de carbono no supera el 2,1%, esta aleación se caracteriza por tener una resistencia mucho mayor a la del hierro. Dentro de la clasificación de los aceros se encuentran los aceros al carbono y los aceros aleados que son aquellos que presentan elementos aleantes tales como el molibdeno, níquel, vanadio, cromo, etc. Estos elementos le agregan propiedades adicionales al acero que hacen posible el uso de este en gran variedad de aplicaciones.

El carbono es el aleante que más influye en las propiedades del acero, la dureza y la resistencia mecánica aumentan al incrementar el contenido de éste, pero esto a su vez se traduce en mayor fragilidad y menor soldabilidad. Bajo contenido de carbono produce un acero dúctil y de dureza baja, y a su vez un porcentaje de carbono por encima de 2% en peso da lugar a las fundiciones, que son aleaciones

extremadamente frágiles y sin capacidad de ser forjadas ni soldadas. Generalmente los aceros estructurales son de medio contenido de carbono (0,40% – 0,60%) obteniendo así una resistencia mecánica alta y a su vez poca fragilidad, si la condición de diseño requiere una resistencia mecánica más elevada esta se obtiene comúnmente por medio de otros aleantes además del carbono.

1.2.2 Acero AISI 4340

AISI (American Iron and Steel Institute o instituto americano de hierro y acero) en su sistema de designación clasifica a los aceros con cuatro dígitos xxxx, el primer dígito se refiere a la aleación principal, el segundo a la aleación secundaria, y los últimos dos dígitos se refieren al porcentaje en peso de carbono contenido en el acero. El número 4xxx indica que es un acero microaleado o medianamente aleado, 43xx se refiere a sus elementos aleantes que son el níquel, el cromo y el molibdeno, los cuales mejoran las propiedades mecánicas, específicamente la resistencia, dureza en frío y en caliente, resistencia al desgaste y la tenacidad; y los últimos dos números xx40 indican que el porcentaje de peso de carbono presente en la aleación es de 0,4%. Esta aleación tiene una gran resistencia a la fatiga y por esto un amplio uso comercial en aplicaciones que requieran alta resistencia mecánica y altas condiciones de servicio, como por ejemplo cigüeñales, pistones, bielas, y diversos elementos de máquinas. Es importante destacar que esta propiedad depende del tratamiento térmico aplicado, y este se escogerá en base a las condiciones de diseño.

La composición química del acero AISI 4340 se presenta a continuación en la tabla 1.1

Tabla 1.1 Composición química en % de peso del acero AISI 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

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.

1.2.3 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 de austenización, por encima de la cual la ferrita se transforma en austenita, 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 templabilidad o tendencia de formación de martensita de un acero depende principalmente de su contenido de carbono, pero la presencia de elementos aleantes se traduce en un temple menos brusco, con menos esfuerzos residuales y con una menor distorsión producida por el enfriamiento. El temple es el tratamiento térmico más usado cuando se busca aumentar sustancialmente la dureza y la resistencia mecánica, ya que este propicia un afinamiento y reducción del tamaño de grano en el acero. Es obvio recalcar que la temperatura de calentamiento y la rapidez con la cual se enfría el acero influyen de manera drástica en la condición final a obtener, si el enfriamiento es muy brusco la pieza puede tender a agrietarse.

El revenido es aplicado después del temple para darle al material mayor ductilidad ya que el temple da como resultado una estructura frágil, el objetivo principal del revenido es liberar los esfuerzos residuales y tensiones producidas por el enfriamiento brusco en el temple. El tratamiento consiste en elevar la temperatura hasta un punto menor a la temperatura de austenización por un tiempo determinado para después dejar enfriar la pieza al aire, con lo cual se consigue un enfriamiento mucho menos brusco que en el temple. 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.

1.3 Técnica de deposición

1.3.1 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.

1.3.2 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.

1.3.3 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)

1.3.4 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.

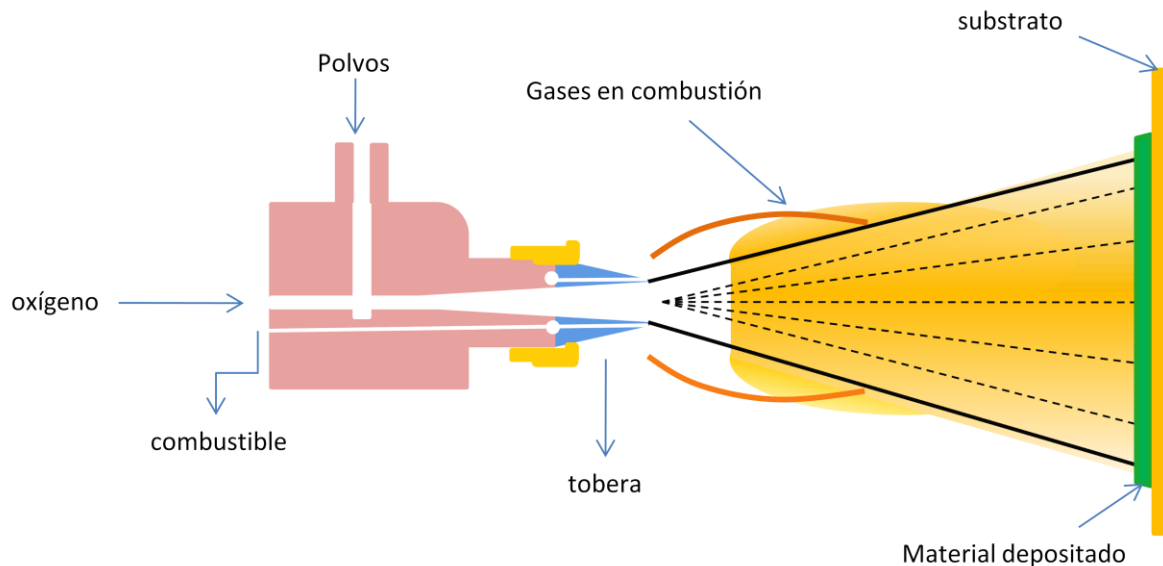


Figura 1.1 Representación del proceso de termorrociado HVOF

1.4 Aplicaciones del proceso de HVOF

1.4.1 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.

1.4.2 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.

1.4.3 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*). En otro orden de ideas, específicamente los recubrimientos de WC-Co presentan en muchos casos fases producto de la degradación del propio WC como por ejemplo el grafito, éste funciona como lubricante mejorando enormemente la resistencia al desgaste, así como también la tribología del recubrimiento.

1.5 Variables presentes en el proceso de deposición

1.5.1 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.

1.5.2 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 y en

Marco Teórico

caso del WC-Co la degradación del carburo de tungsteno en fases (W_2C) que son mucho menos duras (T.Y. Cho 2008). 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.

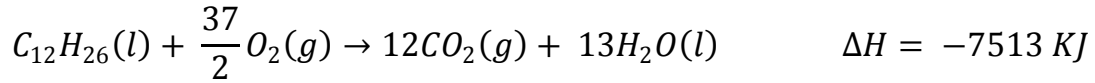
A su vez si la distancia de rociado es muy corta se evidencia una mayor temperatura del sustrato que acarrea una mayor oxidación del mismo, además de la poca exposición a la llama por parte de las partículas de polvo, lo que trae como consecuencia poca cantidad de partículas fundidas y altísima velocidad 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.

1.5.3 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 pero también acarrea descarburización en el caso del WC-Co. 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 (*Yunfei Qiao 2002*).

Uno de los problemas de esta técnica de deposición consiste en la degradación del WC en nuevas fases como por ejemplo W_2C , W y WO_3 , 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).

El primer mecanismo consiste en la descomposición peritectoide del WC mediante la siguiente reacción $2WC = W_2C + C$. 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 del WC en W_2C y luego del W_2C en W. 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 tercer mecanismo se da por la disolución del WC en la matriz líquida de Co que lo rodea, mientras mayor sea la temperatura mayor será la solubilidad del WC en el Co. 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 WC 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.

1.5.4 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.

1.5.5 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 ($3 - 7 \mu\text{m}$), 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

Marco Teórico

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.

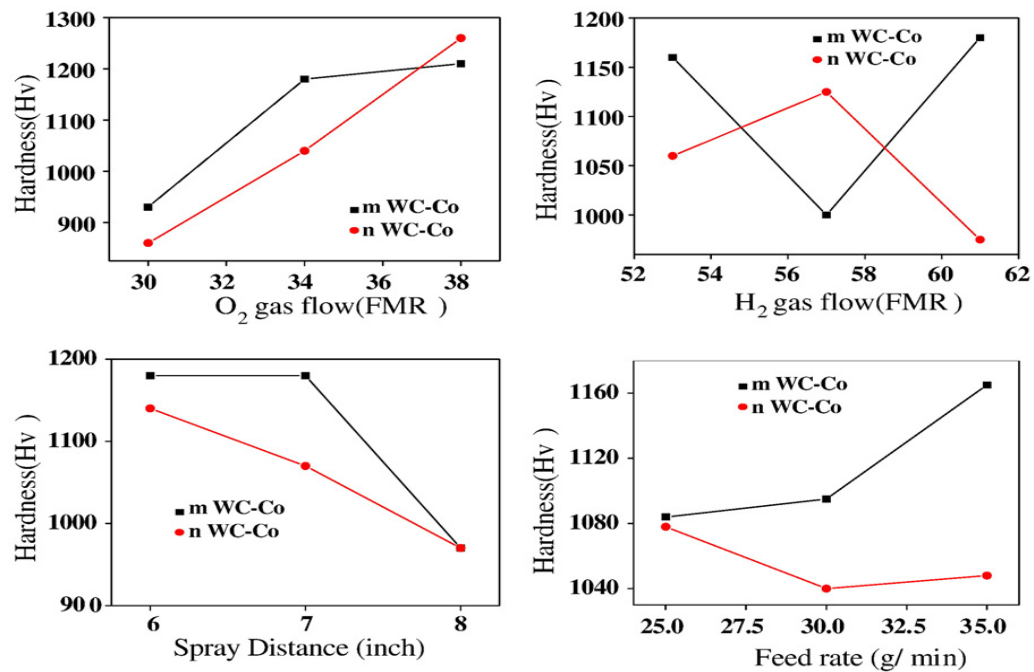


Figura 1.2 Gráfico de la dureza vs los parámetros de deposición de un recubrimiento de WC-Co (T.Y CHO 2008)

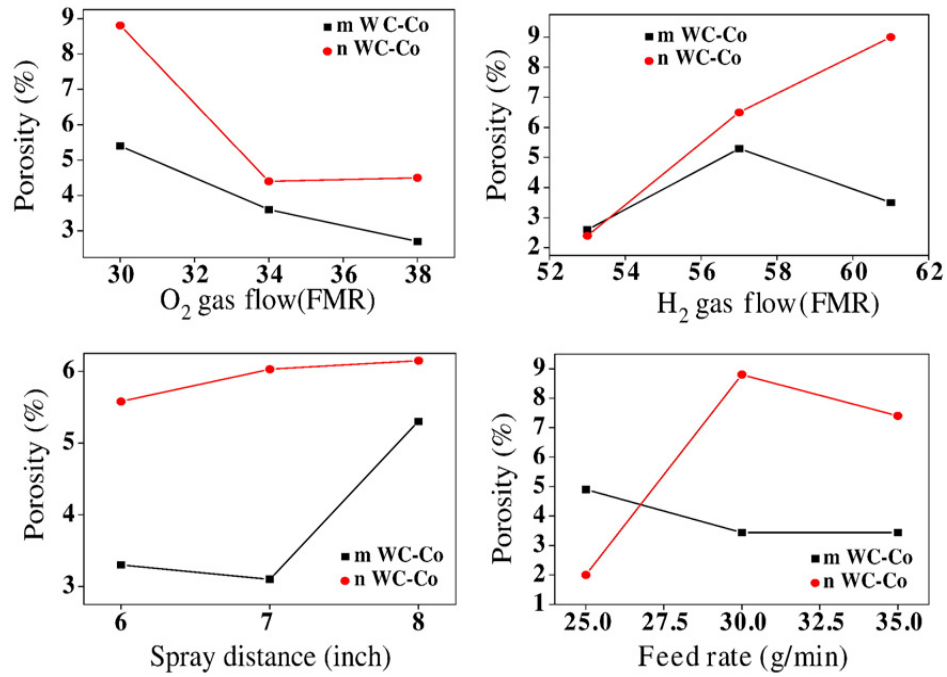


Figura 1.3 Gráfico de la porosidad vs los parámetros de deposición de un recubrimiento de WC-Co (T.Y CHO 2008)

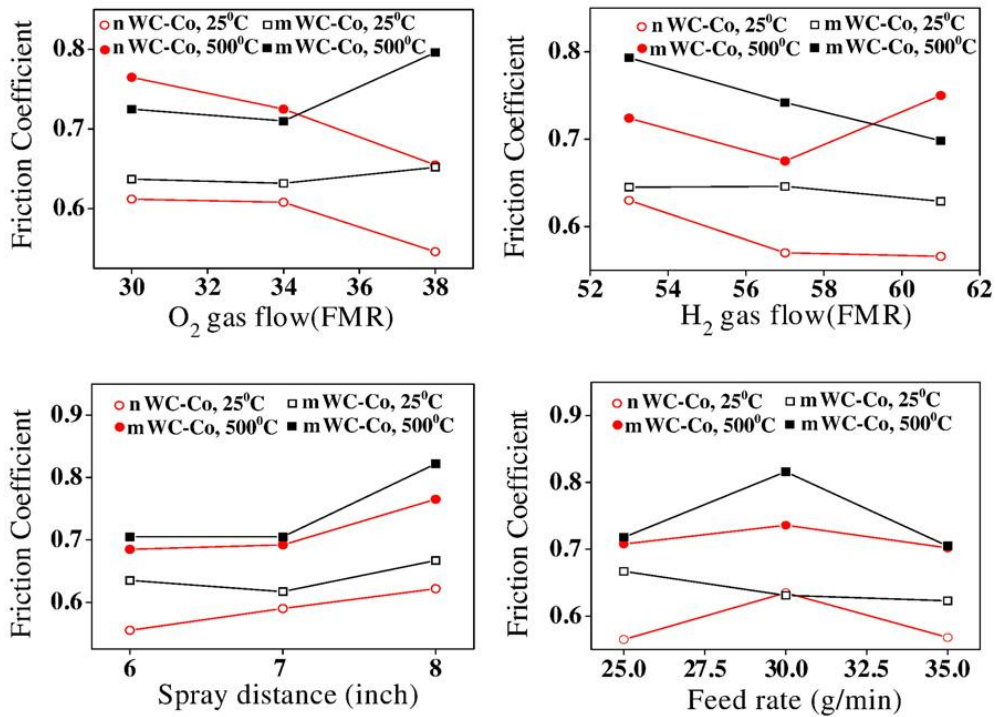


Figura 1.4 Gráfico del coeficiente de fricción vs los parámetros de deposición de un recubrimiento de WC-Co (T.Y CHO 2008)

1.6 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 domesticas 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.

1.7 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 siguiente figura 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. Estas etapas son descritas más adelante en este trabajo.

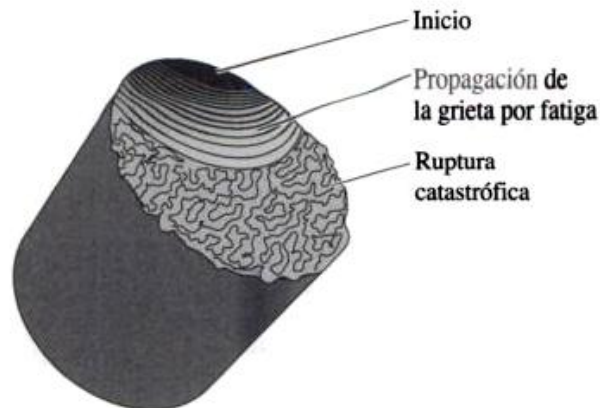


Figura 1.5 Morfologías características de superficie de fractura ocasionadas por fatiga. AVILES, R (2005) "Análisis de fatiga en máquinas"

- **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. (*METALS HANDBOOK, "Failure analysis and prevention"*.)

- **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 replicas 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 1.6. (*METALS HANDBOOK, "Failure analysis and prevention".*)

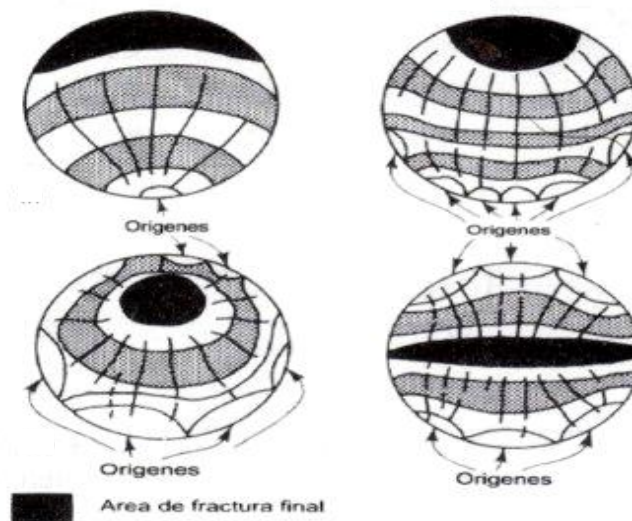


Figura 1.6 Morfologías características vinculadas con factores como varios puntos de nucleación de grietas y las formas originadas a partir de estas particularidades. (Joa, C., 2010)

-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. (*METALS HANDBOOK, "Failure analysis and prevention"*.)

1.8 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

Marco Teórico

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.

1.8.1 Ciclo de inversión total:

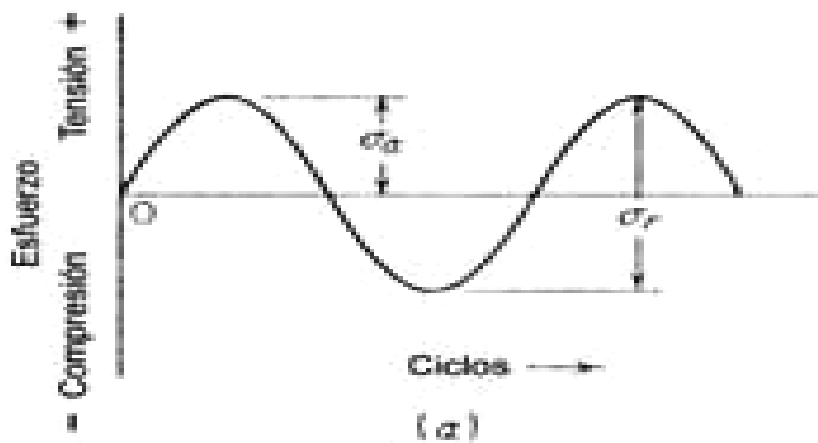


Figura 1.7 Gráfica representativa de una carga cíclica a inversión completa.

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).

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 maquinas rotativas donde se alterna la naturaleza del esfuerzo por cada revolución del eje, logrando periodos uniformes de inversión de esfuerzos totales. (ASM Handbook (1985) “Failure Analysis and Prevention”.)

1.8.2 Ciclos de esfuerzos traccionantes repetidos.

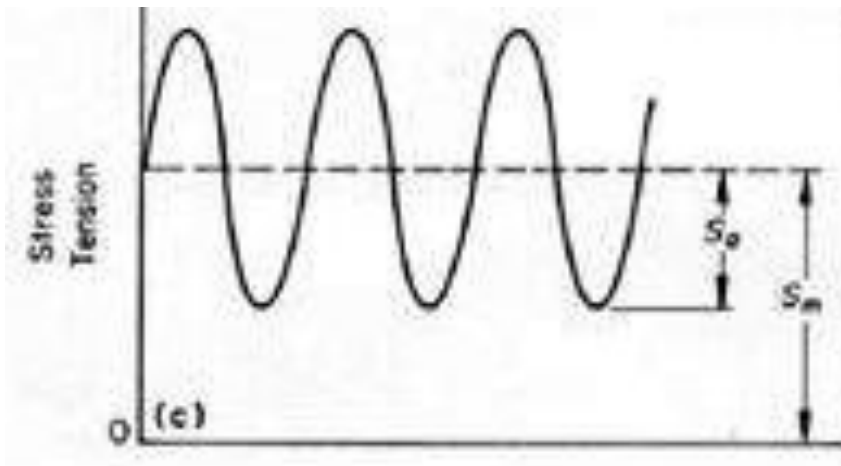


Figura 1.8 Gráfica representativa de una carga cíclica en tensión repetida.

En este tipo de esfuerzos se presentan distintos niveles de esfuerzos crecientes y decrecientes con la particularidad que se encuentran siempre en la parte positiva del grafico representando esto esfuerzos variantes pero siempre en tensión, con una resultante de esfuerzo medio siempre positivo.

Este tipo de esfuerzos pueden presentarse en elementos que estén sometidos a tensión constante presentando cambios de velocidad en el movimiento, como por ejemplo maquinas 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.

Dentro de esta línea de ejemplos se pueden incluir elementos como ascensores, guayas de cargas en construcción, grúas y demás maquinas en donde los elementos vinculantes se someten a fatiga debido a este tipo de esfuerzos, constantemente en tensión y con variación de magnitudes debido a variaciones de posición de la carga, pero siempre en tensión. (ASM Handbook (1985) “Failure Analysis and Prevention”).

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

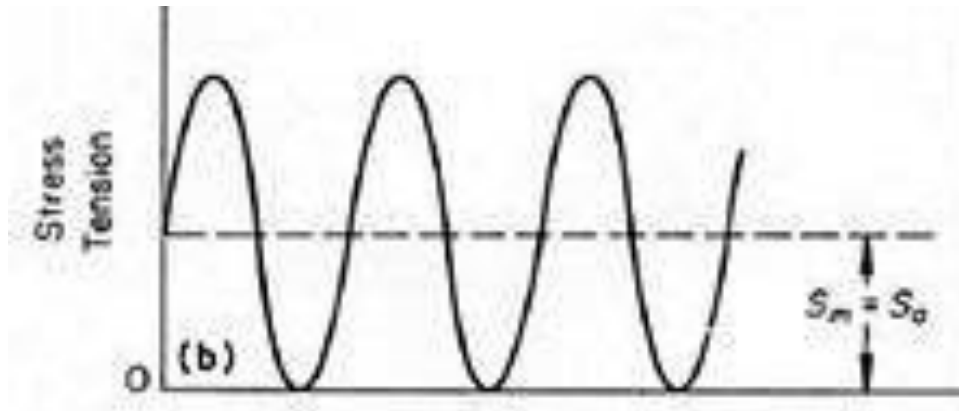


Figura 1.9 Gráfica representativa de una carga cíclica con esfuerzos en tensión con reposo absoluto.

Para los esfuerzos traccionantes con reposo absoluto se cuenta con un periodo de cargas en tracción debido a esfuerzos aplicados en periodos de tiempo y seguido a este periodo el esfuerzo desciende hasta anularse completamente, traduciéndose como un periodo de reposo dentro de la vida del elemento.

Este tipo de esfuerzos en 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.

Las maquinas siguen un esquema de servicio donde no siempre se encuentran en operación y por consiguiente es más evidente la representación de este tipo de esfuerzos, existen 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 grafica 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.

Podemos conseguir muchas representaciones de este tipo de esfuerzos donde se involucren cargas repetitivas de la misma magnitud en periodos similares y que cuenten con un periodo de reposo como válvulas, llaves, maquinas reciprocantes en algunos instantes, maquinas rotativas bajo patrones de servicio de repetición de labores, entre otros. (ASM Handbook (1985) “Failure Analysis and Prevention”.)

1.8.4 Ciclo de esfuerzos aleatorios.

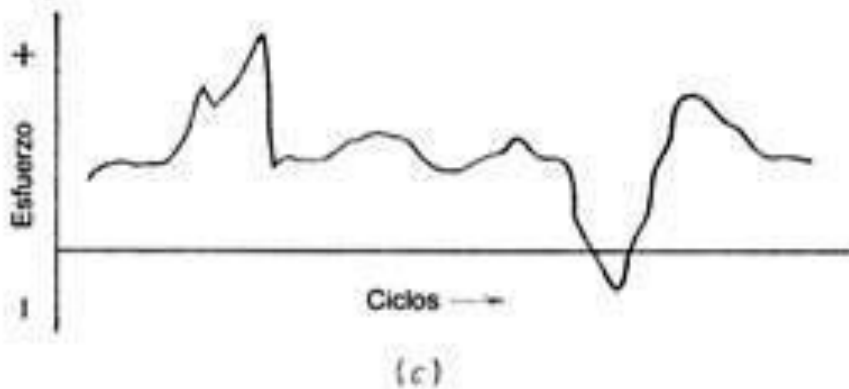


Figura 1.10 Grafica representativa de un ciclo de esfuerzos aleatorios.

En esta clasificación de esfuerzos se consigue la presencia de todos los tipos de esfuerzos estudiados 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.

Se puede inferir que la realidad de muchos elementos de maquinas 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 en la realidad el 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.

Maquinas que se sometan a variaciones de esfuerzos en tensión y compresión en donde su aceleración del movimiento no sea constante, sus cargas pueden presentar muchas variaciones en periodos distintos de operación, se sometan a largos periodos de operación sin descanso y luego de estos periodos se presente un periodo de reposo prolongado por algún problema en la empresa donde opera la maquina, son factores que originan un valor adicional al patrón de esfuerzos que gobierna la maquina, y esta variabilidad puede en muchos casos determinar la falla repentina y acelerada del elemento sin haberlo previsto en el proceso de diseño.

Por estas razones expuestas es importante que el ingeniero involucrado en el proceso de diseño de cierta máquina tome en consideración los escenarios en donde se va a desenvolver la operación de la máquina, los tipos de esfuerzos, la mecánica de trabajo de la empresa que va a utilizar la máquina, los periodos de trabajo y los posibles periodos de descanso de la máquina, así como los ambientes en donde va a reposar dicha máquina y si cuenta o no con la protección adecuada para sus partes una vez que se encuentre en reposo, que prevengan en muchos casos agentes que atentan contra la vida de partes como corrosión y oxidación.

Todos estos factores se suman y añaden un valor de incertidumbre en la vida del material, obligando a los ingenieros en muchos casos prever estas situaciones y recurrir al rediseño de algunos elementos que pueden estar sometidos a estas cargas variantes asumiendo factores de seguridad más elevados para algunos casos y poder cubrir la expectativa de vida deseada, aumentando dimensiones de elementos en otros casos, o recurriendo al estudio intenso de materiales que garanticen una vida mayor al elemento de máquina bajo estos regímenes de trabajo que añaden incertidumbre a la falla del elemento en el proceso de diseño. (ASM Handbook (1985) “Failure Analysis and Prevention”.)

1.9 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

Marco Teórico

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 en papel log-log se representa con una línea inclinada en la cual las probetas se rompen y otra horizontal, por debajo de la cual las probetas no fracturan. (Joa C. 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, W. *“Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales”* 2004)

1.10 Vida a la fatiga

Es un 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:

$$N_f = N_i + N_p$$

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,

Marco Teórico

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, W. “Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales 2004”).

1.11 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. Es muy probable que un material recubierto bajo una técnica en particular y un conjunto de condiciones que engloban la aplicación del recubrimiento afecten de alguna manera el comportamiento de la pieza.

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 máquina 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 sustrato, incluso podemos conseguirnos con materiales como un acero 4340 con recubrimientos de 220

Marco Teórico

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 (*L. Hernández. Venezuela 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-deposito 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 substrato. (*F. Oliveira. Venezuela 2000*).

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 substrato 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 substrato, 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. (K. Padilla. Venezuela 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 (E.S. Puchi-Cabrera. Venezuela 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 sustrato 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 (E.S. Puchi-Cabrera. Venezuela 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.

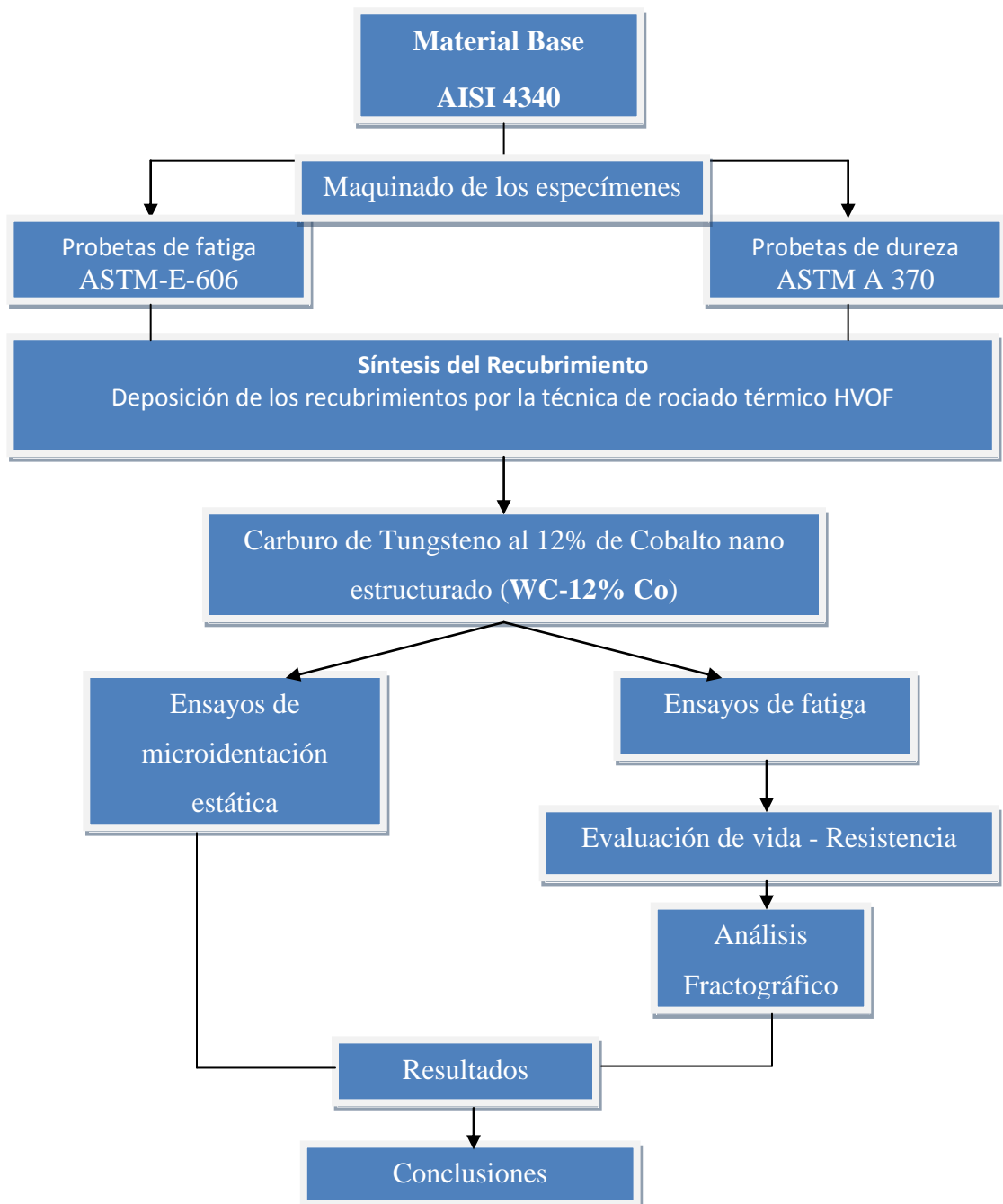
Así como el ambiente de operación del elemento si contiene agentes corrosivos que son los principales causantes de concentradores de esfuerzos y nucleación de grietas en la superficie, se debe pensar en un recubrimiento que otorgue la protección necesaria al elemento para estas condiciones y es por estos 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. MARCO METODOLÓGICO

2.1 Diagrama de Flujo

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



2.2 Cantidad de especímenes utilizados

A continuación en la tabla 1.2 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 1.2 Probetas requeridas para la realización de los ensayos.

ENSAYO	CONDICIÓN		CANT	NORMA
Dureza	Microindentación	AISI 4340 bonificado	5	S/N
		AISI 4340 + WC-12%Co	5	S/N
Resistencia a la Fatiga al Aire	AISI 4340 + WC-12%Co		12	ASTM E-606 E- 739 E- 468

2.3 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.

2.3.1 Pulido Metalográfico

En primer lugar fue realizado un pulido metalográfico a 10 probetas rectangulares de acero microaleado 4340 bonificado. A pesar que en el proceso de termorrociado por HVOF no es necesario alcanzar una superficie especular, ya que para la óptima adherencia del recubrimiento se necesita una rugosidad establecida, en este estudio se realizó un pulido previo a la deposición, ya que se 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 sand blasting 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 identificación estática del recubrimiento.

El procedimiento 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. En la figura 2.1 se ilustra el procedimiento de lijado en la máquina para pulido marca STRUERS.



Figura 2.1 Fotografía del proceso de lijado.

Las probetas de fatiga 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.

2.3.2 Limpieza y Montaje

El montaje de las probetas fue necesario para proceder a realizar el termorrociado, ya que éste permite un fácil manejo de las muestras, así como también la capacidad de ser montadas en el husillo de un torno para ser recubiertas.

Probetas de Dureza: el montaje consistió en la unión de dichas probetas a una pletina de acero mediante un punto de soldadura TIG como se evidencia en la figura 2.3, esto para facilitar su manejo debido a su reducido tamaño.



Figura 2.2 Imagen de una de las probetas de dureza utilizadas.



Figura 2.3 Imagen del montaje realizado a las probetas de dureza (tercera muestra de izquierda a derecha)

Probetas de fatiga: este tipo de probeta fue unido 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 limpio la superficie de estudio con un solvente industrial comercialmente conocido

Marco Metodológico

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.

2.3.3 Granallado o sand blasting

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. En la figura 2.4 se puede observar la textura o acabado alcanzado por la superficie luego de realizado el granallado.



Figura 2.4 Acabado de las probetas de dureza luego del granallado.

2.4 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.

Marco Metodológico

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 2.5 Equipo de rociado térmico por HVOF.

Las 6 condiciones obtenidas para recubrir en este estudio son las expuestas en la tabla 2.1. Estas condiciones se eligieron basándose en la experiencia de la empresa encargada de realizar la deposición de los recubrimientos.

Tabla 2.1 Resumen de condiciones.

Condición	Flujo de combustible	Presión de combustible	Presión en la cámara de combustión	Velocidad de alimentación de polvos
1	24,6 L/H	150 PSI	110 PSI	100 gr/min
2	28,3 L/H	110 PSI	100 PSI	100 gr/min
3	20,8 L/H	95 PSI	90 PSI	100 gr/min
4	20,8 L/H	95 PSI	90 PSI	70 gr/min
5	24,6 L/H	150 PSI	110 PSI	70 gr/min
6	28,3 L/H	110 PSI	100 PSI	70 gr/min

Al encender el equipo se eligieron los parámetros deseados y se inició con el recubrimiento (figura 2.6), 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 400 micrómetros.

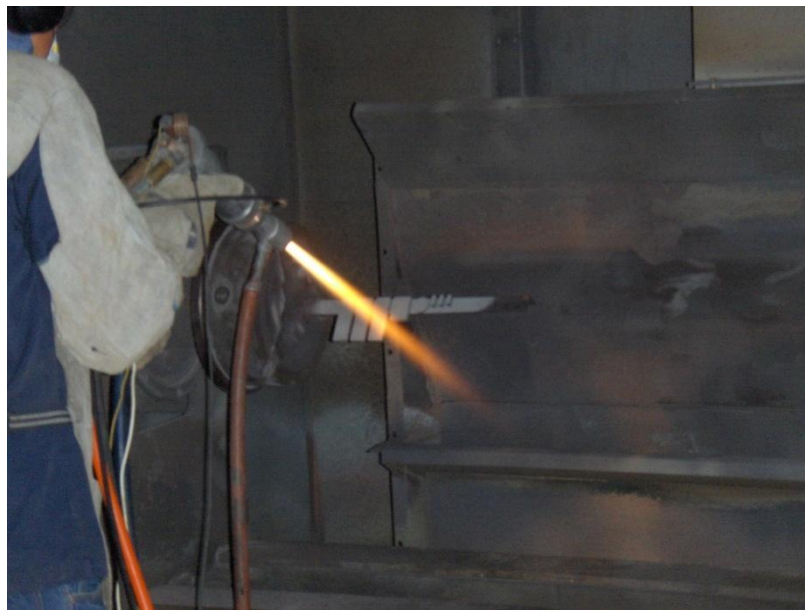


Figura 2.6 Proceso de rociado térmico por HVOF.

2.4.1 Microindentación estática

Para esta etapa de nuestro proceso investigativo, se utilizaron las probetas cuadradas (ASTM A-370) recubiertas con las 6 condiciones de deposición especificadas en el punto anterior. La preparación previa de las probetas a la observación, consistió en un corte a 1 cm del extremo de cada probeta y luego dividir en 2 el segmento obtenido, quedando figuras de 1x2cm aproximadamente en su cara superior donde queda intacto el recubrimiento. El equipo utilizado para los cortes de probetas es un equipo buehler de motor eléctrico para cortes con discos de diamante como el mostrado en la siguiente figura.



Figura 2.7 Equipo de indentación estática.

Para la observación e indentación se utilizó un equipo Buehler para microindentación estática (figura 2.7), que consta de un indentador de punta de diamante de pirámide de base cuadrada especificada por el ensayo de dureza Vickers, además de dos oculares, uno de 10x y otro de 40x.



Figura 2.8 Equipo de microindentación estática BUEHLER

El procedimiento se basa en la ubicación de la probeta a ensayar en posición paralela al lente de observación y el receptáculo del indentador, luego se selecciona la carga estipulada para el ensayo que varía entre 100 gr y 500 gr, después con el lente de 10x se procede a ubicar el cero de máquina en ambos ejes del indentador, ubicando líneas paralelas y haciéndolas coincidir para marcar un punto de referencia que servirá de cero para la medición de diagonales, y se realiza el procedimiento de forma análoga para el eje opuesto. Posterior a esto, se selecciona el tiempo de indentación, que para nuestro caso se utilizaron periodos de tiempo de 15 segundos, y luego se ubica un área óptima con el lente de 10x para después comenzar la indentación con los parámetros especificados, seguido a esto se cambia de forma automática al lente de 40x para la observación de la huella de indentación en la superficie del recubrimiento.

Para obtener una medida correcta de las diagonales observadas en la huella del indentador se debe ajustar el foco con tornillos micrométricos que permiten ubicar el lente en la posición óptima para la medición. Se procede a tomar la medición en cada eje de nuestro sistema de coordenadas alejando las rectas paralelas que se observan en el visor del equipo hasta hacerlas coincidir con los extremos de las diagonales de la huella y se anota el valor de cada diagonal. Este procedimiento se realizó para cada una de las condiciones, repetidas veces con un barrido de cargas estáticas de 100 gr 200 gr 300 gr y 500 gr para obtener un muestreo representativo de dureza en estructuras importantes observadas en la superficie del recubrimiento y así arrojar la mayor cantidad de sectores que determinen un valor correcto para ser promediado y graficado posteriormente para su análisis.

2.5 Descripción de los polvos utilizados

Los polvos utilizados para la deposición del recubrimiento son polvos fabricados para ser depositados por HVOF y tienen una composición de 12% de cobalto y 88% de carburo de tungsteno. El tamaño de grano de las partículas de los polvos está entre 15 y 45 micrómetros, a pesar de ser este un tamaño de grano ubicado en la escala micrométrica se les denomina polvos nanoestructurados porque cada uno de estos granos micrométricos contienen a su vez partículas de carburo de tungsteno cuyo tamaño de grano va de 50 a 300 nanómetros; son fabricados de esta manera porque el tamaño de grano para el cual está diseñado la boquilla del equipo utilizado para realizar la deposición no puede ser menor a 10 micrómetros. El empaque y presentación de los polvos utilizados se presenta en la figura 2.7.

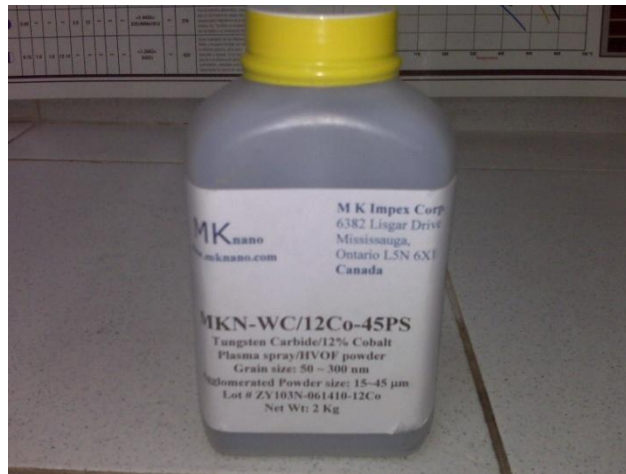


Figura 2.9 Polvos utilizados para la deposición de la película de recubrimiento.

2.6 Fatiga al Aire

Los ensayos de fatiga fueron realizados en una maquina 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. Ésta máquina se aprecia en la figura 2.8.



Figura 2.10 Máquina de fatiga por flexión rotativa marca Fatigue Dynamics, modelo RBF-200.

Se realizaron 13 ensayos de fatiga al aire con probetas recubiertas con carburo de tungsteno 12% cobalto (MKN-WC/12Co-45) con cinco niveles de esfuerzos distintos (450, 471, 492, 612 y 650 MPa) para un total de doce probetas. Todos estos niveles de esfuerzos representan porcentajes del esfuerzo de fluencia del material y están ubicados en la zona de alta carga y bajo ciclaje.

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:

$$S = \frac{M \times C}{I} \rightarrow M = \frac{S \times I}{C} \quad (\text{Ec. 2.1})$$

Donde:

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 $I = \frac{\pi \times D^4}{64}$ (Ec 2.2)

Sustituyendo la ecuación 2.2 en 2.1 se tiene la Ec 2.3:

$$M = \left(\frac{S \times \left(\frac{\pi \times D^4}{64} \right)}{\frac{D}{2}} \right) = \frac{S \times \pi \times D^3}{32} \quad (\text{Ec 2.3})$$

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

$$M = 0,00087 \times S \times D^3 [\text{Lbf} \times \text{Inch}^2] \quad (\text{Ec.2.4})$$

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 y el sustrato recubierto con WC-12%Co convencional. 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.

2.7 Estudio Fractográfico

El estudio fractográfico fue utilizado para la observación con detalle de la superficie de fractura de las probetas ensayadas y observar el comportamiento de la interfaz recubrimiento-sustrato. Para este estudio se realizaron cortes a las probetas a 5 mm de la superficie de fractura ensayadas a 650 MPa que representa el mayor esfuerzo de ensayo y un bajo ciclaje de vida así como la probeta correspondiente a 492 MPa con un alto ciclaje de vida para evidenciar la comparación y el comportamiento del material recubierto.

Los cortes se realizaron en las inmediaciones de la superficie de fractura de cada segmento de las probetas, se utilizo un margen cercano a los 5 mm para no afectar la superficie de fractura con los efectos del calor generado por el corte, al tener estos segmentos pequeños de cada probeta se puede disponer de forma optima de las mismas para su estudio en el microscopio, ya que se debe garantizar una altura o posición relativa de la superficie de observación con respecto a la posición de los detectores, tanto el de electrones secundarios como el de rayos x. Además se realizo un corte transversal a uno de los segmentos de cada probeta donde se evidenciara el vínculo entre el material del sustrato y el recubrimiento.

La preparación de este corte transversal de las probetas se realiza a través de un pulido metalográfico en la superficie, devastando material desde la periferia del recubrimiento comenzando con lijas de 120 granos pasando por medidas de 240, 360, 400, 600, 1000 y 1200 para así obtener una superficie donde se pueda observar la superficie del sustrato y del recubrimiento en una dirección perpendicular a la superficie de fractura y en esta dirección buscar grietas en el recubrimientos.

El estudio se realizó en el Laboratorio de Microscopía Electrónica de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y ciencia de los materiales de la Universidad Central de Venezuela usando un microscopio electrónico de barrido marca Hitachi S-2400 (figura 2.9). Las probetas fueron barridas utilizando un cañón de electrones en modo de electrones secundarios donde se genera la imagen a partir de las diferencias en la difracción durante el modo de electrones secundarios. Para la disposición de las probetas se utilizo 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 2.11 Microscopio electrónico de barrido marca Hitachi S-2400

3. ANÁLISIS Y RESULTADOS DEL ESTUDIO.

En esta fase del estudio contamos con los resultados de los puntos expuestos en el marco metodológico y de esta forma podemos dar paso al análisis de cada punto. Como primera instancia contamos con el análisis de dureza de las 6 condiciones diferentes de deposición del recubrimiento en el sustrato. Luego se obtiene la tabla de esfuerzos versus número de ciclos obtenidos con los ensayos de fatiga aplicados a las 13 probetas ASTM-E-606 para determinar su comportamiento en una grafica comparativa del sustrato recubierto estudiado en contraposición con el sustrato sin recubrimiento en estado bonificado y con recubrimiento de colmonoy 88, para dar paso por ultimo al análisis de fotografías tomadas a las superficies de fractura más relevantes del estudio.

3.1 Estudio de Micro Indentación Estática

Una vez realizados los ensayos, para la determinación de la dureza del depósito a nivel de micro escala, se reportan los valores de dichos ensayos en el conjunto de tablas que se presentan a continuación (tabla 3.1-tabla 3.6), en las mismas se reportan los valores para las distintas condiciones de deposición, para cada una de ellas están reflejados los datos de dureza y dimensiones de la huella para cada carga utilizada las cuales de acuerdo al barrido planteado en la metodología fueron 100, 200, 300 y 500 gramos, para finalmente presentar las distintas gráficas (figuras 3.1 - 3.6) en donde se aprecia la dependencia funcional que registra la dureza en términos de las dimensiones del registro residual del ensayo, que no sería otra cosa, que establecer si el valor de la propiedad es dependiente o no del valor del carga aplicada.

Resultados y Análisis de Resultados

Tabla 3.1 Dureza y diagonal promedio del ensayo de indentación estática realizado a la condición 5-6 GPH y 70 gr/min.

CONDICIÓN 5-6 70 gr/min

Carga	100 gr		200 gr		300 gr		500 gr	
	Hv	dpro	Hv	dpro	Hv	dpro	Hv	dpro
1	1168,1	12,6	1125,8	18,15	2228,5	15,8	1445,8	25,35
2	913,2	14,2	1119,7	18,2	2257	16,7	383,8	49,15
3	757,1	15,7	2804,4	11,5	478,4	34,1	530,2	41,8
4	802,6	15,1	1362,3	16,5	1060,8	23,4	670	37,2

Tabla 3.2 Dureza y diagonal promedio del ensayo de indentación estática realizado a la condición 6-7 GPH y 70 gr/min.

CONDICIÓN 6-7 70 gr/min

Carga	100 gr		200 gr		300 gr		500 gr	
	Hv	dpro	Hv	dpro	Hv	dpro	Hv	dpro
1	952,9	13,95	1170,6	17,9	1982,9	16	2389,1	19,8
2	900	14,3	1125,8	18,2	1990,7	16,2	2976,4	17,6
3	781,9	15,4	1637,4	15	2900,2	13,85	2283,6	20,1
4	463,6	20	1865,3	14,1	1170,6	21,8		

Tabla 3.3 Dureza y diagonal promedio del ensayo de indentación estática realizado a la condición 7-8 GPH y 70 gr/min.

CONDICIÓN 7-8 70 gr/min

Carga	100 gr		200 gr		300 gr		500 gr	
	Hv	dpro	Hv	dpro	Hv	dpro	Hv	dpro
1	1064,3	14,2	2228,7	11,9	1123,7	22,2	1489,5	25,1
2	1131,8	12,8	1268,4	17,1	1133,9	22,3	1465,9	25,3
3	1010	13,55	1467	15,9	1128,2	21,2	1051,1	29,1
4	1131,8	12,8	1267,3	17,5	659,2	28,6	922,7	31,7

Tabla 3.4 Dureza y diagonal promedio del ensayo de indentación estática realizado a la condición 5-6 GPH y 100 gr/min.

CONDICIÓN 5-6 GPH 100 gr/min

Carga	100 gr		200 gr		300 gr		500 gr	
	Hv	dpro	Hv	dpro	Hv	dpro	Hv	dpro
1	742,8	15,8	1404,5	16,25	865,7	25,35	1471,7	25,1
2	1131,8	12,8	1190	17,6	1094	22,65	3644,6	15,95
3	521,9	18,65	2035	13,5	2423,8	15,15	1960	21,8
4	681,1	16,5	2554,2	12,05	2176,2	16,1	1276,6	26,95

Tabla 3.5 Dureza y diagonal promedio del ensayo de indentación estática realizado a la condición 6-7 GPH y 100 gr/min.

CONDICIÓN 6-7 100 gr/min

Carga	100 gr		200 gr		300 gr		500 gr	
	Hv	dpro	Hv	dpro	Hv	dpro	Hv	dpro
1	1105,8	12,95	1306,3	16,85	1020,4	22,2	1460,1	25,2
2	1168,1	12,6	1563,8	15,4	1139	20,7	1437,2	25,75
3	1072,4	13,05	1439,7	16,05	1350	20,3	1300,6	28,2
4	2012,2	9,7	2005,2	13,7	1827	17,45	1174,3	27,25

Tabla 3.6 Dureza y diagonal promedio del ensayo de indentación estática realizado a la condición 7-8 GPH y 100gr/min.

CONDICIÓN 7-8 100 gr/min

Carga	100 gr		200 gr		300 gr		500 gr	
	Hv	dpro	Hv	dpro	Hv	dpro	Hv	dpro
1	602,1	15,6	447,1	24,2	1493,5	19,3	744,1	35,4
2	932	13,3	794,9	18,2	1103,8	22,5	765,6	34,8
3	1040,5	14,2	1119,7	18	1103,8	22,4	739,9	35,4
4	894,3	15,1	1261	16	810,4	26,15	705,6	36,25

En primera instancia es importante destacar la elevada dispersión que existe en los datos, lo cual obedece a la naturaleza estructural del depósito, en este caso se

Resultados y Análisis de Resultados

expone como un agregado bifásico masivo, en donde cada micro constituyente revela un valor de la propiedad marcadamente distinto, es por ello que observamos para una misma condición de deposición y parámetros de ensayos, valores de la respuesta mecánica que van, para una condición extrema de deposición, desde los 254 HV hasta 2212 HV, lo cual sugiere entonces un alto grado de heterogeneidad en el comportamiento del sólido, sin embargo dicha condición pareciera ser menos marcada, en principio cuando durante el proceso de deposición los polvos son alimentados a una tasa de 70 gr/min, en comparación con tasas de alimentación de mayor magnitud, y esta variable pareciera ser más influyente en cuanto a la generación de un depósito más homogéneo, que la relación oxígeno combustible, por lo menos en el intervalo de valores barrido en el presente estudio, sin embargo a pesar de aparecer esta variable menos influyente, la condición de relación oxígeno combustible 6-7 GPH pareciera ser la que garantiza una menor dispersión en los datos y por ende una condición mecánica más homogénea lo cual está asociado en principio a una distribución de micro constituyentes más uniforme.

Por otra parte si analizamos las tendencias observadas en el comportamiento de la propiedad para cada una de las condiciones de deposición, análisis realizado en principio en función de las pendientes que rigen la dependencia funcional entre la carga aplicada durante la prueba y el valor de dureza reportado, encontramos que al parecer la relación de oxígeno combustible 5-6 GPH generaría un depósito con valores de dureza que son altamente susceptibles a experimentar variaciones en términos absolutos, cuando el ensayo es realizado a distintas cargas por lo cual, para este caso en particular no tendría ningún sentido reportar algún valor de dureza representativo de la condición intrínseca del material. No obstante para el resto de las condiciones la dependencia no es tan marcada, por lo que con una simple función paramétrica de extrapolación podríamos establecer el valor de dureza absoluta del depósito.

Finalmente de los resultados obtenidos en estas pruebas preliminares, pareciera ser que la condición que garantizaría en principio un sólido más denso, más homogéneo desde el punto de vista de la distribución químico elemental y por ende de los micro constituyente que allí coexisten, asociado esto definitivamente a un condición más uniforme en cuanto a la respuesta mecánica esperada, sería la que combina un flujo de combustible del orden de los 6-7 GPH y una tasa de alimentación de polvos de 70 gr/min.

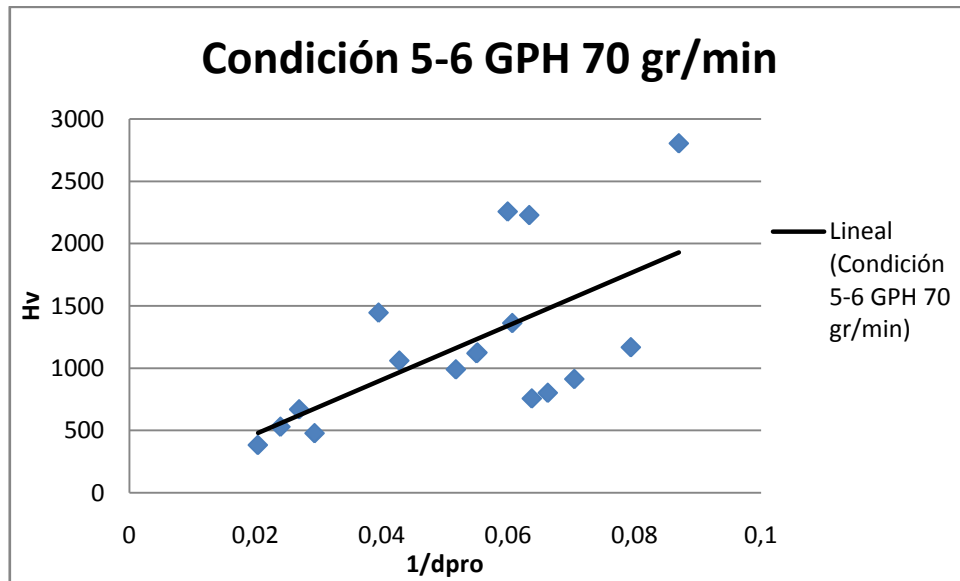


Figura 3.1 Gráfica dureza vs inverso de la diagonal promedio condición 5-6 GPH 70 gr/min.

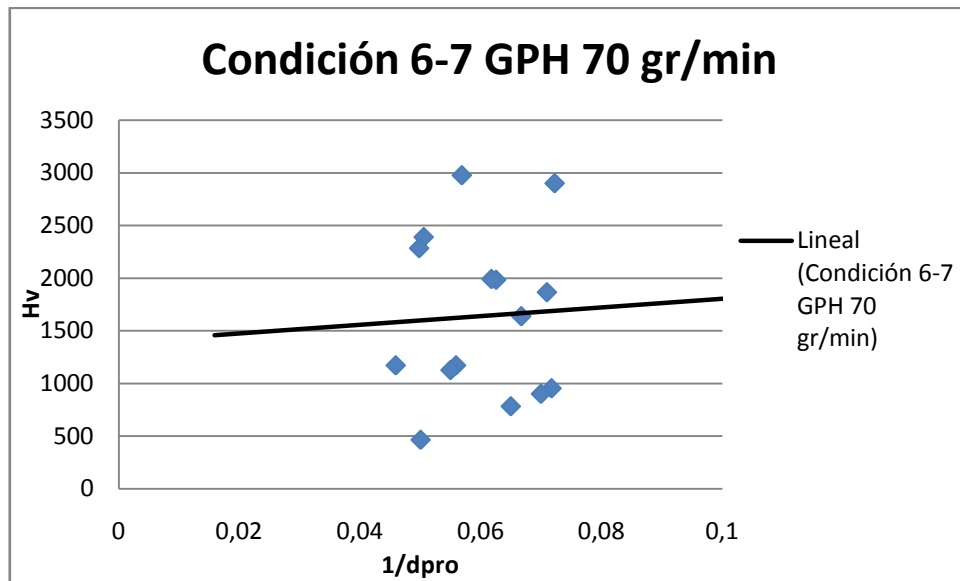


Figura 3.2 Gráfica dureza vs inverso de la diagonal promedio condición 6-7 GPH 70 gr/min.

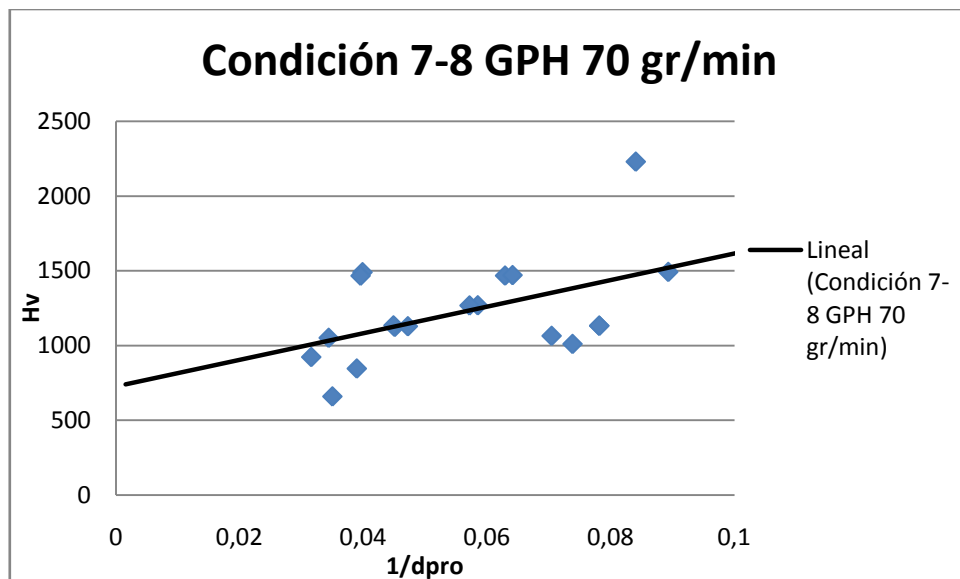


Figura 3.3 Gráfica dureza vs inverso de la diagonal promedio condición 7-8 GPH 70 gr/min.

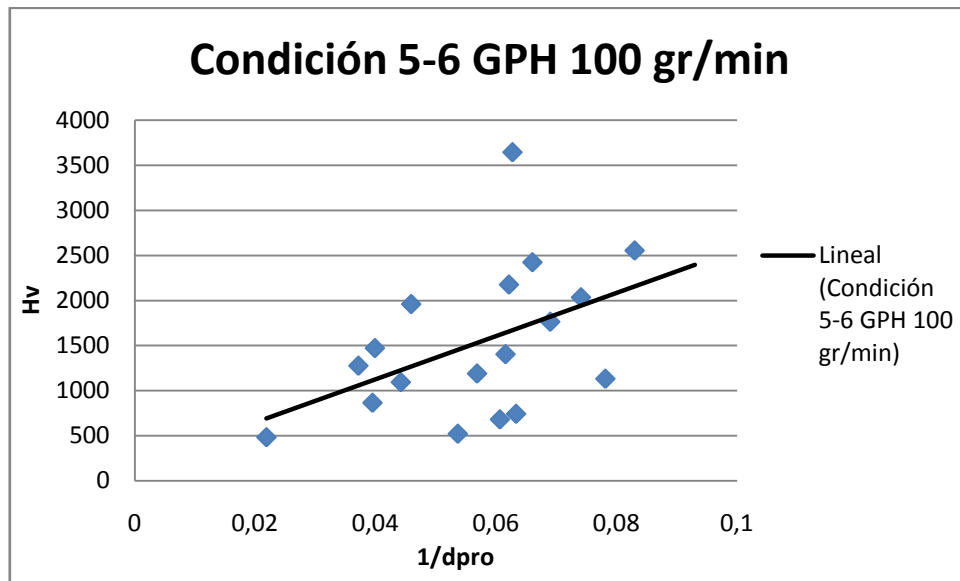


Figura 3.4 Gráfica dureza vs inverso de la diagonal promedio condición 5-6 GPH 100 gr/min.

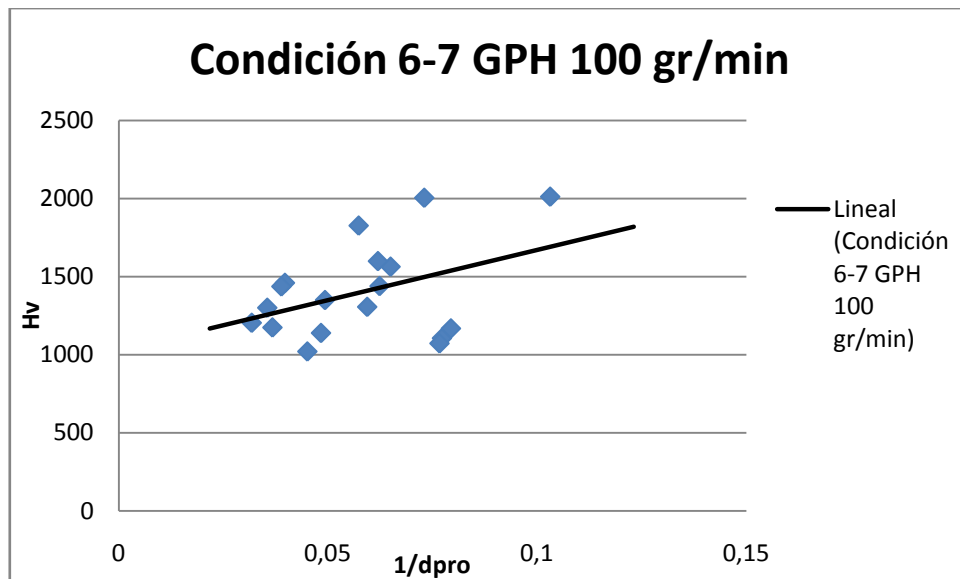


Figura 3.5 Gráfica dureza vs inverso de la diagonal promedio condición 6-7 GPH 100 gr/min.

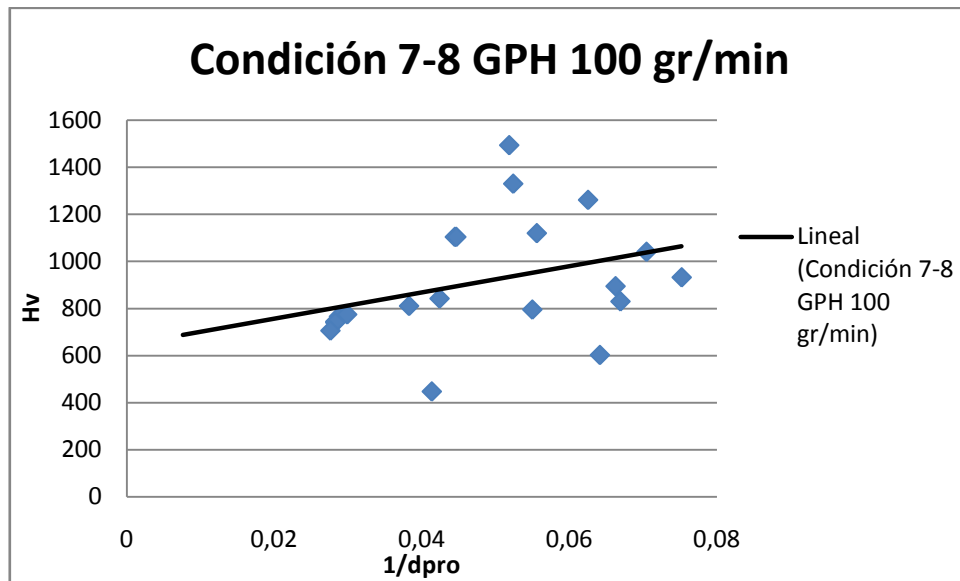


Figura 3.6 Gráfica dureza vs inverso de la diagonal promedio condición 7-8 GPH 100 gr/min.

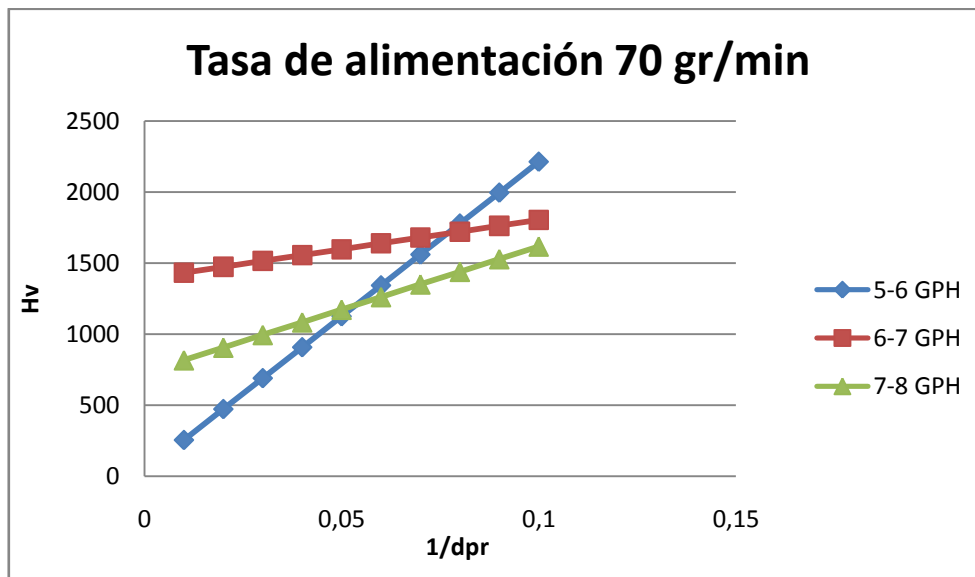


Figura 3.7 Gráfica de dureza comparativa de los diferentes flujos de combustible a una tasa de alimentación de 70 gr/min.

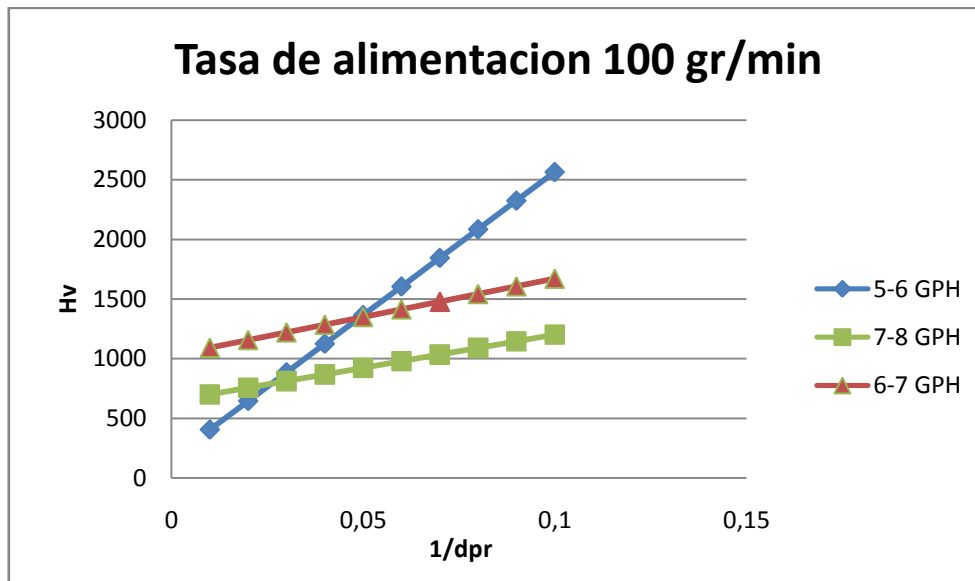


Figura 3.8 Gráfica de dureza comparativa de los diferentes flujos de combustible a una tasa de alimentación de 100 gr/min.

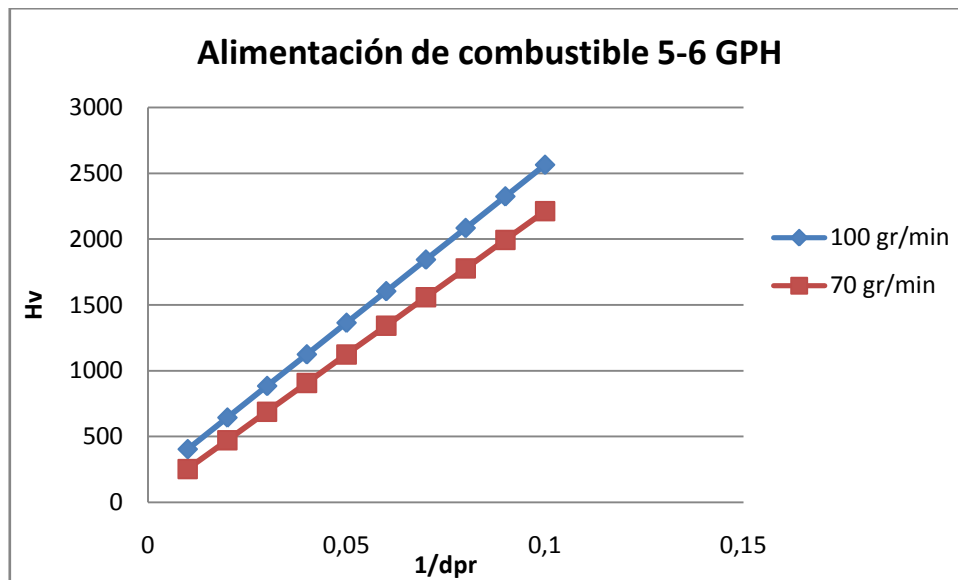


Figura 3.9 Gráfica de dureza comparativa de las diferentes tasas de alimentación a un flujo de combustible de 5-6 GPH.

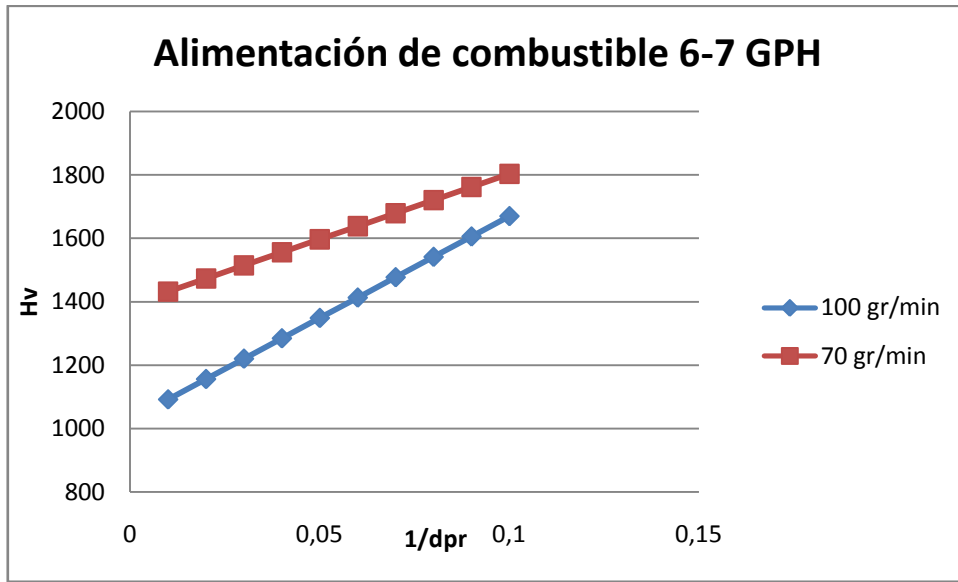


Figura 3.10 Gráfica de dureza comparativa de las diferentes tasas de alimentación a un flujo de combustible de 5-6 GPH.

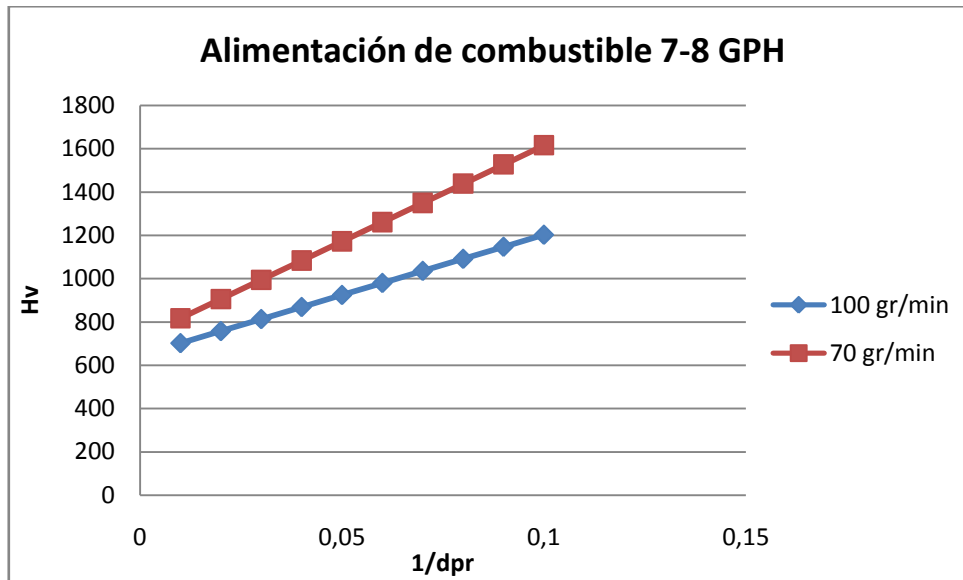


Figura 3.11 Gráfica de dureza comparativa de las diferentes tasas de alimentación a un flujo de combustible de 5-6 GPH.

3.2 Fatiga

A continuación se presentan los resultados derivados de los ensayos de fatiga al aire realizados sobre especímenes de radio continuo, recubiertos con un depósito de WC.12% Co. Cabe destacar que los valores de esfuerzos alternantes fueron corregidos o normalizados por el diámetro inicial de la probeta, en atención al comportamiento observado en todos los especímenes, en donde para todas las condiciones se verificó que la iniciación de la grieta se produjo en la intercara sustrato recubrimiento. Una vez realizada dicha corrección, se presenta a continuación la correspondiente tabla contentiva de los datos provenientes de los ensayos de fatiga

Tabla 3.7 Resultados obtenidos de los ensayos de fatiga al aire.

Probeta	Diámetro	Máximo Esfuerzo Alternante (Mpa)	Número de Ciclos (N)	Log(S)	Log(N)
1	7,2	471	571.100	2,84211	5,75671
2	7,23	471	192.300	2,85021	5,28397
3	7,18	471	111.300	2,85021	5,04649
4	7,03	471	74.800	2,85021	4,87390
5	6,91	450	214.400	2,83040	5,33122
6	7,02	450	3.829.300	2,83040	6,58311
7	7,07	450	133.400	2,83040	5,12515
8	6,99	450	62.100	2,83040	4,79309
9	6,92	492	3.239.300	2,86916	6,51045
10	7,1	612	2.276.500	2,9639	6,35726
11	7,12	612	105.000	2,96028	5,02118
12	6,88	650	58.600	2,99010	4,76789
13	6,93	650	33.300	2,99010	4,52244

Resultados y Análisis de Resultados

En principio podríamos analizar los resultados en términos del comportamiento que para cada nivel de esfuerzo se obtuvo en los ciclos a falla, este análisis debe realizarse considerando en principio cada nivel de esfuerzo como una clase estadística y evaluar en ella la dispersión de la muestra, en este caso, de acuerdo a lo reflejado en los resultados se evidencia una elevada dispersión, lo cual sugiere que el evento que condiciona mayoritariamente falla del material fue la etapa de nucleación, ya que es precisamente esta etapa la que introduce esa naturaleza probabilística en los estudios de fatiga, En el caso particular del presente estudio se intentó establecer la influencia de depósito en estas primeras etapas y si retarda o no la nucleación por efectos del estado de esfuerzos local, aspecto que se traduciría en una variación del esfuerzo alternante efectivo y por ende la relación de esfuerzos misma. En este sentido podríamos decir entonces que en efecto nuestro estudio se mantuvo en el régimen de alto ciclaje gobernado por el proceso de nucleación.

Ahora bien, en la figura 3.1 se tienen las curvas características del comportamiento en el régimen de vida finita de resistencia a la fatiga en esfuerzo versus número de ciclos del acero 4340 en estado bonificado en color azul, el acero 4340 con recubrimiento de colmonoy 88 en color verde y acero 4340 motivo de nuestro estudio con recubrimiento de nanoestructurado de carburo de tungsteno 12% cobalto. Se puede observar que la pendiente del sustrato recubierto estudiado es comparativamente baja, indicando que para este nivel de esfuerzo, el material presenta un comportamiento que indica su cercanía al límite de fatiga.

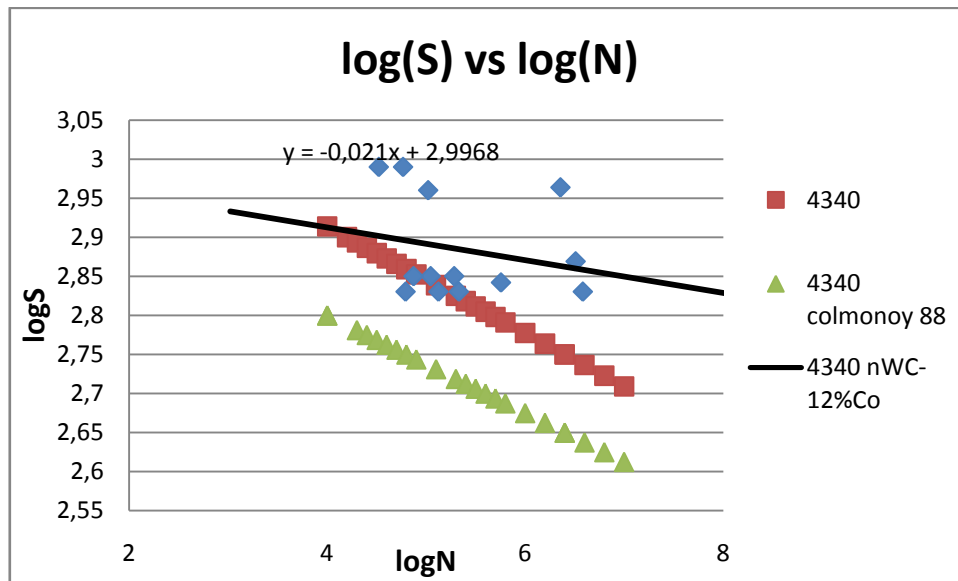


Figura 3.12 Grafica logS-logN comparativa del 4340 bonificado, 4340 recubierto con colomonoy 88 y 4340 recubierto con WC-12%Co nanoestructurado.

Es importante destacar, el incremento que en general experimenta el conjunto con respecto al metal base y otra condición referencial como lo es el mismo substrato ahora recubierto con una super aleación base Níquel. Esta particularidad se debe a varias situaciones conseguidas en el estudio. Ahora bien de acuerdo a lo reportado en la literatura especializada, este incremento podría estar asociado a dos fenómenos, el primero está relacionado con el endurecimiento superficial, como consecuencia de la incorporación de un material substancialmente más resistente que el substrato como lo es este depósito nanoestructurado de Carburo de Tungsteno Cobalto, posibilidad que se ve poco probable ya que en realidad el evento de falla tal y como se puede apreciar en el estudio fractográfico, no tiene su origen en la superficie libre del espécimen, en cuyo caso la resistencia intrínseca de recubrimiento en términos de su tenacidad de fractura obviamente generaría retraso en la propagación de la grieta una vez nucleada, aspecto este que no es válido como argumento para sostener el comportamiento aquí observado, ya que el evento de nucleación de la grieta se da principalmente en la intercara substrato recubrimiento, lo que descartaría esta primera argumentación.

Resultados y Análisis de Resultados

Ahora bien, en segundo lugar tenemos la que serían el Estado de Esfuerzos Residuales, tanto el valor medio como el perfil del mismo, magnitudes y naturaleza de estos. Esta condición tiene sus orígenes en diversos factores es bien conocido los orígenes de estos esfuerzos residuales en este tipo de depósitos, los cuales son fundamentalmente térmicos, generados durante el enfriamiento de los sólidos involucrados desde la temperatura de deposición, los cuales al tener diferentes coeficientes de expansión térmica lineal, estos ven restringidos sus desplazamientos por las fuerzas adhesivas que unen ambos sólidos, generando un estado particular de tensiones internas por lo general de gran magnitud, la otra razón de peso que está presente está relacionada con el evento de impacto de la partícula semi fundida sobre el sustrato, aquí la energía cinética de dichas partículas es transferida al sustrato, generando una condición de esfuerzos residuales internos generalmente en compresión que podrían definitivamente inhibir el evento de nucleación y que incluso si analizamos el problema en términos de la mecánica de fractura, disminuir la velocidad de propagación de la grieta, ya que estos alterarían de manera local el valor del esfuerzo efectivo al cual está sometida la pieza, la que trae consigo la modificación de la relación de esfuerzo presente durante el ensayo lo cual de acuerdo a la ecuación propuesta por *Forman* puede ser cuantificada esta variación en la velocidad de propagación de la grieta, todo ello contribuye a que en efecto se aprecie un incremento en la expectativa de vida de los especímenes aquí evaluados.

3.3 Análisis Fractográfico

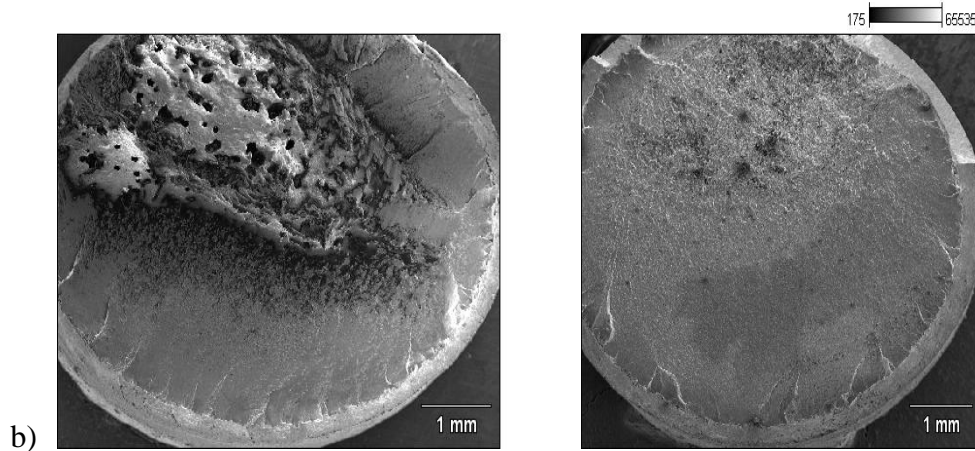


Figura 3.13 Vista general de la zona de fractura del conjunto sustrato recubrimiento ensayado a fatiga al aire. a) La falla ocurrió a los 3.239.300 ciclos de aplicación de la carga y el ensayo fue realizado a 492 MPa. b) La falla ocurrió a los 58600 ciclos de aplicación de la carga y el ensayo fue realizado a 650 MPa.

En la figura 3.2 se puede observar la zona de fractura de las dos probetas estudiadas, en la imagen superior se puede apreciar la multiplicidad de puntos de nucleación de grietas, además de esto también se observa una zona de propagación de la grieta amplia y con muchas marcas radiales en dirección a los puntos de nucleación, la zona de fractura por sobrecarga es pequeña comparada con la imagen inferior y está localizada en la parte superior de la superficie, esto indica que el esfuerzo al que fue sometida la probeta es relativamente bajo y es por esto que la grieta presenta una gran área de propagación.

En la imagen inferior se evidencia una gran multiplicidad de puntos de nucleación de grietas, una zona de propagación de la grieta relativamente pequeña y una zona de fractura por sobrecarga muy grande debida al alto esfuerzo al cual fue sometida la probeta, ya que en ese punto la sección transversal a pesar de ser grande

Resultados y Análisis de Resultados

no soporto la carga aplicada. También podemos observar que la capa de recubrimiento presenta un espesor uniforme a lo largo de toda la periferia de la superficie de fractura lo que indica un proceso controlado y uniforme de deposición.

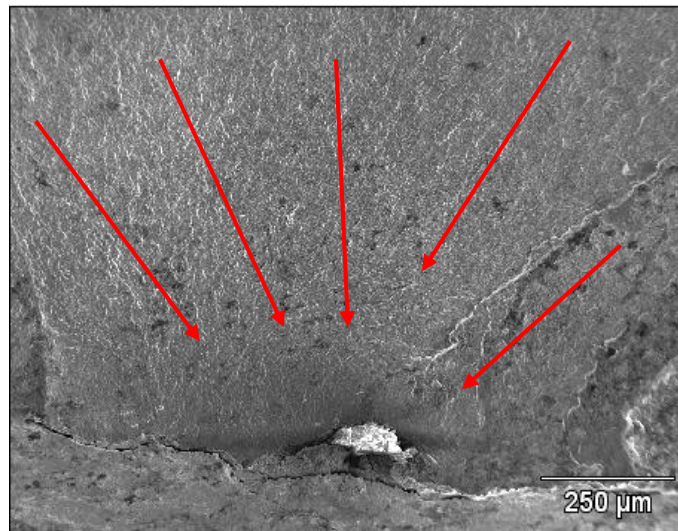
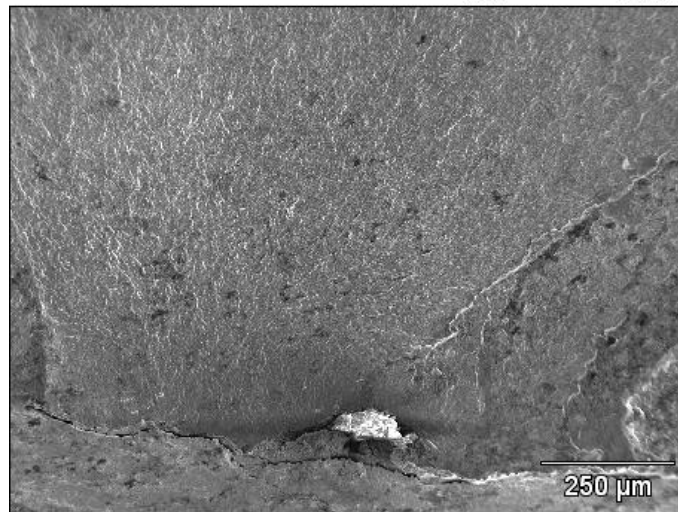


Figura 3.14 Detalle de la zona de iniciación de la grieta.

Al tratar de ubicar un potencial punto de nucleación de las grietas por fatiga, se tomaron imágenes a mayores magnificaciones en los puntos de convergencias de las marcas radiales observadas a nivel macro. En la figura 3.3 se puede observar el detalle de una partícula de alúmina incrustada entre el sustrato y el recubrimiento, se puede inferir por el patrón e inclinación de las marcas radiales sugieren que en efecto la presencia de la partícula está asociada con el evento de nucleación..

Esta partícula de alúmina tiene origen en el preparado superficial previo al recubrimiento (sand blasting), en este proceso partículas de alúmina son proyectadas a grandes velocidades hacia el sustrato y estas debido a su geometría y pequeño tamaño pueden quedar incrustadas en el sustrato para luego ser recubiertas. En la imagen se evidencia la poca adherencia que posee el recubrimiento con la partícula de alúmina, esto causando una discontinuidad en la adherencia del recubrimiento y además un punto concentrador de esfuerzos.

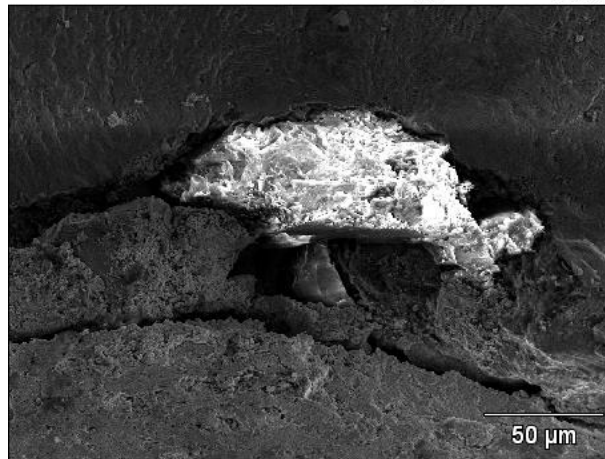
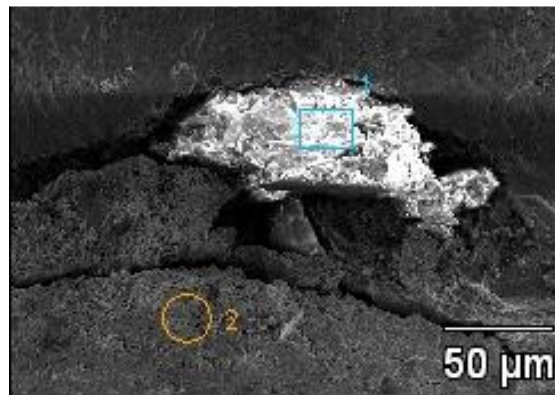


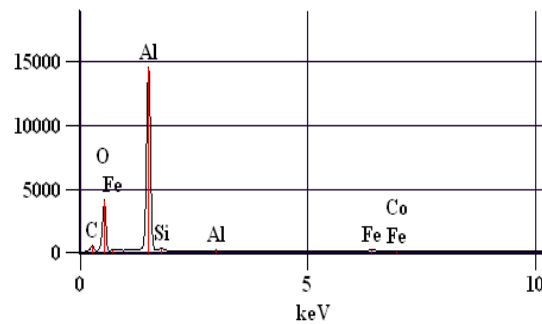
Figura 3.15 Detalle de la partícula de alúmina causante de la nucleación de la grieta.

Resultados y Análisis de Resultados

En la figura 3.4 se observa en detalle la partícula de alúmina causante de la nucleación de la grieta, además de esto se puede ver como el recubrimiento en la parte que está en contacto con la partícula de alúmina tiene poca adherencia y presenta ausencia de material.



Full scale counts: 14537 43-40 WC-Co 1(5)_pt1



Full scale counts: 9245 43-40 WC-Co 1(5)_pt2

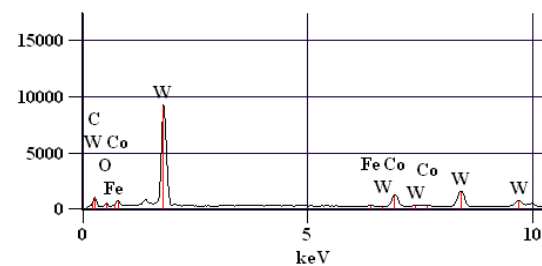


Figura 3.16 Análisis químico de la partícula de alúmina y del recubrimiento.

Tabla 3.8 Porcentaje de peso de los elementos.

	<i>Al-K</i>	<i>Si-K</i>	<i>Fe-K</i>	<i>Co-K</i>	<i>W-L</i>
<i>43-40 WC-Co 1(5)_pt1</i>	87.61	7.30	4.11	0.98	
<i>43-40 WC-Co 1(5)_pt2</i>			0.45	12.28	87.27

Tabla 3.9 Porcentaje en escala relativa de elementos.

	<i>Al-K</i>	<i>Si-K</i>	<i>Fe-K</i>	<i>Co-K</i>	<i>W-L</i>
<i>43-40 WC-Co 1(5)_pt1</i>	90.27	7.23	2.04	0.46	
<i>43-40 WC-Co 1(5)_pt2</i>			1.17	30.14	68.69

En figura 3.5 se observa una magnificación de la resolución del sector de la probeta en donde se encuentra depositada la partícula de alúmina que sugiere un punto de nucleación de grieta, para determinar la composición de los cuerpos encontrados en esta imagen, se realizó un barrido por espectroscopia dispersión en energías de rayos X (EDS) y se obtuvo una grafica indicativa en escala relativa de concentración de ciertos elementos en el área escogida, para la primera región se observa una presencia dominante del aluminio indicando de forma definitiva lo inferido anteriormente, y en la segunda grafica se observa una gran concentración de tungsteno y un porcentaje menor pero significativo correspondiente al nivel de energía atómica del cobalto, quedando demostrado con seguridad la composición química del recubrimiento de carburo de tungsteno 12% cobalto y en el caso de la partícula de donde se inicia la nucleación de grieta se infiere que forma parte de la alúmina proyectada.

43-40 WC -Co -1(1)

79 | 65535

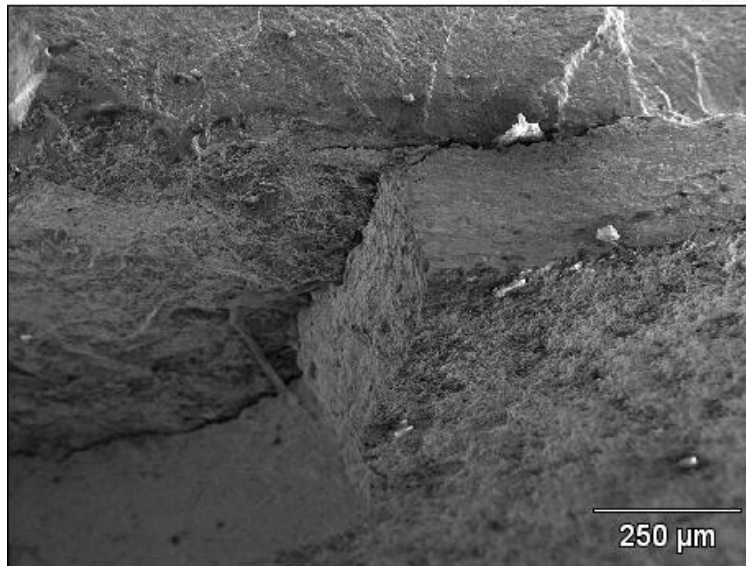


Figura 3.17 Detalle del conjunto sustrato recubrimiento en la zona de fractura

La figura 3.6 ilustra la buena adherencia del recubrimiento con el sustrato en la zona de fractura, no se presentan grietas en el recubrimiento lo que indica un buen comportamiento del conjunto en sollicitaciones dinámicas fluctuantes. Se puede observar otra partícula de alumina causante de la nucleación de la grieta.



Figura 3.18 Detalle de la interfaz sustrato recubrimiento.

Una vez más en la imagen anterior se presenta un recubrimiento denso y bien adherido al sustrato y sin partículas no fundidas en su estructura. Además de lo anterior también se evidencia otra partícula de alúmina en la interfaz sustrato recubrimiento. El recubrimiento no presenta delaminación y a pesar de ser la zona de fractura se evidencia una buena adherencia en la interfaz. Lo cual sugiere que las condiciones de deposición generaron un depósito denso adherente y de excelentes propiedades mecánicas.

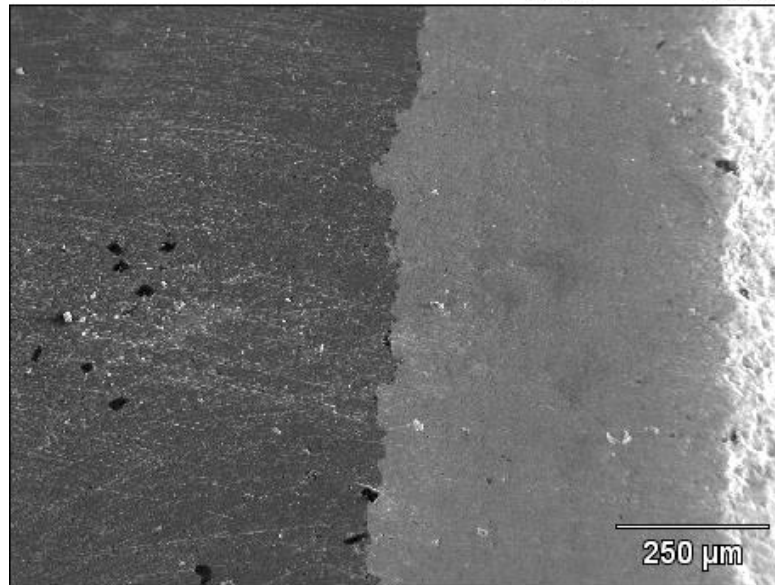


Figura 3.19 Interfaz sustrato recubrimiento.

Esta figura se corresponde a un barrido de la muestra cortada transversalmente y pulida metalográficamente para observar la interfaz sustrato recubrimiento de la probeta ensayada.

Se puede observar un vínculo constante y uniforme a lo largo de la superficie de la probeta (sector izquierdo de la fotografía) con respecto a la adherencia del recubrimiento. Además de esto se puede observar a este nivel de magnificación que no se presentan partículas semifundidas de recubrimiento que por lo general en este tipo de recubrimientos estarían presentes para materiales convencionales microestructurados, lo cual es motivo de nucleación de posibles grietas debidas al fenómeno de fatiga, así que en nuestro caso se evidencia la uniformidad de deposición y la buena calidad del recubrimiento. Aunado a lo anterior no se evidencia la presencia de grietas en el recubrimiento en esta dirección, esto nos indica la buena adherencia y comportamiento del conjunto sustrato recubrimiento.

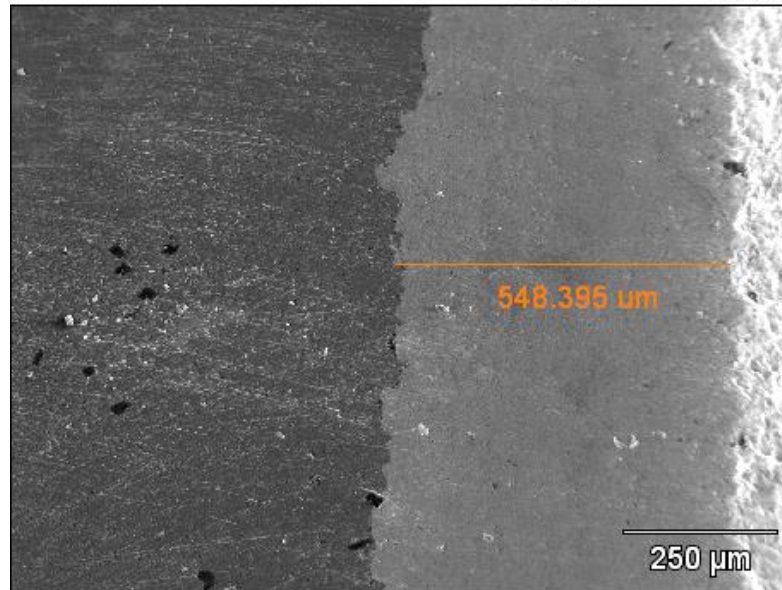


Figura 3.20 Detalle del espesor del recubrimiento.

En la figura anterior se obtiene un acercamiento de la sección de la muestra en donde se encuentra la película de recubrimiento en disposición perpendicular al corte, al utilizar una opción de escalado del software que utiliza el microscopio electrónico se obtiene una medida bastante aproximada del espesor de película, ubicada en esta sección en 548.395 micrometros, quedando de manifiesto la densidad de este tipo de recubrimiento con respecto a otras técnicas de deposición, cabe destacar que la medida realizada se corresponde al valor real ya que se garantiza un ángulo entre el haz de electrones y la superficie del espécimen no mayor a 60°.

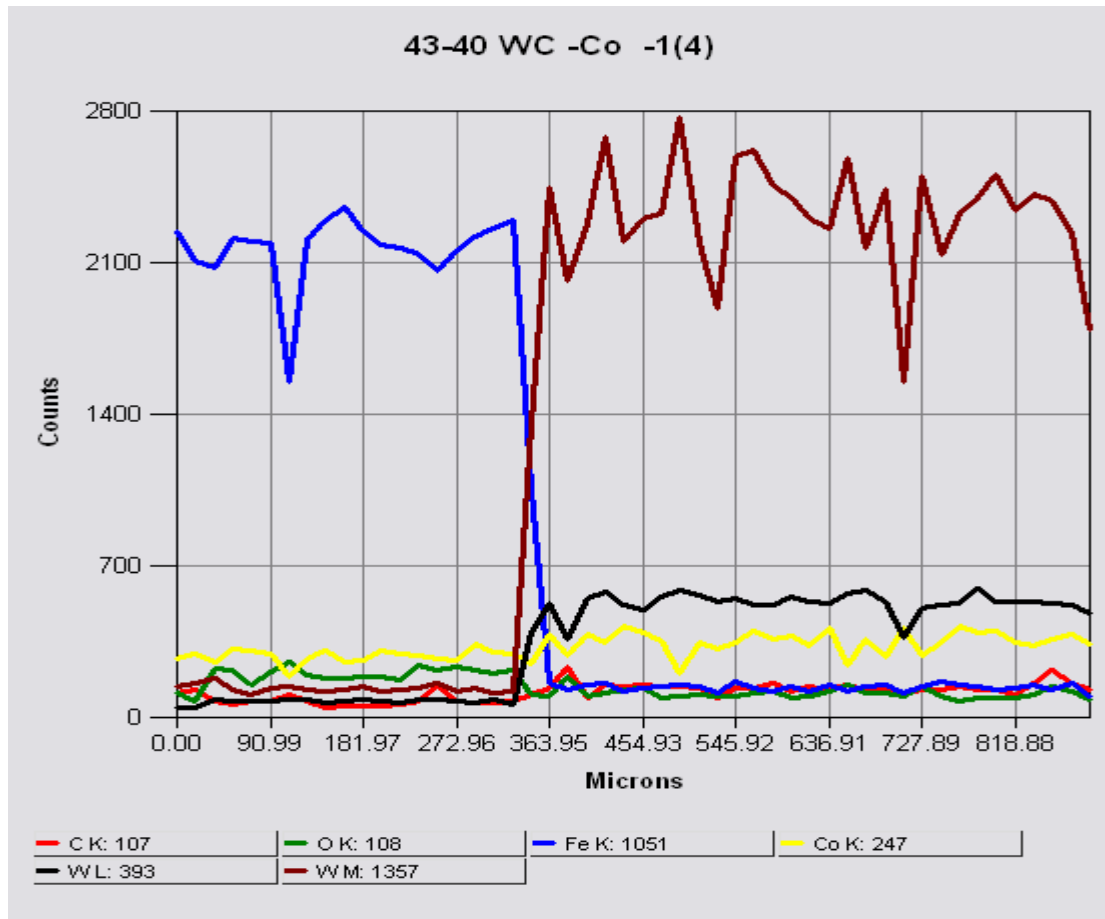
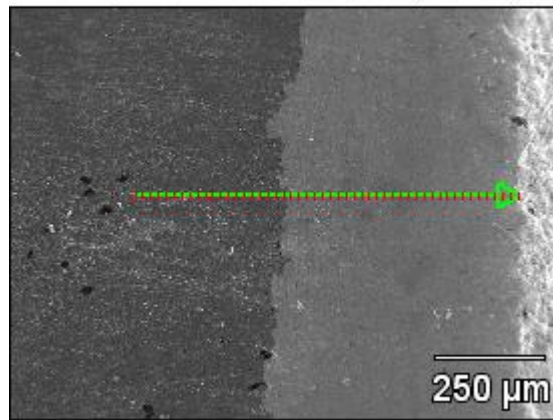


Figura 3.21 Análisis químico de una sección sustrato recubrimiento.

Finalmente, en la figura anterior se realizó un análisis químico para observar los elementos presentes tanto en el sustrato como en el recubrimiento, los elementos buscados en este estudio son el hierro, el cobalto, el tungsteno y el carbono. Como es de esperar el elemento predominante en el sustrato es el hierro, lo cual es totalmente correcto ya que es el mayor componente del acero. Llegando a la interfaz se puede observar como el tungsteno aumenta bruscamente y el hierro decae, esto indica una gran concentración de tungsteno en el recubrimiento. El cobalto está presente a lo largo de toda la superficie lo cual en principio es de esperar ya que el sustrato es un acero de alta resistencia baja aleación Ni, Cr Mo, el cual en algunas veces el Co está presente y no olvidemos que el depósito retiene un 12% de Cobalto, y por efecto matriz podría estar alterando la señal, esto también puede deberse a que el cobalto y el molibdeno son elementos que tienen radiaciones muy cercanas y el equipo al realizar el estudio pudo confundir el molibdeno contenido en el acero AISI 4340 por cobalto, dando como resultado la presencia de cobalto en el sustrato.

Además de lo anteriormente mencionado se puede observar que el estudio arroja la presencia de dos fases de tungsteno, lo cual es característico de este tipo de recubrimientos, ya que el oxígeno libre y la temperatura de la llama crean un ambiente muy propicio para la descarburización o pérdida de carbono en el sistema.

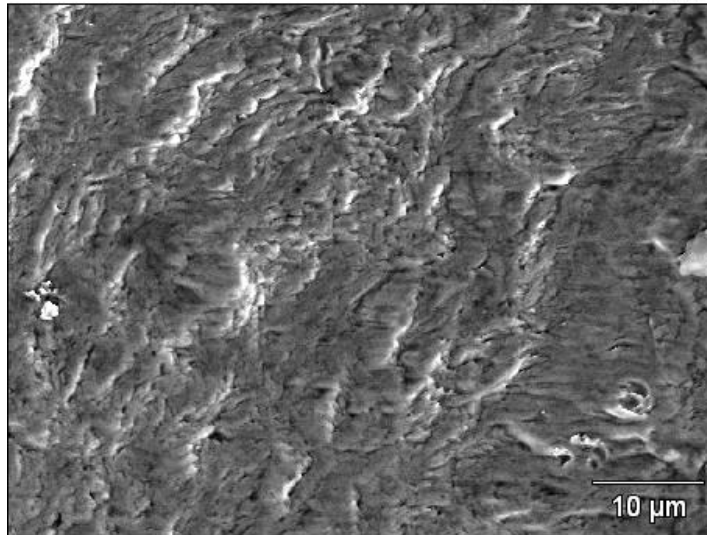


Figura 3.22 superficie de fractura donde se muestran estriaciones del material.

La figura 3.11 representa la mayor magnificación del estudio, con la escala de 10 micras podemos comparar la dimensión de las estriaciones observadas en la superficie, que en el caso de este sector varían entre 1 y 2 micras de distancia entre cúspides. Estas estriaciones se disponen en orientación perpendiculares a la dirección de avance de la grieta en la superficie de fractura, cada cúspide de banda de deslizamiento observada corresponde a un ciclo carga confirmando el mecanismo de despunte plástico como fenómeno fundamental que gobierna el evento de propagación.

4.1 CONCLUSIONES

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

1. El recubrimiento sintetizado bajo una tasa de alimentación de los polvos de 70 gr/min y 6-7 GPH, resultó ser denso, sin presencia de partículas no fundidas, con buena adherencia al sustrato y sin discontinuidades importantes lo cual se traduce en un buen comportamiento bajo sistemas dinámicos de carga.
2. El recubrimiento presenta mejores propiedades mecánicas y comportamiento bajo cargas dinámicas alternantes que sistemas químicamente equivalentes microestructurados obtenidos por procesos de deposición similares.
3. El conjunto sustrato recubrimiento presenta una mejor expectativa de vida bajo condiciones de fatiga comparado con el sustrato sin recubrir y a su vez con el sustrato recubierto con una super aleación en base a Niquel, Colmonoy 88.
4. El recubrimiento supone un aporte importante en el comportamiento y disminución de la velocidad de propagación de la grieta hacia el interior del sustrato ya que la nucleación de la grieta no tiene su inicio en la superficie del recubrimiento, sino en la interfaz sustrato-recubrimiento debido a partículas de alúmina retenidas.
5. La presencia de dos fases de carburo de tungsteno en el análisis químico del recubrimiento indica la presencia de una temperatura de llama elevada y la presencia de oxígeno libre en ésta, ya que ambas condiciones propician la descarburización.

4.2 RECOMENDACIONES

1. Utilizar otro tipo de partículas para mejorar la rugosidad necesaria para la deposición del recubrimiento, en sustitución a la proyección clásica de alúmina angular, éstas pueden ser sustituidas por pequeñas esferas de acero proyectadas a grandes velocidades que lograrían el efecto topográfico deseado en la superficie pero sin la incrustación de las mismas en el sustrato.
2. Garantizar que los hombros de la probeta no sean recubiertos para así lograr un buen acople de la probeta en la máquina de flexión rotativa y obtener un ensayo sin presencia de vibración asociada a la rotación de la probeta, garantizando resultados óptimos que no se vean afectados por este agente perturbador.
3. Controlar el flujo de oxígeno de forma independiente durante el proceso de deposición ya que la concentración de este podría propiciar la formación de capas monomoleculares de óxido que atentan la buena adhesión del depósito.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- A.G. MAMALIS “Recent Advances in Nanotechnology”. Journal of Materials Processing Technology 181 (2007) pp 52–58.
- ASTM designación A-370 “Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products”, 2003. Estados Unidos de America.
- ASTM designación E-384 “Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products”, 2008. Estados Unidos de America.
- ASTM designación E-606 “Standard Practice for Strain-Controlled Fatigue Testing”, 2008. Estados Unidos de America
- ASTM Handbook “Failure Analysis and Prevention”. Vol 10. 9na.edición. 1985.
- ASTM metals handbook, “failure analysis and prevention”. Vol 10. 8th edition.
- CALLISTER, W.“Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales”. Barcelona, España: Reverté. 2004.
- CHO T.Y, YOON Y.H., K.S KIM, K.O SONG, Y.K. JOO, W. FANG, S.H. ZHANG, S.J. YOUN,H.G. CHUN, S.Y. HWANG “A STUDY ON HVOF COATINGS OF MICRON AND NANO WC-CO POWDERS”. Surface & Coatings Technology 2008. pp 5556–5559.
- C.J. VILLALOBOS-GUTIÉRREZ, G.E. GEDLER-CHACÓN, J.G. LA BARBERA-SOSA, A. PIÑEIRO, M.H. STAIA, J. LESAGE, D. CHICOT, G. MESMACQUE, E.S. PUCHI-CABRERA “Fatigue and Corrosion-Fatigue Behavior of an AA6063-T6 Aluminum Alloy Coated with a WC-10Co- 4Cr Alloy Deposited by HVOF Thermal Spraying”. 2008.
- E.S. PUCHI-CABRERA, M.H. STAIA, J. LESAGE, D.CHICOT, J.G. LABARBERA-SOSA, E.A. OCHOA-PEREZ “ Fatigue performance of a SAE 1045 steel coated with a colmonoy 88 alloy deposited by HVOF thermal spray” Surface & coating technology 2006 pp 2038-2045

Referencias Bibliográficas

- *F. OLIVEIRA, L. HERNÁNDEZ, J.A. BERRÍOS, C. VILLALOBOS, A. PERTUZ, E.S. PUCHI-CABRERA* “Corrosion-fatigue properties of a 4340 steel coated with Colmonoy 88 alloy, applied by HVOF thermal spray” *Surface & coating technology* 2001 pp 128-135.
- *FUNDACIÓN INSTITUTO DE INGENIERÍA DEL PODER POPULAR DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA* “ Estudio de prospectiva tecnológica en nanotecnología” Caracas Venezuela. 2008.
- *JOA CECILIA.* “ 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. 2010.
- *K.H. BAIK A, J.H. KIMB, B.G. SEONG* “Improvements in Hardness and Wear Resistance of Thermally Sprayed WC-Co Nanocomposite Coatings”. *Materials Science and Engineering*. 2007. pp 846–849.
- *L. HERNANDEZ, F. OLIVEIRA, J.A.BERRIOS, C. VILLALOBOS, A. PERTUZ, E.S. PUCHI-CABRERA* “ Fatigue properties of a 4340 steel coated with a Colmonoy 88 deposit aplied by High velocity oxygen fuel” *Surface & coating technology* 2000 pp 68-77
- *MINGHENG LI, DAN SHI, PANAGIOTIS D. CHRISTOFIDES* “Model-Based Estimation and Control of Particle Velocity and Melting in HVOF Thermal Spray” *Chemical Engineering Science*. 2004. pp 5647–5656.
- *P. SURESH BABU, BIKRAMJIT BASU B, G. SUNDARARAJAN* “Processing–Structure–Property Correlation and Decarburization Phenomenon in Detonation Sprayed WC–12Co Coatings”. *Acta Materialia* 56. 2008. pp 5012–5026.
- *YUNFEI Q., TRAU GOTT E. FISCHER AND 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”