

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**COMPORTAMIENTO A LA FATIGA DEL ACERO SAE 4340 RECUBIERTO
CON WC- Co POR TERMOROCIADO**

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
para optar al título de
Ingeniero Mecánico
por la Br. Chirinos Angulo, Karla L.

Caracas, Mayo 2003

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**COMPORTAMIENTO A LA FATIGA DEL ACERO SAE 4340 RECUBIERTO
CON WC- Co POR TERMOROCIADO**

TUTOR: Prof. Eli Saúl Puchi

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
para optar al título de
Ingeniero Mecánico
por la Br. Chirinos Angulo, Karla L.

Caracas, Mayo 2003

Chirinos A. Karla L.

**COMPORTAMIENTO A LA FATIGA DEL ACERO SAE 4340,
RECUBIERTO CON WC- Co POR TERMOROCIADO**

Tutor: Prof. Eli Saúl Puchi. Tesis.

Ciudad de Caracas U. C. V

Facultad de Ingeniería.

Escuela de Ingeniería Mecánica.

Año 2003, 86pp.

**Palabras claves: Carburo de Tungsteno- Cobalto, Fatiga,
Recubrimientos, Termorociado**

Resumen. Se realizó una investigación con la finalidad de estudiar el comportamiento a la fatiga de un acero SAE 4340 recubierto con un depósito de WC- 12%Co. Las muestras fueron recubiertas hasta un espesor de 230 μm . Los ensayos fueron realizados a flexión rotativa. Estos ensayos de fatiga al aire fueron realizados para el material base y para el material recubierto. Los esfuerzos a los cuales se ensayaron las probetas representan una fracción del valor del esfuerzo de fluencia tanto del material base como del material recubierto, los cuales se obtuvieron en los ensayos de tracción realizados, para cada condición. Se encontró que las propiedades estáticas del material, esfuerzo de fluencia, resistencia a la tracción, esfuerzo real a carga máxima y esfuerzo real a la fractura, muestran disminuciones poco significativas con respecto al material sin recubrimiento. Mediante la ecuación de Basquin, fueron obtenidos los resultados del ensayo de fatiga, y mediante el método de la escalera se obtuvo el límite de fatiga. Los resultados de fatiga al aire mostraron una disminución de resistencia a la fatiga entre (83- 90) %, con respecto al material base sin recubrimiento. El límite de fatiga disminuyó en un 8%, al pasar de 554 MPa para el material base sin recubrimiento a 509 MPa para el material con recubrimiento. El estudio fractográfico en MEB, reveló una mala cohesión del recubrimiento y la formación de múltiples inicios de grieta de fatiga, que aparentemente indican que el recubrimiento actuó como un concentrador de

esfuerzos alrededor de la probeta, incidiendo probablemente, en la disminución de la resistencia a la fatiga del material.

DEDICATORIA.

A mi madre, por darme el mejor ejemplo que una madre puede dar, por haberme dado el ser y hacerme la persona que soy, por tener la más grande de las paciencias conmigo, a ti que siempre esperaste este momento.

A mi padre, por haberme dado el carácter y la formación, sin ella no hubiese llegado a la meta.

A mi generosa abuela Lourdes, que con sus divinas sopas y graciosos refranes, más de una vez me alegraron y me incentivaron a seguir adelante.

A mis hermanos, para que sepan que todo en la vida cuanto nos proponamos podemos alcanzarlo, siempre que se haga con la firme convicción de obtenerlo, los quiero mucho.

Y a ti, mi vida, que con tu amor fuiste la luz al final del túnel, el brazo y el apoyo que necesité a lo largo de toda mi carrera, a ti que en los momentos más difíciles supiste apoyarme y darme el impulso necesario para continuar y así cristalizar esta maravillosa realidad, nuestra realidad. Te AMO, esto es para ti.

AGRADECIMIENTOS.

Agradezco principalmente a Dios, por darme la oportunidad de existir y vivir bajo su manto, haberme entregado la inteligencia, la salud y la paciencia necesaria para alcanzar esta y otras metas. Por dejarme apreciar las mil maneras en las que él está presente y a todos sus ayudantes les agradezco el haberme orientado, guiado, y protegido, sin su ayuda nada es posible.

Agradezco a una amiga muy querida que aunque no está conmigo físicamente me ha acompañado en todas las actividades de mi vida, gracias por cuidarme e iluminarme desde allá arriba LUSMIR.

Agradezco a mis padres por darme la vida, el sustento y el apoyo necesario para hacerme la mujer que soy. MIL GRACIAS.

Agradezco a mis hermanos, quienes con sus críticas colaboraron a la cristalización de este meta, en especial a ti CAROLINA, por haber traído al mundo a tan maravilloso y especial ser que es ORIANA, mi querida sobrina que lo que ha traído a mi vida es dicha y felicidad motivándome a ser una mejor persona y madre, TE ADORO MI PIMPOMPLINITA.

Agradezco a toda mi familia, por ser tan pacientes y darme el apoyo que todo estudiante necesita, en especial a mi tía SONIA, tía gracias por darnos a todos esa lección de vida, de ganas de superarse y de seguir adelante a pesar de las adversidades y de lo rocoso del camino, gracias.

Agradezco a mi cuñado Douglas (vitamina), por brindarme el soporte técnico, lo cual fue indispensable para lograr este trabajo.

Agradezco a esta Ilustre Universidad, a la Escuela de Ingeniería Mecánica y a todos los profesores de quienes aprendí mucho.

Agradezco a la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencias de los Materiales, a Manuel John por ser tan paciente, amigable y por haber compartido conmigo la gran cantidad de conocimientos que su gran mente alberga, gracias por tus consejos, como guía de este trabajo y como amigo sin tu ayuda no lo hubiese conseguido. A mis amigos Paya, Luis Miguel y Luis Perdomo, por haberme acompañado y ayudado en las interminables horas de trabajo en el laboratorio, y a sus infinitas bromas que hicieron de mi estadía en su escuela algo muy agradable, gracias.

Agradezco a mi tutor Prof. Puchi, por haberme dado la oportunidad de desarrollar este trabajo, por darme toda la orientación y apoyo para realizar y llegar a feliz termino este trabajo, al Prof. Crisantos, por su buen humor y colaboración durante todo el camino.

Agradezco todo el soporte económico dado para la realización de este trabajo dado por el CONICIT y el Proyecto lab.- 97000644.

Y te agradezco a ti mi corazón el estar en mi vida, dándome todo el amor y la comprensión que necesité en mis momentos de duda, gracias por ayudarme a continuar y seguir adelante demostrándome que el amor todo lo puede, gracias por ser mi pareja.

A todos GRACIAS sin ustedes este trabajo hoy no fuera una maravillosa realidad.

KARLA LOURDES CHIRINOS ANGULO.

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN.....	1
1. MARCO TEÓRICO.	
1.1 ACERO SAE 4340.	
1.1.1 Características del acero SAE 4340.....	3
1.1.2 Aleación.....	3
1.1.3 Aplicaciones.....	4
1.2 RECUBRIMIENTOS.	
1.2.1 Definición.....	4
1.2.2 Aplicaciones.....	5
1.2.3 Formas de realizar un recubrimiento.....	6
1.3 RECUBRIMIENTO CARBURO DE TUNGSTENO- COBALTO.	
1.3.1 Antecedentes.....	7
1.3.2 Composiciones y microestructuras.....	8
1.3.2.1 Aleaciones de Carburo de Tungsteno- Cobalto.....	9
1.3.2.2 Aleaciones de Carburo de Tungsteno- Cobalto con tamaño de grano submicrónico.....	10
1.3.2.3 Aleaciones compuestas por Carburo de Tungsteno- Carburo de Titanio- Cobalto.....	10
1.3.3 Clasificación de los carburos cementados.....	11
1.3.3.1 Sistema de clasificación grado C.....	11
1.3.3.2 Sistema de clasificación ISO.....	12
1.3.4 Propiedades de los Carburos Cementados.....	13
1.3.4.1 Fatiga térmica.....	13
1.3.4.2 Dureza.....	13
1.3.4.3 Densidad.....	14
1.3.4.4 Porosidad.....	14

1.3.4.5 Resistencia al choque térmico.....	14
1.4 TERMOROCIADO.	
1.4.1 Definición.....	15
1.4.2 Ventajas de los recubrimientos termorociados.....	17
1.4.3 Materiales que pueden ser depositados mediante procesos de termorociado.....	18
1.5 TERMOROCIADO DE ALTA VELOCIDAD (H.V.O.F).	
1.5.1 Definición.....	18
1.5.2 Aplicaciones y características.....	20
1.5.3 Asuntos de salud, seguridad y ambiente.....	21
1.5.3.1 Emisiones de gas y polvos.....	22
1.5.3.2 El ruido.....	23
1.5.3.3 La radiación luminosa.....	23
1.6 FATIGA.	
1.6.1 Introducción.....	24
1.6.2 Definición.....	25
1.6.3 Comportamiento a la fatiga del acero.....	25
1.6.4 Mecanismo de formación de la grieta.....	27
1.6.5 Curva S- N (Curva de Wöhler).....	28
1.6.5.1 Significado.....	28
1.6.5.2 Características.....	28
1.6.6 Modelo de Basquin.....	29
1.6.7 Método de la escalera.....	30
1.6.8 Factores que afectan la fatiga.....	31
1.6.8.1 Temperatura.....	31
1.6.8.2 Superficie.....	32
1.6.8.3 Concentraciones de esfuerzo.....	33
1.6.8.4 Tamaño de la pieza.....	35
1.6.8.5 Esfuerzo medio.....	35

1.6.8.6 Resistencia a la fatiga bajo esfuerzos complejos.....	38
1.6.8.7 Ley del deterioro lineal o Ley del daño acumulado.....	39
1.6.8.8 Recubrimientos.....	39
1.6.8.9 Factores metalúrgicos.....	40
1.6.8.9.1 Composición química.....	40
1.6.8.9.2 Tratamiento térmico y microestructura.....	40
1.6.8.9.3 Inclusiones.....	41

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.

2.1 FLUJOGRAMA DE TRABAJO.....	43
2.2 PROBETAS DE TRACCIÓN Y FATIGA.....	44
2.2.1 Distribución y dimensionamiento.....	44
2.2.2 Preparación superficial.....	46
2.2.3 Recubrimiento.....	46
2.3 CARACTERIZACIÓN DEL RECUBRIMIENTO.....	50
2.3.1 Espesor.....	50
2.3.2 Dureza.....	51
2.4 ENSAYO DE TRACCIÓN.....	52
2.4.1 Características.....	52
2.4.2 Obtención de la curva Esfuerzo- Deformación Real.....	54
2.5 ENSAYO DE FATIGA.....	55
2.5.1 Características.....	55
2.6 DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LA ECUACIÓN DE BASQUIN.....	57

2.7 DETERMINACIÓN DEL LÍMITE DE FATIGA POR EL MÉTODO DE LA ESCALERA.....	58
2.8 ESTUDIO FRACTOGRÁFICO.....	59
2.8.1 Preparación de las muestras.....	59
2.8.2 Microscopía electrónica de barrido (M. E. B).....	61
3 RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	62
4 CONCLUSIONES.....	83
5 RECOMENDACIONES.....	84
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	85

INTRODUCCIÓN.

Son numerosos los estudios realizados sobre fatiga, la cual es una forma de falla que no muestra indicio previo y puede ocurrir en cualquier tipo de material.

Existen muchos factores involucrados en el comportamiento a la fatiga de los materiales por ejemplo: geometría y tamaño de la pieza, acabado superficial, presencia de esfuerzos residuales, frecuencia y magnitud de la carga o deformación aplicada, resistencia a la corrosión, resistencia al desgaste entre otros.

Para alargar la vida y/o resistencia a la fatiga de un material es necesario estudiar y poner en práctica los métodos para mejorar dichos factores, en ese sentido, una de las formas de mejorar la resistencia a la corrosión y al desgaste es con la aplicación de recubrimientos sobre el material.

Dentro de los diferentes métodos de aplicación de los recubrimientos, la técnica de termorociado de hipervelocidad High Velocity Oxi- Fuel (HVOF), es un excelente proceso de Ingeniería de superficie por su forma de aplicación y las propiedades únicas de los recubrimientos. Esto es debido, entre otras cosas, a las altas velocidades de los polvos y de las partículas así como las temperaturas de trabajo.

Mediante el proceso de HVOF pueden ser aplicados materiales tan blandos como el Estaño o tan duros como el Carburo de Tungsteno.

El Carburo de Tungsteno es un recubrimiento que hoy en día se presenta como una de las mejores alternativas para sustituir al Cromo duro, y así evitar los efectos perjudiciales de este sobre el medio ambiente^[1].

Ha sido comprobado que el Cobalto es un excelente material de unión y adherencia, que cumple con los requerimientos para permitir la solidificación de un cuerpo metálico duro^[15].

En este trabajo será utilizado un depósito de Carburo de Tungsteno y Cobalto (WC-12%Co), aplicado por HVOF sobre un acero SAE 4340 templado y revenido.

Por consiguiente, en este Trabajo Especial de Grado, se propone evaluar y estudiar el comportamiento a la fatiga de dicho acero solicitado a flexión rotativa y compararlo con el comportamiento que tiene dicho acero al ser recubierto con un depósito WC-Co y así observar la influencia que tiene sobre el material.

1.- MARCO TEORICO.

1.1- ACERO SAE 4340.

1.1.1- CARACTERÍSTICAS DEL ACERO SAE 4340^[3].

Este acero al cromo-níquel-molibdeno, se utiliza para la fabricación de elementos de máquina sometidos a grandes esfuerzos cíclicos y/o estáticos. 4340, el primer número(4), indica el tipo de acero, elemento de aleación principal; el segundo número(3), muestra el % en peso aproximado del elemento de aleación principal y la última cifra (40), muestra el % en peso del contenido medio de carbono.

1.1.2- ALEACIÓN^[4].

El acero 4340, presenta alta resistencia a la tracción, a la torsión, al desgaste y al impacto. Este acero es usualmente templado en aceite y es prácticamente inmune a la fragilización por temple. Al ser tratado térmicamente, tiene la capacidad de alcanzar una alta resistencia a la fatiga y tiene una elevada ductilidad y tenacidad. Por ser suministrado en estado de temple y revenido no es necesario aplicarle tratamientos térmicos posteriores (en la mayoría de los casos) y su maquinabilidad es mejor en ese estado, y puede ser trabajado mediante todos los métodos convencionales de maquinado. Es trabajado hasta una temperatura de 773 K, sin perder sus propiedades mecánicas. No se ablanda con facilidad a altas temperaturas y conserva buena parte de su resistencia mecánica. Posee buenas características de soldabilidad, puede ser soldado fácilmente a gas y arco pero al ser soldado con varilla debe ser de la misma composición del material a soldar. Este acero es altamente sensible a la corrosión bajo esfuerzo, cuando es templado hasta valores de resistencia a la tracción de alrededor de 1500 a 1950 MPa.

La tabla 1 muestra la composición química del acero 4340 en peso, donde se consideran valores límites y valores máximos permisibles de ciertos elementos que no son

especificados o requeridos y que son considerados como impurezas: Cobre 0,35%, Níquel 0,25%, Cromo 0,20%, Molibdeno 0,06%.

Tabla 1. Composición química en peso acero 4340^[3].

C	Mn	P	Si	Ni	Cr	Mo	S	V
0,38-0,43	0,60-0,80	0,035	0,15-0,35	1,65-2,00	0,70-0,90	0,20-0,30	0,040	-o-

1.1.3- APLICACIONES^[4].

El acero 4340 es utilizado en partes de maquinarias sometidas a elevadas cargas dinámicas; árboles de transmisión, cigüeñales, barras de torsión, ejes de cardan, ejes de bombas, ejes de leva, ejes para hélices de aviones, ejes de piñones, rodillos de transportadoras, vástagos y pines, pernos y tuercas a alta carga de tracción, engranajes, muñones, brazos de dirección, piezas de chasis, discos de embrague, acoples, ruedas dentadas, moldes para inyección de plástico etc.

1.2- RECUBRIMIENTOS.

1.2.1- DEFINICIÓN.

Son elementos de sacrificio para aumentar la vida de servicio de la pieza, sufren las inclemencias de un ambiente corrosivo, protegiendo al metal base, mejoran las propiedades de resistencia al desgaste y a la corrosión, y son usados como técnica de protección y recuperación de superficies de elementos de máquinas, de factores como el desgaste, calor, erosión, oxidación y corrosión entre otros. Los recubrimientos pueden ser tan blandos como el Babbit (aleación estaño-cobre) utilizado en superficies anti-fricción, cojinetes de cigüeñales, patines, guías, o tan duros como el Carburo de

Tungsteno, utilizado en superficies anti-desgaste, molinos de cantera, tornillos de extrusoras de plástico, etc.

El siguiente esquema muestra los pasos elementales para realizar un recubrimiento:

MATERIAL + FUENTE DE + ACELERACIÓN DE LAS + IMPACTO = RECUBRIMIENTO
(polvo o alambre) CALOR PARTICULAS

1.2.2- APLICACIONES^{[16], [18]}.

En diversos campos industriales, por ejemplo, son utilizados en intercambiadores de calor en las calderas, en los rodets de las turbinas, bombas y compresores, válvulas etc; en aplicaciones aeroespaciales, en la industria marina, criogénica, del papel, de los textiles, cerámica, metalúrgica, electrónica, productos petroquímicos, implantes óseos o dentales y en la industria del automóvil. Estos campos de aplicación se catalogan en función de los requerimientos mínimos de diseño y los requerimientos involucrados en el proceso:

- Resistencia al desgaste, erosión y adhesión.
- Resistencia a la oxidación.
- Resistencia a la corrosión atmosférica y soluciones químicas.
- Resistencia a altas temperaturas.
- Resistencia a la cavitación.
- Resistencia a los metales fundidos.
- Reconstrucción o restauración de dimensiones.
- Creación de aislantes.
- Biomedicina (prótesis de cadera, de rodilla).
- Conductividad eléctrica (termocuplas de alta temperatura, galgas extensiométricas).
- Anti-adherencia para fácil limpieza.
- Rugosidad controlada para tracción óptima.

- Control de la fricción.
- Capas usadas como moderador nuclear.
- Superficies catalíticas y películas partidas para presionadores calientes isostáticos.

1.2.3- FORMAS DE REALIZAR UN RECUBRIMIENTO.

- Inmersión en caliente.
- Deposición química en fase vapor.
- Electro plateado.
- Recubrimiento con fusión del material base o con un enlace metalúrgico:
 1. Arco transferido por plasma.
 2. Arco rápido.
 3. Rociado y fundido.
 4. Cordón de soldadura.
 5. Soldadura por proceso metal gas inerte.
- Recubrimiento por rociado térmico (Termorociado), que se divide en dos grupos principales en función de la energía utilizada para fundir el material:
 1. Electricidad: cuya fuente de energía para fundir el material proviene de la energía eléctrica, aquí se encuentra rociado por arco eléctrico, y rociado por formación de plasma.
 2. Combustión: este grupo se refiere a los procesos en los que el material de alimentación es calentado en una cámara de combustión a la cual convergen una serie de inyectores con la finalidad de proporcionar el combustible y oxígeno; estos a su vez se dividen según la velocidad que alcanza la partícula del recubrimiento en el momento de ser proyectada sobre el substrato. Subsónico, donde la velocidad de la partícula es

inferior a la velocidad del sonido (360 m/s), en este grupo se encuentra el termorociado por llama, y el Supersónico, donde la velocidad está por encima de la velocidad del sonido, en este otro grupo se encuentra el termorociado por detonación (Detonación Gun) y el HVOF (High Velocity Oxy- Fuel) que fue el utilizado en este trabajo y será explicado en detalle más adelante.

1.3.- RECUBRIMIENTO CARBURO DE TUNGSTENO- COBALTO^[15] .

1.3.1.- ANTECEDENTES.

Este tipo de recubrimiento pertenece a la familia de los carburos cementados y a la clase de materiales refractarios, mejor conocido en Estados Unidos como metales duros. Los carburos cementados lo integran varias mezclas de carburos y grupos de metales ferrosos, tales como: carburo tungsteno/ cobalto (fue el primer carburo cementado producido), carburo tungsteno/ carburo titanio/ carburo tantalio/ carburo niobio/ cobalto o carburo titanio / carburo molibdeno/ níquel. Estos materiales son resistentes al desgaste y duros, donde las partículas de carburo están bien adheridas o cementadas por un metal dúctil de fácil pegado.

Estos materiales primeramente fueron desarrollados en Alemania en los años veinte (1920) en respuesta a la demanda de un material modelo que tuviera suficiente resistencia al desgaste para ser usado en la producción de alambres con filamentos de tungstenos incandescente y así reemplazar los costosos moldes de diamante. El carburo de tungsteno fue primero sintetizado por el químico Francés Henri Moissan en 1890. Existen dos tipos de carburo de tungsteno: WC; el cual se separa directamente a 2800 °C (5070 °F), y el W₂C, el cual se funde a 2750 °C (4980°F). Los primeros intentos de producir modelos para aleaciones eutécticas de WC y W₂C no fueron satisfactorios, porque el material tuvo muchas astillas o bordes y se fracturaba fácilmente. Las partículas de carburo de tungsteno en la forma de partículas fuertes, duras y finamente divididas, están pegadas dentro de un cuerpo sólido con la ayuda de un agente para

cementado metálico. Los primeros experimentos con un número determinado de metales estableció que este agente para el cementado, debía poseer las siguientes propiedades para permitir la solidificación de un cuerpo metálico duro:

- Afinidad química íntima para las partículas de carburo.
- Un relativamente bajo punto de fusión.
- Capacidad limitada de alearse con el carburo.
- Gran ductilidad (no puede ser dañada por la operación de cementado).

Pronto fue descubierto al cobalto como el mejor material de unión y adherencia que satisface estos requerimientos. El primer trabajo fue llevado a cabo en Alemania por Lohmann y Voigtlander en 1914, por Liebmann y Laise en 1917, y por Schroeter desde 1923 a 1925. El uso de técnicas de polvos metalúrgicos propuestos por Schroeter en 1923 pavimentó el camino para obtener un producto consolidado completo. Este investigador, combinó finos polvos de WC con pequeñas cantidades de polvo de hierro, níquel o cobalto y presionando los polvos hasta compactarlos, los cuales fueron luego sinterizados a aproximadamente $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($2400\text{ }^{\circ}\text{F}$). Krupp perfeccionó el proceso en 1927 y negoció el primer producto de importancia comercial, la cuchilla de punta de diamante o Widia. Con el paso de los años, el material básico WC-Co ha sido modificado para producir una variedad de carburos cementados, los cuales son usados en un amplio espectro de aplicaciones, incluyendo las piezas y herramientas metálicas, la minería, la construcción, perforación de rocas, elaboración de componentes estructurales y piezas antidesgastables; aproximadamente el 50% de toda la producción de carburos es usada para aplicaciones de herramientas y piezas de corte.

1.3.2- COMPOSICIONES Y MICROESTRUCTURAS.

El funcionamiento de las herramientas para corte elaboradas con carburos, está significativamente ligada con la composición y la microestructura, y las propiedades de las herramientas de carburos cementados dependen no solo del tipo y la cantidad de

carburo, sino que también hay que considerar el tamaño de grano del carburo y la cantidad de metal adherente.

1.3.2.1- ALEACIONES DE CARBURO DE TUNGSTENO – COBALTO.

Los primeros carburos cementados comercialmente disponibles, consistían en partículas de carburo de tungsteno pegados con cobalto. Estos comúnmente son referidos como a grados directos. Estas aleaciones muestran excelente resistencia al desgaste abrasivo simple y por eso tienen muchas aplicaciones en el corte de metales.

La tabla 2 se refiere a las propiedades representativas de varias aleaciones de WC – Co. Para propósitos de maquinado son generalmente usados las aleaciones con 3 a 12% de cobalto y tamaños de grano que van desde 0.5 hasta más de 5 μm .

Tabla 2. Propiedades de Carburos Representativos Cementados con Cobalto^[15] .

Composición Nominal	Tamaño de grano	Dureza	Densidad		Resistencia Transversal		Resistencia a la Compresión		Módulo de Elasticidad		Resisten. Abrasión Relativa (a)	Coef. Expansión Térmica a:		Conduct. Térmica (W/m.K)
			g/cm ³	oz/in ³	MPa	KSi	MPa	KSi	GPa	10 ⁶ psi		200 °C (390°F)	1000 °C (1830°F)	
97WC-3Co	Medio	92.5-93.2	15.3	8.85	1590	230	5860	850	641	93	100	4.0	.....	121
94WC-6Co	Fino	92.5-93.1	15.0	8.67	1790	260	5930	860	614	89	100	4.3	5.9	....
	Medio	91.7-92.2	15.0	8.67	2000	290	5450	790	648	94	58	4.3	5.4	100
	Grueso	90.5-91.5	15.0	8.67	2210	320	5170	750	641	93	25	4.3	5.6	121
90WC-10Co	Fino	90.7-91.3	14.6	8.44	3100	450	5170	750	620	90	22	....	....	....
	Grueso	87.4-88.2	14.5	8.38	2760	400	4000	580	552	80	7	5.2	....	112
84WC-16Co	Fino	89	13.9	8.04	3380	490	4070	590	524	76	5	....	....	....
	Grueso	86-87.5	13.9	8.04	2900	420	3860	560	524	76	5	5.8	7.0	88
75WC-25Co	Medio	83-85	13.0	7.52	2550	370	3100	450	483	70	3	6.3	....	71
71WC-12.5TiC-12TaC-4.5Co	Medio	92.1-92.8	12.0	6.94	1380	200	5790	840	565	82	11	5.2	6.5	35
72WC-8TiC-11.5TaC-8.5Co	Medio	90.7-91.5	12.6	7.29	1720	250	5170	750	558	81	13	5.8	6.8	50

(a) basado en un valor de 100 para la mayoría de los materiales resistente a la abrasión

La microestructura ideal de las aleaciones WC- Co debería exhibir solo dos fases: grano WC angular y la fase de pegado con cobalto. El contenido de carbono debe ser

controlado dentro de los estrictos límites, demasiado contenido de carbono resulta en la presencia de grafito libre y dividido finamente, la presencia de este último en pequeñas cantidades no tiene efectos adversos en las aplicaciones de maquinado; sin embargo la deficiencia de carbono resulta en la formación de una serie de carburos dobles, ($\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$ ó $\text{Co}_6\text{W}_6\text{C}$, por ejemplo), comúnmente conocido como fase η , la cual causa severa fragilidad. Como consecuencia, la formación de la fase η implica la disolución de los carburos originales dentro del cobalto pegador, la fase η aparece como una fase formada irregularmente en la microestructura.

1.3.2.2- ALEACIONES DE CARBURO DE TUNGSTENO – COBALTO CON TAMAÑO DE GRANO SUBMICRÓNICO.

En años recientes, las aleaciones de WC- Co con carburos de tamaño de grano submicrónico han sido desarrollados para aplicaciones que requieran más dureza o resistencia en los bordes. Las aplicaciones típicas incluyen insertos, cuñas o piezas removibles y una amplia variedad de carburos sólidos para perforación y herramientas de trituración. El refinamiento de grano en estas aleaciones es obtenido por aportes pequeños de carburo de tantalio (0.25 a 3% de peso), carburo de niobio, carburo de vanadio, carburo de cromo, estas adiciones pueden ser hechas antes de la carburización del tungsteno o después en fusión del polvo. El carburo de vanadio es el más efectivo inhibidor del crecimiento de grano. El carburo de cromo, además de ser un excelente inhibidor del crecimiento del grano, proporciona excelentes propiedades mecánicas. El carburo de tantalio no es tan efectivo como el carburo de vanadio o el carburo de cromo para el refinamiento del grano.

1.3.2.3- ALEACIONES COMPUESTAS DE CARBURO DE TUNGSTENO-CARBURO DE TITANIO- COBALTO.

Las aleaciones de WC- Co desarrolladas en los años veinte, fueron exitosas en el maquinado de aleaciones no ferrosas y fundiciones de hierro a velocidades mucho más elevadas de las que fueron posibles con herramientas de aceros rápidos; pero fueron

sometidas a ataque químico y/o desgaste por difusión cuando se usan en herramientas de aceros para corte. En consecuencia, las herramientas fallaron rápidamente a velocidades no tan elevadas comparadas con aquellas usadas con aceros rápidos. Esto condujo al desarrollo de aleaciones de WC- TiC- Co.

El carburo de tungsteno se difunde sin dificultad dentro de la superficie quebradiza del acero, pero la solución sólida de carburo de tungsteno y carburo de titanio resiste este tipo de ataque químico. Desafortunadamente, las soluciones de carburo de titanio y WC-TiC son más frágiles y menos resistentes a la abrasión que el carburo de tungsteno. La cantidad de carburo de titanio añadido a la aleación de WC- Co es entonces mantenido al mínimo, regularmente no mayor de un 15% de peso. El contenido de carbono es menos crítico en las aleaciones de WC- Ti- Co que en las aleaciones de WC- Co, y la fase η no aparece en la microestructura a menos que el carbono sea exageradamente inadecuado. Además, el grafito libre pocas veces se presenta en estas aleaciones.

1.3.3- CLASIFICACIÓN DE LOS CARBUROS CEMENTADOS.

A continuación se muestra los sistemas de clasificación de los carburos cementados, cada sistema tiene sus fortalezas y debilidades inherentes para la descripción de materiales específicos, que hace que exista una cercana relación entre usuario y fabricante, para hacer una mejor selección del grado apropiado para cada aplicación.

1.3.3.1- SISTEMA DE CLASIFICACIÓN GRADO C.

La industria de carburos en USA, emplea un sistema de clasificación orientado a ayudar en la selección de los grados apropiados de los carburos cementados. Este sistema grado C, no requiere el uso de marca comercial para identificar los grados de carburos específicos (ver tabla 3). Aunque esta clasificación simplifica la aplicación según la herramienta, no se reflejan las propiedades del material que significativamente influyen en la selección del carburo de grado adecuado. Adicionalmente, las definiciones de materiales de trabajo incluidas en este esquema de clasificación no son precisas. No hay

tampoco un acuerdo sobre los significados de los términos usados para describir las varias categorías de aplicación. A pesar de las limitaciones, la clasificación de grado C ha sido exitosamente empleada por la industria fabricante desde 1942.

Tabla 3. Clasificación de los carburos cementados grado c^[15].

GRADO C	CATEGORIA DE APLICACIÓN
MAQUINADO DE FUNDICIONES DE HIERRO, NO FERROSAS Y MATERIALES NO METALICOS	
C- 1	Superficie sin acabado, rústica.
C- 2	Superficie maquinada de propósito general.
C- 3	Superficie con acabado final.
C- 4	Superficie con acabado de precisión.
MAQUINADO DE ACEROS AL CARBONO Y MATERIALES ALEADOS	
C- 5	Superficie sin acabado, rústica.
C- 6	Superficie maquinada de propósito general.
C- 7	Superficie con acabado final.
C- 8	Superficie con acabado de precisión.
APLICACIONES DE NO MAQUINADO	
C- 9	Superficie resistente a desgaste, sin impacto.
C- 10	Superficie resistente a desgaste, bajo impacto.
C- 11	Superficie resistente a desgaste, alto impacto.
C- 12	Bajo impacto.
C- 13	Moderado impacto.
C- 14	Alto impacto.

1.3.3.2- SISTEMA CLASIFICACIÓN ISO.

En 1964, la Organización Internacional de Estandarización (ISO), estableció las bases de la clasificación de carburos en la recomendación R513, “Aplicación de carburos para maquinado por piezas removibles”.

1.3.4- PROPIEDADES DE LOS CARBUROS CEMENTADOS.

La evaluación de las propiedades físicas y mecánicas de los materiales para herramientas es un prerrequisito importante de la selección de los grados para la aplicación dada, tanto para el corte del metal como para el desarrollo de materiales de herramientas.

1.3.4.1- FATIGA TÉRMICA.

Algunas veces las herramientas de carburos cementados exhiben una serie de grietas perpendiculares al borde de la herramienta cuando estas son usadas en aplicaciones de corte interrumpidas como el fresado; estas fisuras térmicas son causadas por la expansión y contracción alternante en la superficie de la herramienta, como es la zona calentada durante el corte y enfriada fuera del corte. Las grietas se inician sobre la cara posterior, y entonces se expanden desde el extremo hasta debajo del cuerpo de la herramienta, con un corte intermitente y prolongado. Las fisuras laterales aparecen paralelas y cercanas a la zona de borde para corte, las grietas laterales y térmicas pueden unirse y causar pequeños fragmentos de material de la herramienta desprendidos. La resistencia de las herramientas de WC- Co a la fatiga térmica pueden ser generalmente mejoradas agregando TaC.

1.3.4.2- DUREZA.

Determina la resistencia del material a la abrasión y al desgaste. Esta está afectada no solo por la composición sino también por el nivel de porosidad y la microestructura.

Para aleaciones WC- Co con tamaño de grano comparable al WC, la dureza y la resistencia a la abrasión disminuyen con el incremento del contenido de cobalto. Sin embargo, tanto la composición como la microestructura afectan el comportamiento a la dureza, el contenido de cobalto y el tamaño de grano deben ser considerados. A un nivel de cobalto dado, la dureza mejora con el decrecimiento del tamaño de grano del WC.

1.3.4.3- DENSIDAD.

Para carburos cementados este parámetro es muy sensible a la composición y a la porosidad en la muestra, y es ampliamente usada como un criterio para pruebas de control de calidad. Los valores de densidad de los carburos cementados tienen un intervalo desde 15 g/cm^3 para las aleaciones WC- Co de bajo cobalto, hasta valores de 10 ó 12 g/cm^3 para los grados de carburos altamente aleados.

1.3.4.4- POROSIDAD.

Las propiedades de los carburos cementados son dependientes de su densidad, y esto a su vez es dependiente de la composición y la porosidad. La porosidad es evaluada sobre materiales previamente pulidos. La Sociedad Americana para Ensayos y Materiales (ASTM, siglas en inglés) ha establecido un procedimiento estándar (B276) que estima tres tipos de porosidad:

- Tipo A: cubriendo diámetros de poro menor que $10\mu\text{m}$.
- Tipo B: cubriendo diámetros de poro entre 10 y $25\mu\text{m}$.
- Tipo C: cubriendo la porosidad desarrollada por la presencia de un carbono libre.

La porosidad del tipo A es estimada en un aumento de $200X$, mientras los tipos B y C son estimadas en un aumento de $100X$. El grado de porosidad es dado por cuatro números dentro de un intervalo de entre 02 y 08 . El número provee una medida del volumen de poros como un porcentaje total de la muestra.

1.3.4.5- RESISTENCIA AL CHOQUE TÉRMICO.

Esta es una importante propiedad que determina el funcionamiento de la herramienta en el fresado o maquinado. Se ha sugerido los parámetros empíricos que pueden ser usados

para evaluar los materiales para herramientas, para su resistencia probable al choque térmico. Un parámetro comúnmente usado es el $(\sigma K/E\alpha)$.

Donde:

σ : es la resistencia a la rotura transversal.

K: es la conductividad térmica.

E: es el modulo de Young.

α : es el coeficiente de expansión térmica.

La tabla 4 indica una lista de valores representativos para algunas aleaciones de WC- Co. En general, el valor más alto de $(\sigma K/E\alpha)$ expresa la mejor resistencia al choque térmico.

Tabla 4. Valores Representativos de algunas aleaciones de WC- Co^[15].

COMPOSICIÓN, % PESO	TAMAÑO DE GRANO WC	RESISTENCIA A LA RUPTURA TRANSVERSAL (MPa)	CONDUCTIVIDAD TERMICA (W/M*k)	MODULO DE YOUNG (GPa)	COEFICIENTE DE EXPANSIÓN TÉRMICA ($\mu\text{m}/\text{m}^*\text{k}$)	RESISTENCIA AL CHOQUE TÉRMICO (kW/m)
97WC- 3Co	MEDIO	1590	121	641	5.0	60
94WC- 6Co	MEDIO	2000	100	648	5.4	57
90WC-10Co	FINO	3100	80	620	6.0	67

1.4- TERMOROCIADO.

1.4.1- DEFINICIÓN^[5].

La invención del primer proceso termorociado es generalmente atribuido a Schoop, Suiza en 1911 y es ahora conocido como el rociado por llama. Otros procesos importantes de termorociado incluido el rociado con alambre, la deposición con pistola detonante (inventado por Poorman, Lamprey, Sargent y patentado en 1955), el rociado

con equipo de plasma (inventado por Gage, Néstor y Yen y patentado en 1962), y el termorociado de alta energía a alta velocidad (inventado por Smith, Pelton y Eschenbach y patentado en 1958).

El termorociado es un término genérico para definir un grupo de procesos en el cual metales, cerámicos, carburos y algunos polímeros son semi – fundidos dentro de un nivel plástico como consecuencia de la energía térmica suministrada. Con la ayuda de un gas comprimido las partículas semi – fundidas son aceleradas y proyectadas en forma de rocío sobre la superficie de trabajo previamente preparada, en la cual las partículas golpean, aplastándose en las irregularidades de la superficie, para formar el recubrimiento. El espesor total del recubrimiento es usualmente generado por múltiples pases de la pieza recubierta.

Una variante del rociado con plasma usa un arco eléctrico transferido para calentar la superficie que va a ser recubierta. Algunos consideran que para ser un proceso parecido al de soldadura es difícil emplearlo, porque la superficie del substrato está momentáneamente fundida inmediatamente debajo de la punta de la boquilla. Virtualmente cualquier material que se funda sin descomponerse puede ser utilizado.

Una desventaja importante es por su naturaleza, la línea de proyección de estos procesos de deposición. Ellos solo pueden cubrir lo que la boquilla puede ver. Por supuesto existen también limitaciones de tamaño, hay restricciones para cubrir piezas pequeñas, cavidades profundas dentro de las cuales una boquilla o pistola no se pueden adaptar.

El mecanismo de unión de las partículas no está bien entendido, pero se piensa que puede ser debido a los mecanismos de adhesión, solidificación y encogimiento de las partículas, con las rugosidades y asperezas sobre la superficie que está siendo recubierta a menos que una fusión suplementaria o tratamiento térmico de difusión sea usado. En realidad, la mayoría de los recubrimientos termorociados requieren una superficie de substrato rugosa para una adecuada adhesión. Algo de ínter difusión o fusión localizada de pre- deposición del recubrimiento con el substrato ha sido observado con

combinaciones únicas de recubrimientos y sustratos. Hay evidencia de adhesión química en algunos sistemas recubrimiento/ sustrato, aún cuando el impacto de las partículas a alta velocidad podría conducir a la ruptura de algunas películas sobre las partículas del polvo como del sustrato. Las fuerzas de Van Der Waals también pueden jugar un papel si el sustrato es extremadamente limpio y si no ocurre oxidación durante la deposición.

El proceso de deposición por sí mismo, puede alterar sustancialmente la composición así como la estructura del material. En consecuencia la microestructura y propiedades de los recubrimientos puede ser muy variada. Las especificaciones de un recubrimiento, por tanto deben incluir más que una simple indicación de la composición del polvo o alambre inicial y el tipo de proceso que va a ser utilizado.

En la tabla 5 se muestran comparaciones entre el proceso de termorociado y otros procesos.

Tabla 5. Comparación de algunos procesos^[5].

PROCESO	MATERIALES	ADHERENCIA	VELOCIDAD(m/s)	DILUCIÓN	TEMPERATURA
Llama	Metálicos,cerámicos	Mecánica	50 - 100	Ninguna	3500 °C
Arco Doble	Metálicos	Mecánica	50 - 100	Ninguna	Arco Eléctrico
H.V.O.F	Metálicos	Mecánica	500 - 1200	Ninguna	5500 °C
Plasma	Metálicos,cerámicos	Mecánica	300 - 1000	Ninguna	15000 °C
Rociado y Fundido	Metálicos	Metalúrgica	-	Débil	3500 °C
Arco Rápido	Metálicos	Metalúrgica	-	Moderada	Arco Eléctrico
Cordón de Soldadura	Metálicos	Metalúrgica	-	Ninguna	Arco Eléctrico
Arco Transferido por Plasma	Metálicos	Metalúrgica	-	Moderada	Arco Eléctrico
MIG	Metálicos	Metalúrgica	-	Fuerte	Arco Eléctrico

1.4.2- VENTAJAS DE LOS RECUBRIMIENTOS TERMOROCIADOS SUMINISTRADAS POR LA EMPRESA PLASMATEC INGENIEROS C.A.

- Muy amplia selección de los recubrimientos.

- Durezas controlables desde recubrimientos muy blandos hasta muy duros.
- Es un proceso de deposición “frío” ya que la pieza base no supera los 250°C durante el recubrimiento. No existen por lo tanto problemas de deformación, esfuerzos residuales y cambios metalúrgicos que pueden llevar a la rotura de la pieza por fragilización como es el caso de otros recubrimientos (soldadura).
- Pueden ser aplicados recubrimientos de espesores mínimos de (0,05 mm) hasta recubrimientos muy gruesos (5 mm). El acero inoxidable por arco rociado puede ser aplicado hasta (25mm) de espesor.
- Pueden, cuando la necesidad lo requiera, realizarse recubrimientos en el sitio, por ejemplo, se pueden recubrir tanques de aluminio o zinc para protección anticorrosiva, sin tener que hacer un desarme del elemento para su traslado.

1.4.3- MATERIALES QUE PUEDEN SER DEPOSITADOS MEDIANTE PROCESOS DE TERMOROCIADO^[16].

- Cerámicos: Cr₂O₃ , Al₂O₃ , ZrO₂ , TiO₂ , SiO₂ .
- Compuestos: WC – Co , WC – CoCr , WC – Ni , Cr₃C₂ , NiCr .
- Metales puros: Al , Zn , Ni , Cu .
- Aleaciones : aceros inoxidables, Inconel, Bronces.
- Aleaciones metálicas refractarias: Mo & Ta ,base.
- Metales preciosos: aleaciones de plata.
- Semi – conductores: óxido de Titanio.
- Lubricantes sólidos: base grafito, nitrato de boro.
- Súper aleaciones: base de cobalto, Ni &Fe.

1.5- TERMOROCIADO DE ALTA VELOCIDAD (H.V.O.F).

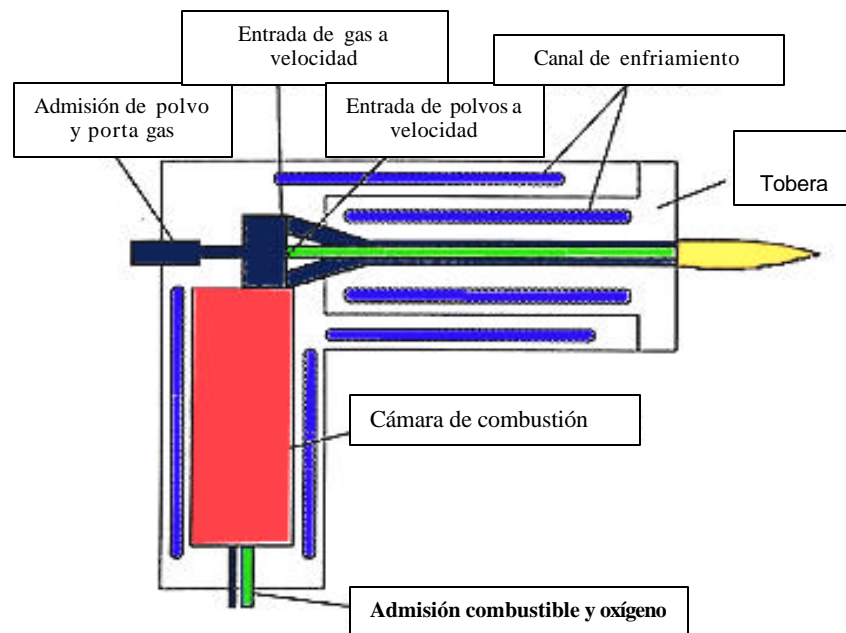
1.5.1.- DEFINICIÓN.

Este es un proceso de termorociado de hipervelocidad, donde se combinan fusión e impacto sobre un substrato previamente preparado.

Como consecuencia de la continua alimentación de los gases como del polvo, hay un incremento en la presión en la cámara; usualmente se usa como combustible: propano, propileno, o Hidrógeno. El combustible es mezclado con oxígeno y quemado dentro de la cámara. En otros casos Kerosén líquido puede ser utilizado como combustible y el aire como fuente oxidante. Hay pocos sistemas HVOF que usan acetileno como combustible y son necesarios para aplicarse a cerámicos con los más altos puntos de fusión tales como el zirconio o algunos carburos; los productos de la combustión se expanden a través de una tobera convergente- divergente lo que genera un aumento en la velocidad de la partícula (que pueden llegar a ser supersónicas), ya que transforma energía de presión en energía cinética ($1/2*m*v^2$).

En la figura 1 se muestra las partes elementales de una pistola de termorociado; así mismo en la foto 1, se muestra la pistola utilizada en este trabajo.

Fig.1 ESQUEMA ELEMENTAL DE LA PISTOLA DE TERMOROCIADO POR HVOF.



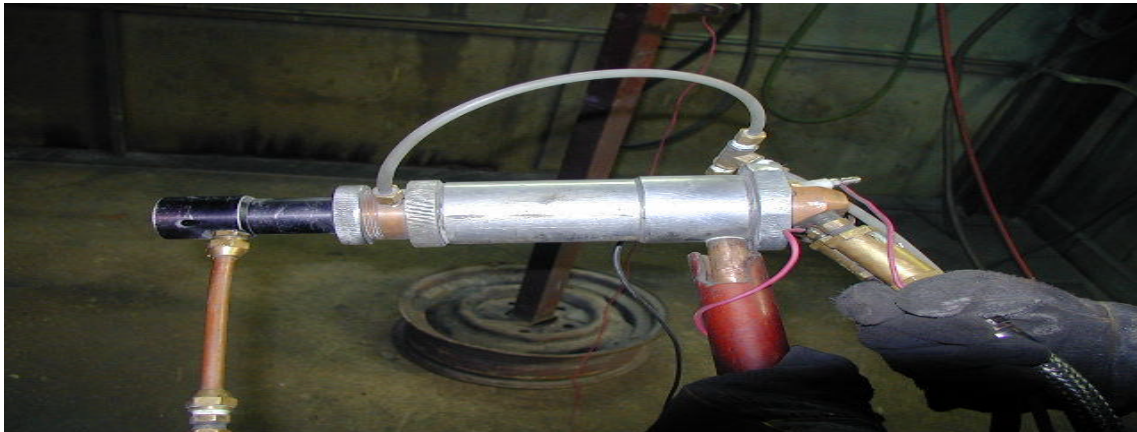


Foto 1. Pistola de termorociado por HVOF modelo Tafa JP 5000.

1.5.2- APLICACIONES Y CARACTERÍSTICAS.

Las aplicaciones del HVOF se enfocan en la industria aeroespacial; árboles o rodets de bombas y compresores, válvulas, rollos de impresión en la industria de impresión de papel, molinos para la preparación de pulpa y principalmente para disminuir el desgaste corrosivo en la industria química.

En la mayoría de los casos, los recubrimientos realizados por HVOF ofrecen mejoras en la calidad por encima de las ofrecidas por plasma o llama. La calidad del recubrimiento es superior principalmente por las altas velocidades alcanzadas por las partículas.

La velocidad de la partícula es un factor de gran importancia en el proceso de termorociado. El HVOF, produce velocidades de partícula mucho más altas que los demás procesos, estas velocidades oscilan entre los 1370 m/s y 2930 m/s, con velocidades de partícula de polvo entre 480 m/s y 1020 m/s, es de notar que estas velocidades pueden llegar a ser tres veces superior que la velocidad del sonido (360 m/s). Las temperaturas de gas en la recámara de reacción de HVOF están típicamente entre 1650 °C y 2760 °C, dependiendo del combustible y la relación estequiométrica usada en la combustión. Sin embargo para cada material, debe ajustarse la longitud de la boquilla debido a las pérdidas de calor (producto del refrigerante que generalmente es agua), lo cual reduce su eficacia calorífica. El calentamiento excesivo y/o fusión de la

partícula dentro de la boquilla pueden llevar a la deposición indeseable en las paredes de la misma; este fenómeno se conoce como “plugging” que produce una inestabilidad en el flujo de gas por estas deposiciones.

Los beneficios de este proceso son principalmente atribuidos a las velocidades de partícula, y a otros factores entre los que podemos nombrar (suministradas por la empresa Plasmatec Ingenieros C.A):

- Energía cinética más alta en el impacto.
- Tiempo de exposición más corto.
- Atmósfera menos oxidante.
- Calentamiento de la partícula más uniforme y eficiente.
- Densidad más alta (porosidad más baja) porque la energía de impacto es más alta debido a las velocidades alcanzadas por las partículas.
- Generación de una barrera anticorrosiva a través de la baja porosidad.
- Mayor dureza, debido a una menor degradación y una mejor fuerza de adhesión.
- Mejor resistencia al desgaste debido a una mayor dureza en el revestimiento.
- Mejor unión entre las partículas, lo que genera una mayor fuerza cohesiva.
- Volumen del óxido menor, debido a un menor tiempo de exposición con el aire.
- Mayor volumen de las partículas fundidas debido a un mejor calentamiento de estas.
- Mayor retención de las propiedades químicas del polvo y sus fases debido al corto tiempo de exposición a altas temperaturas.
- Capas más espesas (por paso y total) a través del mejoramiento en las tensiones residuales (disminución de éstas).
- Superficies más lisas debido a una energía de impacto más alta.

1.5.3- ASUNTOS DE SALUD, SEGURIDAD Y AMBIENTE^[5] .

Hay algunos asuntos de salud , seguridad y ambiente asociados con los procesos de termorociado. En general, estas consideraciones se parecen a aquellas asociadas con los

procesos de soldadura. Obviamente, toda planta o laboratorio, debería seguir las normas y regulaciones. Ningún proceso de termorociado debería ser efectuado sin un adecuado entrenamiento de todo el personal involucrado y hay que considerar las medidas de precaución y cuidado ante cualquier peligro asociado con los materiales particulares a ser usados para preparar o producir el recubrimiento.

Un adecuado cuidado y mantenimiento del equipo, incluyendo todas las líneas y conexiones eléctricas y gas, contribuirá a reducir cualquier riesgo. Además es recomendable que el diseño y las revisiones de los procedimientos de seguridad sea efectuada por ingenieros calificados. Estas deberían incluir los procesos relativos a la preparación de la superficie, manejo de las piezas, acabado y terminado de los productos así como el proceso de recubrimiento en si mismo.

1.5.3.1- EMISIONES DE GAS Y POLVOS.

En todo proceso de termorociado se producen polvos y gases, así que los operadores deben estar protegidos, y los polvos y gases deben ser controlados y extraídos. En la medida de lo posible, el proceso de recubrimiento debería ser llevado a cabo en una cámara o cubículo equipado con ventilación y colectores de polvo y con operadores afuera. Cada proceso de termorociado tiene sus propios requerimientos de flujo de aire para proveer una adecuada ventilación, y el fabricante del equipo debería ser capaz de ofrecer asistencia técnica. Sin embargo, monitores del nivel de emisiones deberían ser periódicamente usados para asegurar que el sistema de ventilación está trabajando adecuadamente. Si los operadores deben estar dentro del cubículo o el recubrimiento debe ser realizado en la entrada, el operador debería ponerse máscara respiratoria.

Hasta cierto punto se considera adecuado la máscara para contar con un flujo de aire liberado solo para el operador y así brindarle una adecuada protección. El tipo de respirador usado depende del material a ser depositado. Las descargas desde el colector de polvo deberían ser periódicamente evaluadas para asegurar el cumplimiento con todas las regulaciones.

1.5.3.2- EL RUIDO.

Los ruidos generados por los procesos de termorociado tienen diferentes niveles:

- Para algunos procesos de rociado por llama el nivel es cerca de 80 dB(decibeles).
- Para algunos procesos de termorociado de HVOF el nivel es por encima de 120 dB(decibeles).
- Para algunos procesos de rociado por plasma el nivel es por encima de 140 dB(decibeles).
- Para algunos procesos de detonación por pistola el nivel es por encima de 150 dB(decibeles).

La protección del oído es adecuada para los primeros procesos, pero para el último proceso mencionado este debe ser operado dentro de una cámara reductora de sonido.

Los niveles de sonido en la posición donde se localiza el operador debería ser medido y estar en concordancia con todas las regulaciones, asegurando además que todo el personal en el recinto de la operación de rociado deberían tener sus evaluaciones auditivas periódicamente.

1.5.3.3.- LA RADIACIÓN LUMINOSA.

El espectro de luz emitido por los dispositivos de termo rociado tienen un ámbito que va desde el nivel infrarrojo hasta el extremo ultravioleta. Los lentes adecuados y protección para la piel deben ser usados. Lentes con nivel de sombra 5 puede ser suficiente para algunos procesos de llama, pero un lente de nivel 12 es requerido para rociado por plasma y arco eléctrico. Los uniformes con telas bien tejidas y no inflamables deberían ser usados para proteger la piel contra las quemaduras. Estas últimas pueden ser causadas por las partículas calientes que salpican desde el substrato, los gases calientes, o la luz. La radiación ultravioleta puede quemar la piel expuesta y puede penetrar telas de tejidos ligeros causando quemaduras similares a las quemaduras solares en minutos.

1.6- FATIGA.

1.6.1- INTRODUCCIÓN^[8].

Con el objeto de obtener las propiedades de materiales relacionados con el diagrama esfuerzo-deformación, se aplica la carga en forma gradual de tal forma que se desarrolle la deformación, la probeta se ensaya hasta que se destruye, de manera que los esfuerzos son aplicados una sola vez; estas condiciones son conocidas como condiciones estáticas. En el caso de materiales con fallas estáticas, generalmente las piezas mecánicas sufren una deformación muy grande, y la pieza debe ser sustituida antes que ocurra la ruptura; esto las hace visibles y se detectan con anticipación, previniendo daños mayores.

Sin embargo, frecuentemente los esfuerzos varían o fluctúan entre determinados valores. Por ejemplo, un eje rotatorio, sometido a la acción de cargas de flexión, pasa por esfuerzos de tensión y compresión en cada revolución del eje. Si el eje también está cargado axialmente, habrá una componente axial de esfuerzo que se superpondrá a la componente de flexión, esto ocasionará un esfuerzo que seguirá siendo fluctuante pero que oscilará entre valores diferentes. Estas y otras clases de cargas que ocurren en elementos de máquinas producen esfuerzos que se llaman repetidos, alternantes o fluctuantes.

En muchos casos hay que analizar elementos de máquina que han fallado bajo estas características, con la particularidad que los esfuerzos se repitieron muchas veces, estas son llamadas fallas dinámicas.

Las fallas por fatiga (dinámicas) comienzan con una pequeña grieta y son tan diminutas que no pueden ser percibidas a simple vista y son difíciles de localizar, ya que no dan señal alguna, y la pieza o componente mecánico se dañará completamente, pudiendo esto ocasionar un accidente.

Por esta razón, a la hora del diseño de equipos o piezas mecánicas, no es solo importante el conocimiento del comportamiento estático de los materiales, sino que es de vital

importancia el conocimiento sobre fallas por fatiga, para poder diseñar elementos que resistan con seguridad a las condiciones a las cuales será sometido, ya que, a pesar de que el diseñador pueda duplicar o triplicar los factores de seguridad, el diseño no será confiable ni competitivo.

1.6.2- DEFINICIÓN.

Un material sujeto a tensiones repetidas o fluctuantes fallará a una tensión mucho más baja que la necesaria para producir la fractura en una sola aplicación de la carga, dichos esfuerzos son menores al valor del esfuerzo de fluencia del material. Las fallas ocurridas en condiciones de cargas dinámicas se llaman fallas de fatiga^[6].

La característica más notable de los fallos por fatiga es la falta de deformación en la región de la fractura, este es uno de los peligros de las fallas por fatiga, ya que no muestran ningún indicio previo de fallo inminente que permita evitar la fractura total del material, como en el caso de las fallas producidas por esfuerzos estáticos donde se observa deformación plástica de la pieza^[7].

Esta falla crece en forma de grieta muy pequeña, a partir de cierta discontinuidad en el material, como por ejemplo, un cambio en la sección transversal, un cuñero o chavetero, o un orificio, y a cada fluctuación va creciendo y propagándose hasta un punto en que la sección remanente es muy pequeña y no puede soportar la carga, produciendo la fractura del material por sobreesfuerzo.

1.6.3- COMPORTAMIENTO A LA FATIGA DEL ACERO^[7].

El comportamiento a la fatiga de un acero difiere en muchos aspectos de otros metales.

Uno de estos aspectos, es que presenta un límite a la fatiga definido; su resistencia a la fatiga puede aumentarse apreciablemente sometiendo el metal a esfuerzos débiles seguidos de un aumento progresivo de la intensidad del esfuerzo alternativo y que la

resistencia a la fatiga aumente con la elevación de la temperatura por encima de unos 100 °C, alcanzando un valor máximo entre 200 y 400 °C.

El envejecimiento por deformación es un proceso que se encuentra asociado normalmente con la sollicitación estática. Sí en un ensayo de tracción estático con un acero suave, la sollicitación se retira después que la probeta haya deformado y luego inmediatamente se vuelve a aplicar se obtiene una curva suave sin un límite elástico aparente. Sí, por otra parte, se deja la probeta envejecer o descansar, después de someterla a una sollicitación inicial por varios días a temperatura ambiente o durante menos tiempo a temperaturas más elevadas, el límite elástico aparente vuelve a aparecer a un esfuerzo mayor, límite elástico aparente inicial; la resistencia a la tracción aumenta también por envejecimiento. Este comportamiento se atribuye, a la presencia de átomos de carbono y nitrógeno en la red del hierro.

El deslizamiento se considera, que tiene lugar, por el movimiento de las dislocaciones y está demostrado que los átomos de carbono y de nitrógeno se congregan en las dislocaciones, impidiendo así su movimiento y aumentando el esfuerzo requerido para empezar el deslizamiento. Sin embargo, una vez que las dislocaciones han sido separadas de los átomos de carbono y de nitrógeno, una fuerza menor es suficiente para mantenerlas en movimiento y esto explica el comportamiento a la deformación. Sí al metal se le deja descansar, los átomos de carbono y de nitrógeno gradualmente se difunden en las dislocaciones y el límite elástico, es aparentemente restaurado.

Las velocidades de difusión de los átomos de carbono y de nitrógeno en el hierro dependen notablemente de la temperatura, de forma que el proceso de consolidación tiene lugar más rápidamente a medida que la temperatura se eleva.

Esto puede explicar el aumento de la resistencia a la fatiga cuando aumenta la temperatura y la resistencia máxima probablemente tiene lugar a la temperatura en donde los átomos de carbono y de nitrógeno son capaces de difundir a las dislocaciones en un ciclo de esfuerzo.

1.6.4- MECANISMO DE FORMACIÓN DE LA GRIETA.

Se ha comprobado que un metal se deforma en condiciones cíclicas por deslizamiento sobre los mismos planos atómicos y en las mismas direcciones cristalográficas que cuando la deformación es monodireccional. Mientras el deslizamiento de la deformación monodireccional suele extenderse a través de todos los granos, en la fatiga hay algunos granos que muestran líneas de deslizamiento y otros en los que no puede comprobarse el deslizamiento. Se han observado bandas de deslizamiento a tensiones inferiores al límite de fatiga en los materiales féreos, por lo que la aparición de deslizamiento durante la fatiga no puede considerarse por si misma como indicio de que se formará una grieta.

Un aspecto estructural importante, que parece ser único de la deformación por fatiga, es la formación en la superficie de entrantes y salientes que se llaman extrusiones e intrusiones de bandas de deslizamiento y se ha demostrado que es aquí donde se inician las grietas de fatiga.

El proceso de formación de grietas se divide en tres etapas: la primera ocurre en los metales cuando el esfuerzo aplicado es menor al límite elástico estático (esfuerzo de fluencia); en esta etapa, se produce deformación masiva generalizada hasta que el material se endurece lo suficiente para resistir el esfuerzo aplicado. La segunda etapa abarca la mayor parte de la duración en fatiga de la probeta, se extiende desde el momento del endurecimiento por deformación generalizado, que comienza generalmente a los 10^4 ciclos hasta la formación de una grieta visible de fatiga. La tercera etapa es la propagación de la grieta de fatiga hasta alcanzar un tamaño suficiente para provocar la ruptura; debido a cada ciclo de esfuerzo la grieta va creciendo hasta que la sección remanente es insuficiente para soportar el esfuerzo y se produce la falla por sobreesfuerzo^[6].

El fenómeno de nucleación y propagación de la grieta tiene dos etapas: en la primera etapa la grieta se propaga inicialmente sobre las líneas de deslizamiento persistentes; en esta etapa la superficie de fractura prácticamente no presenta evidencia fractográfica en

un metal policristalino, la grieta se extiende sobre unos pocos granos hasta que alcanza la etapa dos de propagación, donde frecuentemente se presenta un patrón de ondulaciones o estriaciones de fatiga. Cada estriación representa la posición sucesiva del frente de avance de grieta lo cual es normal para grandes esfuerzos de tracción y es producida por cada ciclo de esfuerzo. Estas estriaciones son una señal inequívoca que la falla fue producida por fatiga, pero su ausencia no implica que la falla no se produjo por fatiga, esto debido al pequeño espaciamiento entre ellas que no puede ser resuelto por los métodos de observación utilizados; esto también puede ser producido por la falta de ductilidad en la punta de la grieta para producir una ondulación por deformación plástica o por la eliminación de las estriaciones debido a un daño en la superficie.

Como la etapa dos no ocurre en toda la vida a la fatiga, no es posible decir que contando todas las estriaciones se puede obtener toda la historia de ciclos a falla^[10].

1.6.5- CURVA S-N (CURVA DE WÖHLER)^[6].

1.6.5.1- SIGNIFICADO.

Para obtener el comportamiento a la fatiga de un material generalmente se ensaya un número de probetas a distintos niveles de esfuerzo y el número de ciclos requeridos para causar la falla, son la vida de cada probeta; la relación entre esfuerzo y número de ciclos es presentada como una curva llamada curva S-N o curva de Wöhler.

1.6.5.2- CARACTERÍSTICAS.

La forma de la curva difiere entre un material y otro; en la figura 2, se pueden observar dos tipos de curvas claramente definidas. En la primera curva se observa una zona que es horizontal y tiene un punto de inflexión, el cual es el valor del esfuerzo por debajo del cual no ocurre falla para cualquier tiempo de vida, esto se conoce como límite de fatiga. Para materiales que no presentan límite de fatiga, la curva se presenta sin cambios bruscos de comportamiento, como la segunda curva.

Ambos tipos de curvas representan la cantidad de ciclos que puede resistir un material sin que se produzca falla; para cada nivel de esfuerzo, el número de ciclos representa la vida o resistencia a la fatiga del material.

Para construir dicha curva, se requiere realizar ensayos a un número determinado de probetas y a un número determinado de niveles de esfuerzo y los valores son graficados en escala logarítmica. Los ensayos deben realizarse disminuyendo el valor de la carga, hasta el punto donde no se produzca falla, en cuyo caso, la curva debe construirse en dos partes: la primera referente a la resistencia a la fatiga, esto se hará usando el modelo de Basquin el cual permite linealizar los datos obtenidos y la segunda parte para determinar el límite a la fatiga a partir de cualquiera de los métodos existentes, como por ejemplo el método de la escalera, el cual es un método estadístico.

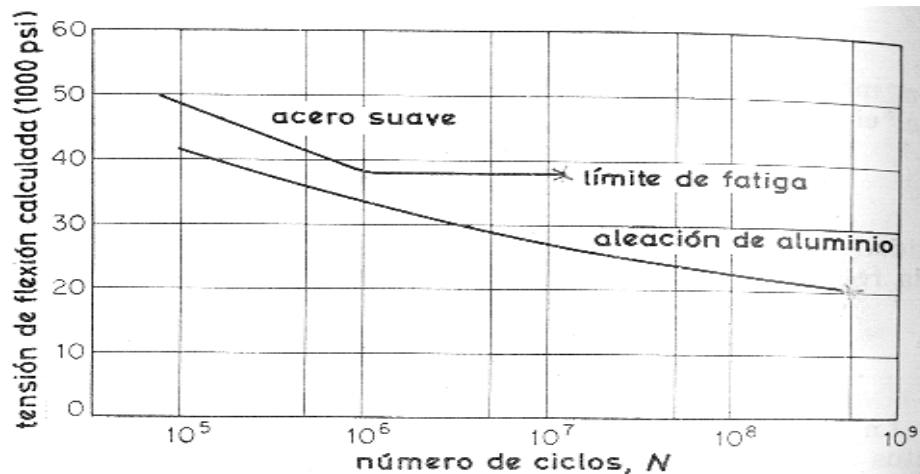


Figura 2. Curvas típicas de Fatiga (curvas de Wöhler) de metales féreos y no féreos^[6].

1.6.6- MODELO DE BASQUIN^[9].

Al construir las curvas S-N, donde S es la amplitud del esfuerzo y N el número de ciclos a falla, la curva muestra un límite de resistencia que debe ser eliminado para tener una mayor confiabilidad en el diseño; como este límite no existe en muchos aceros de alta ductilidad y metales no ferrosos como las aleaciones de aluminio, que son materiales de una alta aplicación, Basquin mostró que la curva S-N podía ser linealizada utilizando los

ejes coordinados en escala logarítmica, estableciendo de este modo la ley exponencial de la fatiga.

Sí, en lugar de los esfuerzos ingenieriles son usados los esfuerzos reales, la curva entera puede ser linealizada y la amplitud de esfuerzo puede ser descrita como la resistencia o vida a la fatiga por la siguiente relación:

$$S = S_f * (N_f)^b \quad \text{(Ec. 1)}$$

Donde:

S = esfuerzo de resistencia a la fatiga.

S_f = coeficiente de resistencia a la fatiga.

N_f = número de ciclos a falla.

b = exponente de resistencia a la fatiga o exponente de Basquin.

Los parámetros S_f y b son propiedades de fatiga del metal.

1.6.7- METODO DE LA ESCALERA^[6].

Si al ensayar una probeta a una carga determinada la probeta falla antes de un número determinado de ciclos, sabremos que el límite se encuentra en un punto por debajo del nivel de esfuerzo utilizado, por el contrario, si la probeta no falla en el número de ciclos establecidos, sabremos que el límite se encuentra en un punto por encima del esfuerzo al cual se está ensayando. Las probetas solo pueden ser ensayadas una vez, por consiguiente, es necesario la aplicación de métodos estadísticos para obtener la mejor aproximación al límite.

Uno de los métodos mas utilizados para analizar los datos referentes al límite de fatiga es el llamado método de la escalera o método ascendente y descendente. Este método consiste en ensayar una primera probeta al valor del límite de fatiga estimado; si esta probeta falla, el esfuerzo aplicado a la siguiente probeta se disminuirá en una cantidad

determinada o escalón; este procedimiento se repetirá hasta obtener una probeta que no falle a un número de ciclos determinado; al obtener esta probeta, se aumenta en un escalón el esfuerzo a aplicar en la próxima probeta. En este procedimiento, se aumentará un escalón cuando la probeta no falle y se disminuirá en un escalón cuando falle, utilizando para ello un número de probetas comprendido entre 10 y 20. Cabe destacar que este método se basa en el suceso menos frecuente, ya sea que las probetas fallen o no fallen y su expresión matemática es:

$$X = X_o + d * \left[\frac{A \pm 1}{N} \right] \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde:

X = Límite de fatiga estimado.

X_o = Nivel de esfuerzo más bajo para el cual ocurre el suceso menos frecuente.

d = Escalón de esfuerzo.

A = Producto entre el número de probetas del suceso menos frecuente y el nivel de esfuerzo al que ocurre este suceso.

N = Sumatoria del número de probetas del suceso menos frecuente.

1.6.8- FACTORES QUE AFECTAN LA FATIGA.

Existe una gran dispersión en los resultados obtenidos por los ensayos de fatiga, aún cuando el material es obtenido en un mismo lote o colada. Algunos de los factores que inciden en esta dispersión son: microestructura, concentración de esfuerzos, condición superficial de la pieza, temperatura, etc.;

1.6.8.1.- TEMPERATURA^[6].

El fallo por fatiga puede ocurrir a cualquier temperatura por debajo del punto de fusión. Las características de fracturas por fatiga, con pequeña o ninguna deformación, se presentan normalmente, en este margen de temperaturas. Los resultados indican que hay

una relación similar duración-esfuerzo para todas las temperaturas, pero a temperaturas elevadas pocas veces existe un límite de fatiga y la rampa ascendente de la curva S-N es más empinada que a temperatura ambiente.

En los ensayos de fatiga de metales a temperaturas bajas (por debajo de la temperatura ambiente) se muestra, que la resistencia a la fatiga aumenta más que la resistencia a la tracción, con la disminución de la temperatura, esto se ha atribuido a que el fallo por fatiga a temperatura ambiente está asociado con la formación y condensación de vacancias; sin embargo al aumentar la temperatura por encima de la temperatura ambiente, la resistencia a la fatiga de los metales disminuye; es en este nivel de temperatura, donde toma importancia la fluencia lenta (creep), y a temperaturas superiores a la temperatura de recristalización o a la mitad de la temperatura de fusión, esta llega a ser la causa principal de las fallas. El paso de la falla por fatiga a la falla por fluencia lenta, con un aumento de la temperatura, acarrea una variación del tipo de fractura, que pasa de intergranular, típica de la fluencia lenta, a falla transgranular, típica de la fatiga.

1.6.8.2.- SUPERFICIE.

Entre los aspectos que afectan la superficie de la probeta, podemos mencionar: la rugosidad de la superficie, la variación en la resistencia a fatiga de la superficie y las variaciones en el estado de esfuerzos residuales, que deben tomarse en cuenta puesto es en la superficie donde generalmente se inician las fallas por fatiga.

Es conocido que los diferentes acabados superficiales obtenidos por los distintos procedimientos de mecanizado, pueden afectar el comportamiento a la fatiga; se ha observado que las probetas menos pulidas muestran menor resistencia a la fatiga, esto es atribuido a que las rayas presentes en el material actúan como grandes concentradores de esfuerzo y por consiguiente como sitios preferenciales para la nucleación de grietas.

Cuando se estudia la influencia de la superficie en el comportamiento a la fatiga del material, se tiene que estudiar la variación de las propiedades superficiales del material,

ya que si un material como el acero, es sometido a tratamientos superficiales tales como cementación y nitruración, este puede mostrar cierta mejoría respecto a la resistencia a la fatiga; por el contrario, se produce una baja en las propiedades de fatiga de la superficie y por ende del material, cuando se somete a otros tratamientos como la deposición de algunos recubrimientos o sufre descarburación ^[6] .

Con respecto a los esfuerzos residuales, se sabe que la formación de un estado de esfuerzos de compresión mejora el comportamiento a la fatiga de los materiales, por el contrario cuando los esfuerzos residuales resultan de tracción se observa una disminución en la vida a la fatiga de los materiales.

Entre los esfuerzos residuales hay dos tipos: los microesfuerzos, que proceden de las diferencias en las propiedades elásticas y térmicas de los diversos constituyentes del material y de las propiedades anisotrópicas de los granos, y los macroesfuerzos. La influencia de un esfuerzo residual sobre la resistencia a la fatiga es similar a la de un esfuerzo estático aplicado desde el exterior, esto es para piezas sometidas a flexión; para piezas sometidas a torsión su influencia es menor ya que este estado de esfuerzo está menos afectado por un momento estático. Es difícil determinar el efecto de los esfuerzos residuales puesto que estos son difíciles de medir y pueden alterarse en magnitud como consecuencia de un esfuerzo posterior y en cierto modo porque cualquier método que se emplee para producir los esfuerzos residuales también afecta la resistencia a la fatiga intrínseca del material^[7] .

1.6.8.3.- CONCENTRACIONES DE ESFUERZO^[7] .

Ya se ha comentado el efecto perjudicial de los concentradores de esfuerzo, por ende es de importancia reducir y evitarlos en la zona que será sometida a esfuerzos fluctuantes.

Cualquier cambio brusco, como una entalla, estría o agujero, produce variación local en la distribución del esfuerzo elástico que depende de la reducción del área de la sección transversal en la discontinuidad y de la forma de ésta. Una medida de lo grave de una

concentración de esfuerzo viene dada por el factor K_t , que se define como la relación del esfuerzo local máximo en la región de la discontinuidad al esfuerzo local nominal, evaluado por la teoría simple. El esfuerzo nominal puede basarse bien en la sección transversal neta a través de la discontinuidad. Al presentar los efectos de la concentración de tensiones, el esfuerzo nominal se basa usualmente en la sección neta y se adopta este procedimiento a menos que se establezca otro. No siempre es posible expresar esto simplemente, así es que algunas veces es más conveniente usar el esfuerzo nominal basado en la sección bruta. El máximo esfuerzo local en la discontinuidad puede determinarse matemáticamente, por fotoelasticidad o por medida directa de la deformación; se supone que el material al que nos referimos es isotrópico y obedece a la ley Hooke.

Como la resistencia a la fatiga disminuye por las concentraciones de esfuerzos geométricos, la reducción es a menudo menor que el factor de concentración de esfuerzo geométrico; por lo tanto, se ha introducido un factor de reducción de la resistencia a la fatiga, K_f , que se define como la relación de la resistencia a la fatiga de una probeta sin concentración de esfuerzos, y la resistencia a la fatiga con concentración de esfuerzo; se ha encontrado que este factor varía con la severidad y el tipo de entalla, material, tipo de carga y nivel de esfuerzo.

Se da una medida del grado de concordancia entre K_f y K_t por medio del factor de sensibilidad a la entalla q , definido como:

$$q = \frac{K_f - 1}{K_t - 1} \quad (\text{Ec. 3})$$

El valor de q está comprendido entre 0 y 1. cuando $K_f = K_t$, $q = 1$ se dice que el material es completamente sensible a la entalla. Si la presencia de una entalla no afecta a la resistencia a la fatiga, $K_f = 1$ y $q = 0$ el material no es sensible a la entalla. Sin embargo, se ha encontrado que el valor de q no depende solo del material, sino también de las condiciones del esfuerzo, del tamaño de la probeta y de la resistencia a la fatiga de este, de esta forma q no puede considerarse como una constante del material.

1.6.8.4.- TAMAÑO DE LA PIEZA^[6] .

La experiencia ha demostrado que en la mayoría de los casos existe un efecto de tamaño; es decir, la resistencia a la fatiga de miembros grandes es más baja que la de probetas pequeñas. Es difícil sino imposible, preparar probetas geoméricamente semejantes, de diámetro creciente, que tengan la misma estructura metalúrgica y la misma distribución de esfuerzos residuales a través de toda la sección transversal.

Al cambiar el tamaño de la probeta de fatiga resultan afectados dos factores. Primero, al aumentar el diámetro aumenta el volumen y el área superficial de la probeta. La variación del área superficial es de importancia, puesto que generalmente las grietas de fatiga se inician en la superficie. En segundo lugar, en las probetas lisas o entalladas cargadas a flexión o torsión, decrece el gradiente de esfuerzos a través del diámetro y aumenta el volumen del material sometido a altos esfuerzos a medida que crece el diámetro.

El hecho de que las probetas grandes, en las que la zona de gradiente de esfuerzo es delgada, tengan un límite de fatiga más bajo, está de acuerdo con la idea de que para se produzca fallo es necesario que el esfuerzo exceda a un valor crítico sobre una profundidad límite del material, lo que es más realista que atribuir el efecto del tamaño solamente a las variaciones del diámetro y la relación de éste con el área superficial.

1.6.8.5.- ESFUERZO MEDIO^[6] .

La mayoría de los datos que se han obtenido sobre la fatiga han sido determinados en condiciones de ciclos de reversión completa, es decir, con esfuerzo medio igual a cero; sin embargo, es frecuente encontrarse situaciones en las que a un esfuerzo medio constante diferente de cero se superpone al esfuerzo alternante.

La figura 3 muestra dos formas comunes de representar estos datos. En la figura 3a, se grafica el esfuerzo máximo contra el logaritmo de los ciclos a falla; cada curva representa la resistencia a la fatiga para valores distintos de la relación de esfuerzos R.

Cuanto más positiva se hace R , equivalente a un aumento del esfuerzo medio, el límite de fatiga aumenta. La figura 3b, muestra los mismos datos representados como esfuerzo alterno en función del número de ciclos hasta la rotura, para esfuerzo medio constante.

Nótese que cuando el esfuerzo medio se hace más positivo, decrece el número de ciclos a falla.

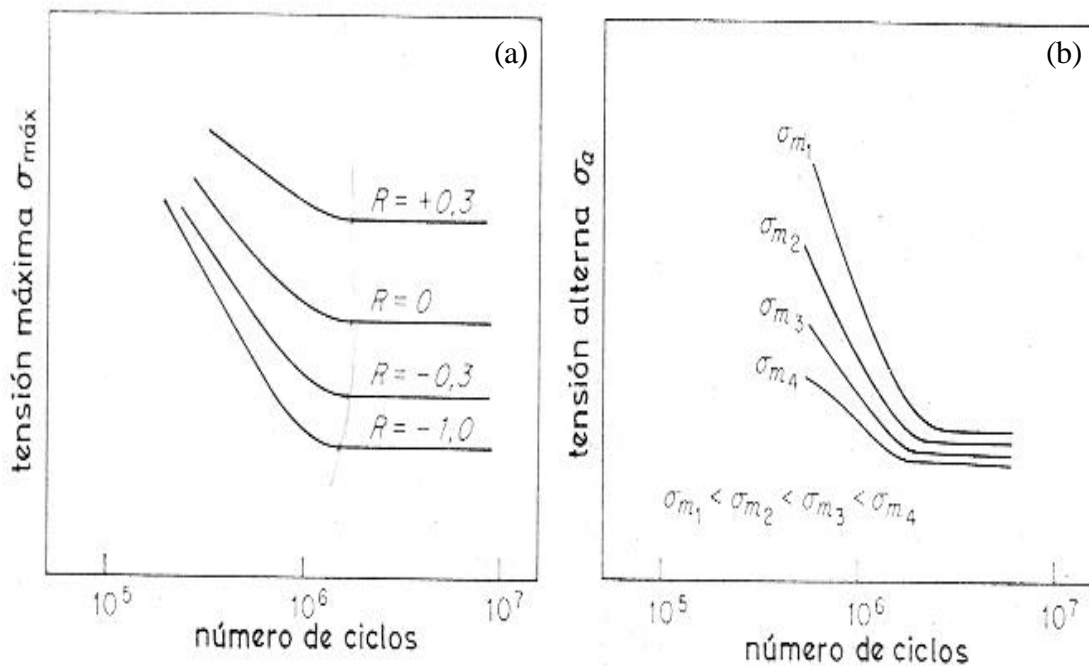


Figura 3. Dos métodos de representar los datos de fatiga para $R \neq 0$ ^[6].

La resistencia a la fatiga de un material bajo esfuerzos fluctuantes, que resulta de la superposición de un esfuerzo estático con uno alternante, se puede representar en un diagrama, en que el esfuerzo alternante (S_a) es la ordenada y el esfuerzo medio (S_m) es la abscisa como se muestra en la figura 4, conocida como el diagrama R- M. Para determinar esta curva experimentalmente, se necesita un gran número de curvas Wöhler, cada una para un valor constante de S_a , S_m , ó R .

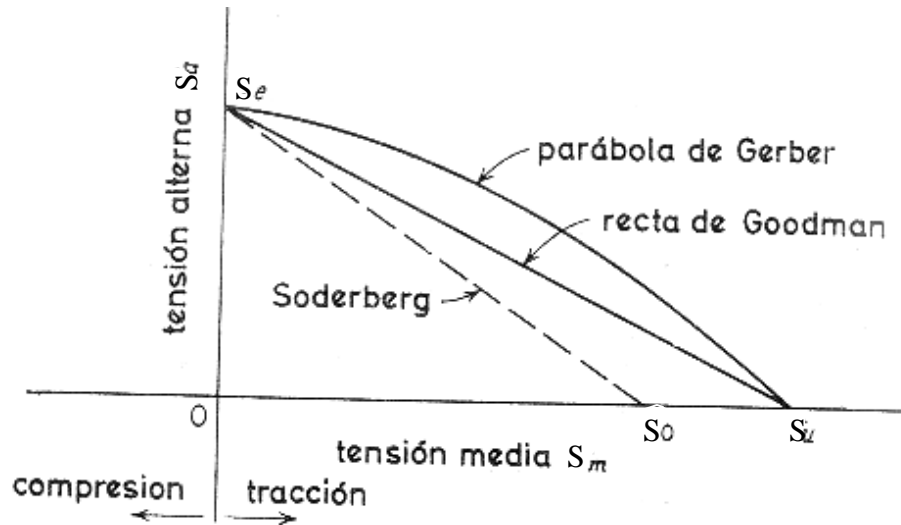


Figura 4. Otro método para representar el diagrama de Goodman

Las dos líneas rectas y la curva de esta figura representan las tres relaciones empíricas más utilizadas. La línea recta que une la resistencia a la fatiga alternante, con la resistencia a la tracción, es la ley de Goodman modificada. La ley de Goodman original incluye la suposición que el límite de fatiga es igual a un tercio de la resistencia a la tracción y esto se ha modificado en la relación anterior, usando la resistencia a la fatiga alternante determinada experimentalmente. La ley original ya no se usa y la modificada se le denomina generalmente para simplificar, como ley de Goodman. Gerber encontró que los resultados experimentales primitivos de Wöhler se ajustaban bastante bien a una relación parabólica y esto se conoce ahora como parábola de Gerber. La tercera relación, conocida como la ley Soderberg, viene dada por una línea recta, que une la resistencia a la fatiga alternante con el límite de fluencia. Es esencial para muchos usos que no se sobrepase el límite de fluencia y esta relación intenta que se cumplan las condiciones para que no tenga lugar el fallo por fatiga ni fluencia.

Las relaciones que describen estas leyes son:

- Ley de Goodman modificada
$$S_a = S^* \left(1 - \frac{S_m}{S_u} \right) \quad (\text{Ec. 4})$$

- Ley de Gerber
$$S_a = S^* \left(1 - \left(\frac{S_m}{S_u} \right)^2 \right) \quad (\text{Ec. 5})$$

- Ley de Soderberg
$$S_a = S^* \left(1 - \frac{S_m}{S_y} \right) \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde S_a es el esfuerzo alternante asociado a un esfuerzo medio S_m , S es la resistencia a la fatiga S_u es la resistencia a la tracción y S_y el límite de fluencia.

1.6.8.6.- RESISTENCIA A LA FATIGA BAJO ESFUERZOS COMPLEJOS^[7].

Piezas en servicio están sometidas a esfuerzos fluctuantes complejos, por lo que es importante predecir la resistencia a la fatiga para estos esfuerzos. Se han aplicado las teorías propuestas para determinar el fallo por esfuerzos estáticos y así obtener un criterio que rijan el fallo por fatiga bajo esfuerzos complejos, entre los más importantes tenemos:

- Esfuerzo principal máximo.
- Esfuerzo de cizalla máximo.
- Energía de deformación cizallante máxima (Von Mises).
- Deformación principal máxima.

Si las amplitudes de los esfuerzos principales alternantes son p_1 , p_2 , p_3 , donde $p_1 \geq p_2 \geq p_3$ y S es la resistencia a la fatiga uniaxial alternante, entonces los criterios anteriores se describen de la siguiente manera:

- Criterio del esfuerzo principal máximo:

$$p_1 = S \quad (\text{Ec. 7})$$

- Criterio de cizalla máximo:

$$p_1 - p_3 = S \quad (\text{Ec. 8})$$

- Energía de deformación cizallante (Von Mises).

$$(p_1 - p_2)^2 + (p_2 - p_3)^2 + (p_3 - p_1)^2 = 2 \cdot S^2 \quad (\text{Ec. 9})$$

- Deformación principal máxima.

$$p_1 - \nu^* (p_2 + p_3) = S \quad (\text{Ec. 10})$$

Donde ν : es la relación de Poisson.

1.6.8.7.- LEY DEL DETERIORO LINEAL O LEY DEL DAÑO ACUMULADO^[7] .

A partir de la ley del deterioro lineal o de daño acumulado, propuesta por Palmgren y expuesta posteriormente por Miner, se puede predecir la vida a la fatiga bajo esfuerzos variables a partir de una curva S- N. La suposición es tal que la aplicación de n_1 ciclos a un esfuerzo S_1 para el cual el número de ciclos medios para provocar la rotura es N_1 produce un deterioro por fatiga n_1 / N_1 y que el fallo tendrá lugar cuando: $\sum n / N = 1$.

Donde: n / N es la relación del ciclo.

Los experimentos para determinar esta ley se realizan sometiendo una probeta a un nivel de esfuerzo por un número determinado de ciclos y luego el esfuerzo es variado por intervalos de ciclos regulares.

1.6.8.8.- RECUBRIMIENTOS^[7] .

En los aceros se emplean los recubrimientos no féreos depositados electrolíticamente o por otros medios para mejorar la resistencia al desgaste, a la corrosión y también para restaurar las piezas desgastadas y de tamaño menor que lo normal.

La electrodeposición con metales no féreos blandos, tales como el cadmio, plomo, estaño y zinc, tienen en general, un pequeño efecto sobre la resistencia a la fatiga, pero con níquel y cromo, pueden conseguirse grandes reducciones en esta.

Se ha indicado que la disminución de la resistencia a la fatiga debida a la electrodeposición puede, en parte, atribuirse al efecto que tiene en los aceros el hidrógeno absorbido durante el proceso de deposición, pero se ha demostrado que la oclusión del hidrógeno tiene poca influencia sobre la resistencia a la fatiga.

1.6.8.9.- FACTORES METALÚRGICOS.

El comportamiento a la fatiga de los metales es sensible a la estructura, pero por ciertos medios metalúrgicos se puede mejorar tal comportamiento. Las propiedades de fatiga se correlacionan frecuentemente con las propiedades de tracción por lo que se puede establecer cierto paralelismo entre el efecto de los factores metalúrgicos sobre las propiedades a la fatiga y de estos sobre el ensayo de tracción.

1.6.8.9.1.- COMPOSICIÓN QUÍMICA^[6] .

Como se ha dicho anteriormente, cualquier factor que incremente la resistencia a la tracción, puede aumentar la resistencia a la fatiga. Uno de estos factores es la adición de elementos aleantes a los metales; se observa que al aumentar el contenido de carbono de un acero, aumenta su resistencia a la tracción y se presenta un incremento en el límite de fatiga; otro factor que favorece el aumento de la resistencia a la fatiga del acero es la adición de cromo, níquel y molibdeno ya que estos resisten altas temperaturas de revenido sin ablandamiento apreciable. En aleaciones de aluminio- magnesio se ha observado que la adición de elementos que formen solución sólida produce mayor aumento de la resistencia a la fatiga que el envejecimiento y el trabajo en frío.

1.6.8.9.2.- TRATAMIENTO TÉRMICO Y MICROESTRUCTURA^[7] .

La microestructura así como la respuesta del material al tratamiento térmico dependen significativamente de la composición química. La resistencia a la fatiga se incrementa usualmente con cualquier tratamiento térmico que aumente la resistencia a la tracción,

pero para una resistencia a la tracción dada depende hasta cierto punto de la microestructura.

Una estructura totalmente ferrítica tiene, a menudo, un límite de fatiga mayor que su mitad de la resistencia a la tracción, pero la resistencia es baja. Para aceros tratados con altas resistencias, las mejores propiedades se han obtenido con martensita revenida. Se ha supuesto que la más baja resistencia a la fatiga de las estructuras mixtas puede atribuirse, generalmente, a entallas metalúrgicas, que podrían ser perlita gruesa, ferrita libre, segregación de los elementos aleantes o austenita retenida durante el temple.

El revenido de un acero templado a una temperatura baja puede ocasionar un aumento en la resistencia a la fatiga sin disminuir la resistencia a la tracción. Cuando se eleva la temperatura del revenido, disminuye tanto la resistencia a la fatiga como la resistencia a la tracción, aunque la relación de fatiga aumenta usualmente. La influencia del tamaño de grano no tiene mucha importancia en la resistencia a la fatiga de los aceros. Los materiales de grano fino muestran una resistencia a la fatiga mayor que los de grano basto, pero esto compensa, hasta cierto punto, su mayor sensibilidad a las entallas.

1.6.8.9.3.- INCLUSIONES^[7] .

La influencia de las inclusiones en la resistencia a la fatiga del acero depende principalmente de su tamaño y forma, de su resistencia a la deformación, de su orientación a las tensiones y de la resistencia del mismo. La reducción en la resistencia a la fatiga se cree es debida al aumento de la concentración de tensiones introducidas por las inclusiones. Las inclusiones alargadas tienen poco efecto si son paralelas a la dirección del esfuerzo, pero puede reducir seriamente la resistencia a la fatiga si son perpendiculares a ella. La presencia de inclusiones, puede dar lugar a una direccionalidad considerable de las propiedades de fatiga.

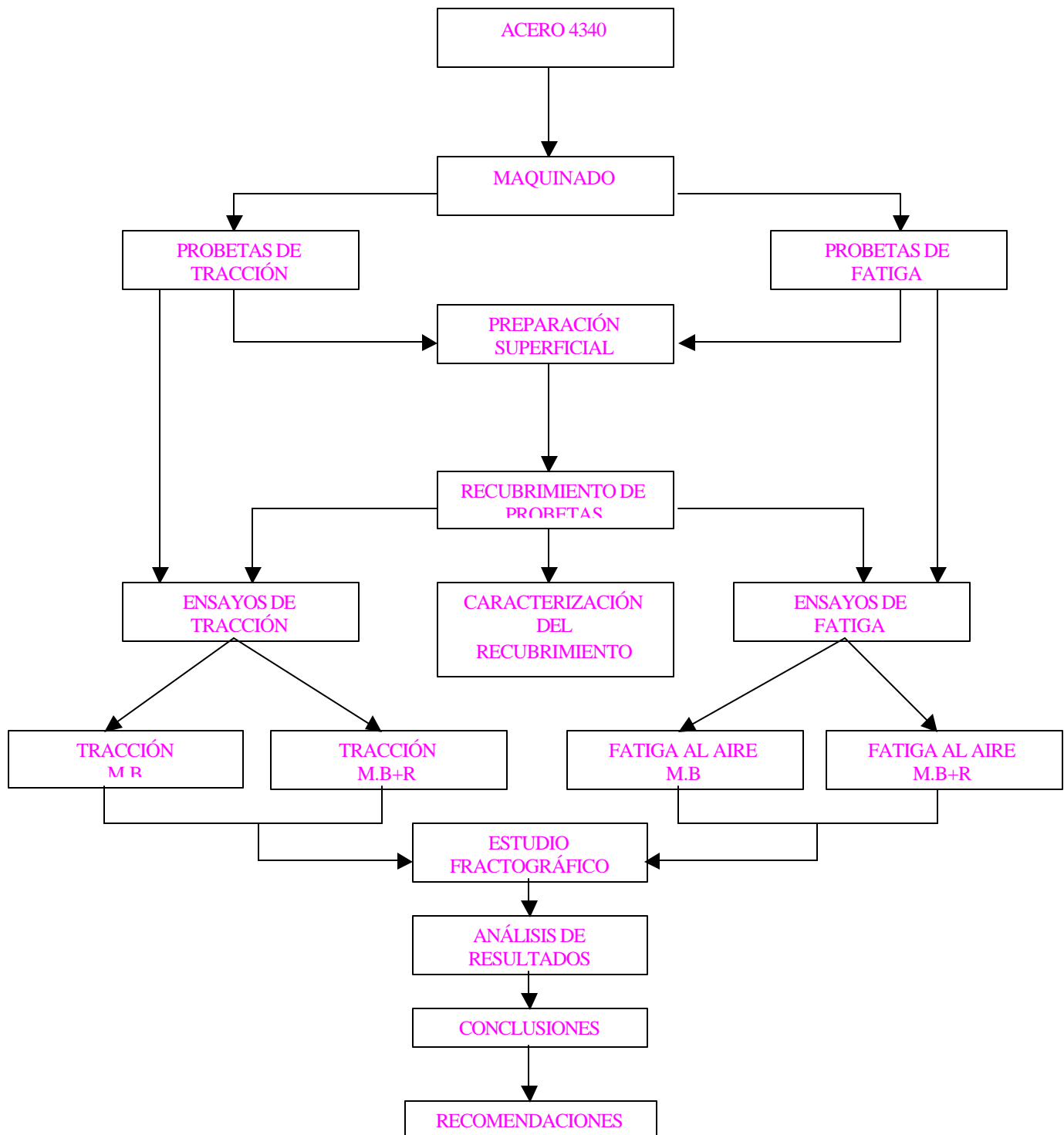
Se ha demostrado que la presencia de inclusiones en el acero molibdeno- cromo- níquel SAE 4340, tiene un mayor efecto en la resistencia a la fatiga transversal, que en la

longitudinal. Se encontró, que la resistencia a la fatiga transversal, estaba relacionada con la ductilidad, en un ensayo de tracción transversal, cuyos valores bajos de cada resultado, eran debidos a la presencia de inclusiones fragmentadas tipo hilera.

Se ha demostrado también, la importancia del tamaño de las inclusiones, a partir de los resultados de muchos ensayos de fatiga realizados en aceros de baja aleación, como el 4340 tratados térmicamente. Por otra parte, se investigó la relación entre los factores metalúrgicos y la variación estadística de las propiedades de fatiga y se encontró que la dispersión en el número de ciclos y en el límite de fatiga dependía más de las inclusiones que de la composición o del tratamiento térmico. La influencia de los procesos de fabricación en la resistencia a la fatiga fue estudiada sobre un acero SAE 4340 con tratamiento térmico, y los resultados demostraron claramente que la presencia de inclusiones grandes era perjudicial, aunque no se obtuvo una relación entre el tamaño de la inclusión y la resistencia a la fatiga.

2.- PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.

2.1- FLUJOGRAMA DE TRABAJO.



2.2- PROBETAS DE TRACCIÓN Y FATIGA.

2.2.1- DISTRIBUCIÓN Y DIMENSIONAMIENTO.

Sobre la base de las normas ASTM E606 y ASTM A370, que establecen que para obtener la ecuación de Basquin, se deben ensayar entre 12 y 24 probetas en fatiga, y 3 probetas en tracción para obtener una alta confiabilidad en los resultados de las propiedades mecánicas del material respectivamente. La tabla 6 muestra la distribución de probetas, y en cada caso se tomó un exceso de las mismas previendo cualquier problema:

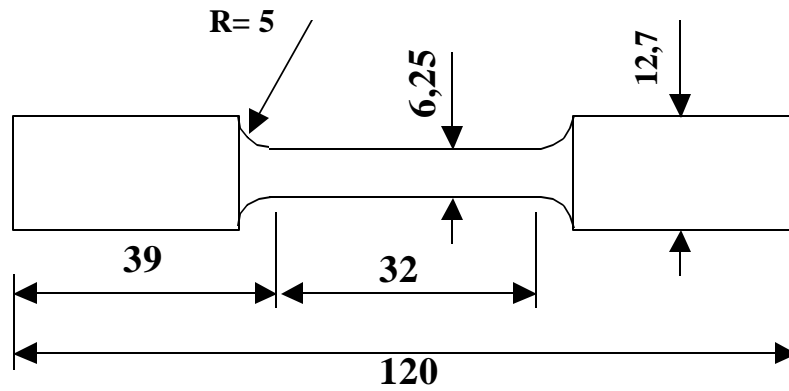
Tabla 6. Distribución de probetas.

ENSAYO	Nº DE PROBETAS
Tracción (M.B)	3
Tracción (M.B +R)	3
Fatiga al Aire (M.B)	24
Fatiga al Aire (M.B +R)	24
Fatiga al Aire, límite (M.B)	15
Fatiga al Aire, límite (M.B +R)	11

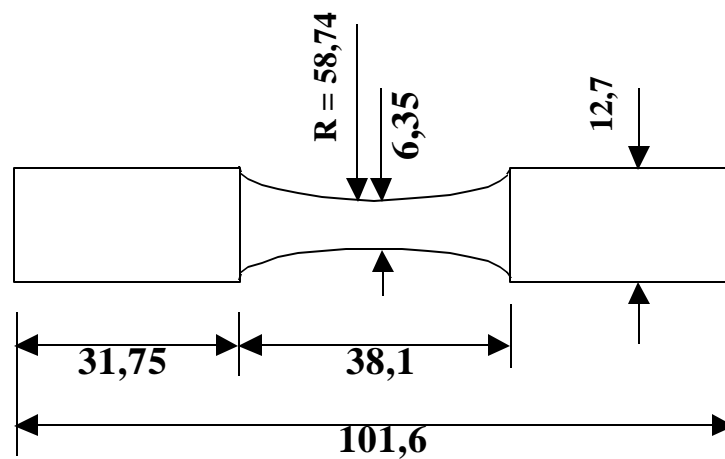
Donde: M.B = Metal Base.

M.B +R = Metal Base + Recubrimiento.

Se obtuvieron las probetas a partir de las barras de acero ya adquiridas; posteriormente fueron maquinadas en un torno de control numérico, en el cual se le dió el tamaño y la forma recomendado por las normas. En la figura 5, se señalan las características de las probetas.

PROBETA DE TRACCIÓN

Medidas en mm.

PROBETA DE FATIGA

Medidas en mm.

Fig. 5 Dimensiones de las probetas

2.2.2- PREPARACIÓN SUPERFICIAL.

Una vez dimensionadas las probetas, se procedió a lijar cada una de estas en un torno marca MYFORD TIPO ML7-R, (foto 2). El lijado se hizo con papeles esmeril de Si-C de números 240, 320, 400, 500, 600, 1200, 1500, 2000 en seco y en dirección axial al eje principal de la probeta, obteniendo un lijado diagonal libre de entallas circunferenciales generadas en el maquinado, que pudieran ser fuentes de inicio de grietas durante los ensayos.



Foto 2. Torno.

2.2.3- RECUBRIMIENTO.

Una vez terminada la preparación de la superficie, se procedió a unir las probetas en grupos de cinco (5) por medio de abrazaderas galvanizadas (foto 3 y foto 4); luego se envolvió cada grupo en un plástico acolchado con burbujas de aire, para proteger las probetas contra impactos. Estas probetas fueron llevadas a PLASMATEC Ingenieros C.A ubicada en la carretera vieja de Petare- Guarenas, Edo. Miranda. Se recubrieron todas las probetas necesarias para los ensayos de tracción y fatiga con un espesor proporcionado por la industria de 200 μm .



Foto 3. Arreglo de probetas de tracción.

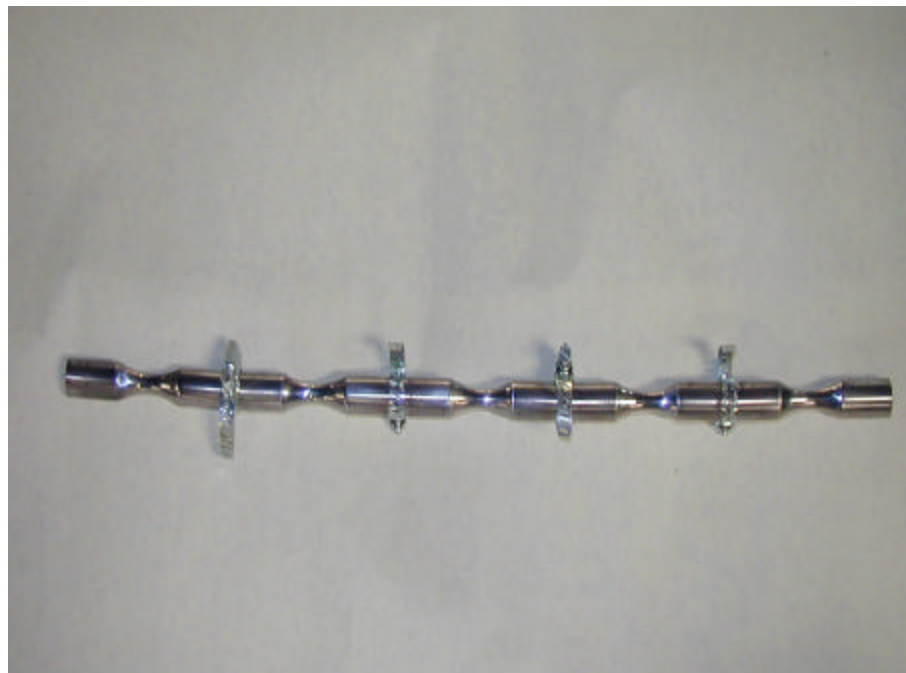


Foto 4. Arreglo de probetas de fatiga.

Las fotos 5, 6, 7 y 8 muestran algunos pasos elementales del proceso de termorociado realizado en PLASMATEC Ingenieros C.A.

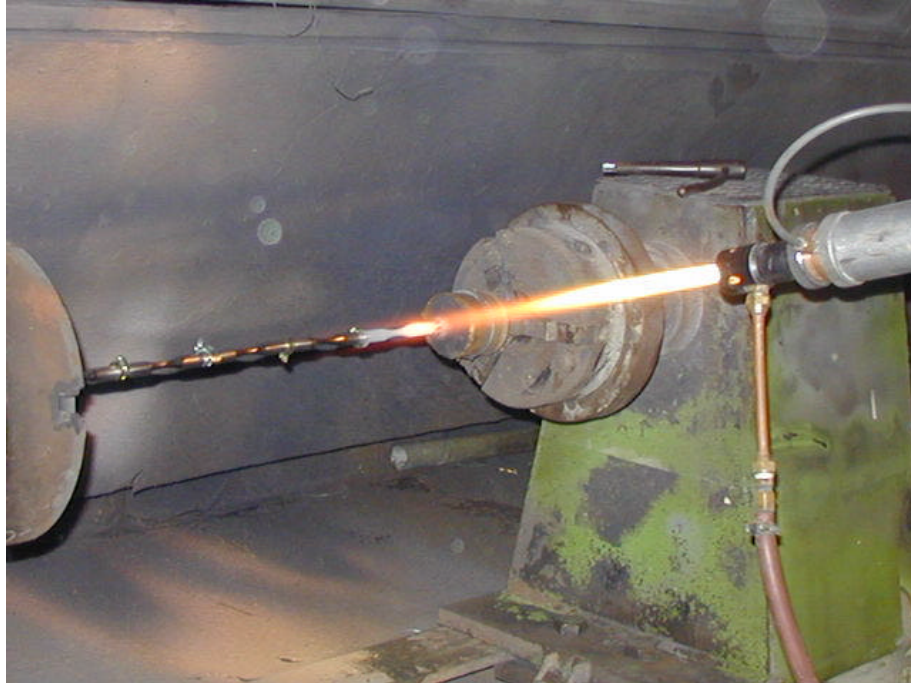


Foto 5. Calentamiento de la superficie del acero.



Foto 6. Medición de la temperatura de trabajo.



Foto 7. Medición de la distancia de rociado.

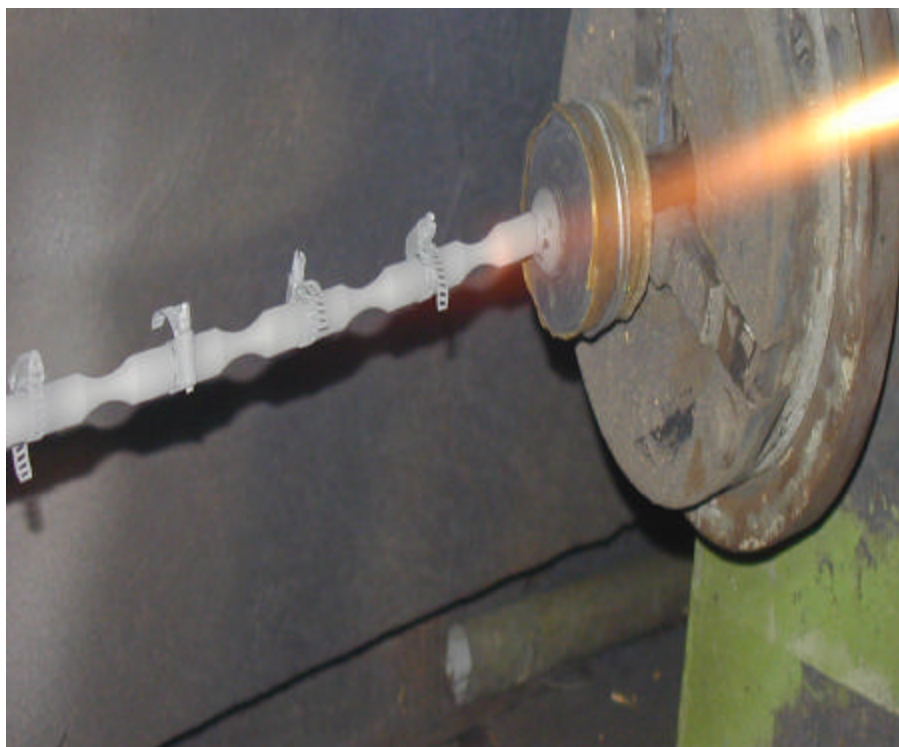


Foto. 8 Rociado del recubrimiento.

2.3- CARACTERIZACIÓN DEL RECUBRIMIENTO.

2.3.1- ESPESOR.

Para este estudio se realizó una selección dentro de las probetas de fatiga que fallaron en el esfuerzo más bajo, con un número de ciclos próximo al promedio del nivel esfuerzo.

A una de las partes, se le realizó 2 cortes longitudinales de 2mm de separación entre ambas y de 7mm de profundidad para luego también hacerle un corte transversal a 4mm de la superficie de fractura con la intención de obtener una sección plana (tajada), esta muestra fue embutida para luego ser pulida en la cara longitudinal.

Posteriormente la muestra fue limpiada con detergente líquido, un cepillo de cerdas suaves y agua; luego se colocó la muestra en un viker de vidrio con acetona, en un equipo de limpieza ultrasónica marca Buehler, modelo Ultramet II (foto 11) , durante 15 minutos, luego se cambió la acetona y se colocaron por 15 minutos más. Se quitó el resto de acetona con agua, se le roció a la muestra unas gotas de alcohol y fue secada con una corriente de aire caliente, se realizó este procedimiento antes y después del pulido. Los cortes se realizaron con una cortadora de precisión Buehler y el pulido con una pulidora Ecomet5 (foto 12) .

Luego la muestra fue atacada con una solución de nital al 4%, para revelar mejor la microestructura y se procedió a utilizar la técnica de microscopía electrónica de barrido (M.E.B).

Se garantizó un ángulo de incidencia no mayor a 60° y de esta manera reportar dimensiones reales a partir de dichas fotomicrografías.

La figura 6, muestra la fotomicrografía de la cual fue tomado el valor del espesor del recubrimiento, siendo en promedio un valor aproximado de 230im.

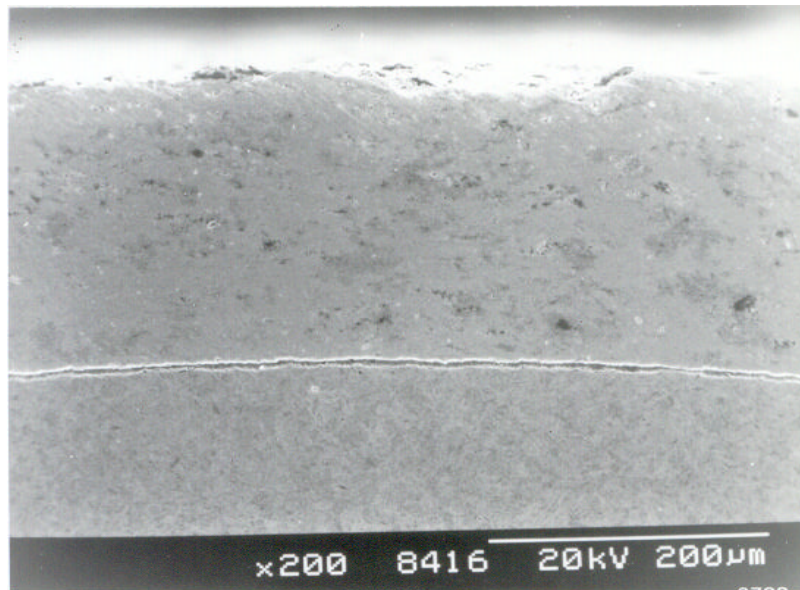


Fig.6 Fotomicrografía de donde fue tomado el valor del espesor del recubrimiento.

2.3.2- DUREZA.

Se tomó una probeta recubierta con WC-Co al azar. Luego se le realizó un corte transversal en el hombro de la misma y así obtener dos mitades de probeta. Se hizo 1 corte longitudinal de 7mm de profundidad para luego también hacerle otro corte transversal con la intención de obtener una sección plana en la parte superior de la misma (tajada), esta muestra fue embutida para luego ser pulida en la cara longitudinal.

Se realizó el ensayo de microdureza en un microscopio óptico marca Leitz modelo Metallux, el cual tiene ajustado un dispositivo para medir dureza vickers. El indentador es punta de diamante.

Se realizaron diez (10) mediciones aplicando una carga de 300gf, la cual es aplicada en forma progresiva por el equipo en un intervalo de tiempo entre (1,59- 2,03) min. El valor obtenido es el tamaño, en micras de las diagonales del cuadrado que deja la huella.

La ecuación utilizada es la siguiente:

$$HV_N = \frac{2 * \text{sen}(\acute{\alpha}/2) * P}{L^2} = \frac{1,854 * P}{L^2} \quad (\text{Ec.11})$$

Donde:

P: es la carga aplicada en kgf.

L: el promedio del valor de las diagonales en mm.

á: es el ángulo entre caras opuestas de la pirámide.

El valor obtenido de la dureza del recubrimiento es :

$$HV_{N0,3} = 979,6 \text{ kgf} / \text{mm}^2$$

2.4- ENSAYO DE TRACCIÓN.

2.4.1- CARACTERÍSTICAS.

Estos ensayos se realizaron en una máquina universal marca INSTRON modelo 8502; estos ensayos fueron controlados por medio de una computadora y se llevan a cabo a una velocidad del cabezal= 3 mm/min, (foto 9).

Según lo estipulado en la norma ASTM A370 se realizó el ensayo a tres (3) probetas; los valores obtenidos para cada ensayo corresponden al alargamiento de la probeta (Δl_i), sin corrección por deformación elástica de los componentes de máquina, y a la carga aplicada (F_i). Estos datos fueron almacenados en la máquina que controla el ensayo. Se hicieron las mediciones del diámetro inicial y del diámetro final de cada probeta con un vernier digital, para obtener el área inicial y final de su sección transversal respectivamente.



Foto 9. Máquina universal de ensayos.

Con el objeto de hacer la corrección por la deformación elástica de los elementos de máquina involucrados en el sistema de carga, se aplicó la siguiente ecuación que corrige el alargamiento de la probeta:

$$(\Delta l_i)_{\text{corr}} = \Delta l_i + F_i * \left[\frac{K_{\text{teo}} - K_{\text{exp}}}{K_{\text{teo}} * K_{\text{exp}}} \right] \quad (\text{Ec. 12})$$

Donde: $(\Delta l_i)_{\text{corr}}$ = elongación corregida de la probeta.

Δl_i = elongación sin corrección de la probeta.

F_i = fuerza con que se carga la máquina.

K_{teo} = rigidez teórica de la probeta.

K_{exp} = rigidez experimental del conjunto.

Por otra parte:
$$K_{\text{teo}} = \frac{A_o * E}{L_o} \quad (\text{Ec. 13})$$

$$K_{\text{exp}} = \frac{\sum F_i}{\sum \Delta l_i} \quad (\text{Ec. 14})$$

Donde: $A_o = \text{área inicial de la sección transversal del ensayo}; A_o = \frac{D_o^2 * \Pi}{4}$

$E = \text{módulo de elasticidad del acero (207 GPa).}$

$L_o = \text{longitud inicial de la sección de ensayo (32 mm).}$

2.4.2- OBTENCIÓN DE LA CURVA ESFUERZO – DEFORMACIÓN REAL.

Una vez corregido el alargamiento de la probeta, para cada estado de carga correspondiente (F_i), se construyó la curva esfuerzo – deformación real (σ vs. ϵ) a partir de la curva esfuerzo – deformación ingenieril (S vs. e).

$$S_i = \frac{F_i}{A_o} \quad \text{Esfuerzo Ingenieril.} \quad (\text{Ec.15})$$

$$e_i = \frac{(\Delta l_i)_{\text{corr}}}{L_o} \quad \text{Deformación Ingenieril.} \quad (\text{Ec.16})$$

$$\sigma_i = S_i * (1 + e_i) \quad \text{Esfuerzo Real.} \quad (\text{Ec.17})$$

$$\epsilon_i = \text{Ln} (1 + e_i) \quad \text{Deformación Real.} \quad (\text{Ec.18})$$

De aquí se obtienen los siguientes parámetros: esfuerzo de fluencia (σ_y) a 0,02% de la deformación total, resistencia a la tracción (S_u), resistencia a la fractura (S_f), esfuerzo real a carga máxima (σ_u), esfuerzo real a la fractura (σ_f).

Estos parámetros se obtuvieron para cada una de las probetas, y luego se tomó un promedio y su respectiva desviación estándar, lo cual se hizo tanto para el material base como para el material recubierto, y así compararlos para analizar la influencia del recubrimiento en las propiedades mecánicas estáticas del material base.

2.5- ENSAYO DE FATIGA.

2.5.1- CARACTERÍSTICAS.

Los ensayos de fatiga, se realizaron en una máquina de flexión rotativa marca Fatigue Dynamics Inc; modelo RBF – 200, (foto 10). Esta máquina está diseñada para aplicar cargas totalmente invertidas en voladizo sobre probetas cilíndricas; la misma posee un contador de ciclos y un regulador de velocidades que varían entre 500 y 10000 r.p.m. Los extremos de las probetas son sujetadas mediante mordazas acopladas al eje del motor y a un eje cónico, el cual va unido a una barra graduada en función del momento flector (M), que es producido por la carga aplicada.



Foto 10. Máquina de fatiga.

El nivel de esfuerzo necesario para cada ensayo es aplicado a través de la barra calibrada en función del momento flector, y para ello se utiliza la ecuación que relaciona al momento flector con el esfuerzo:

$$S = \frac{M * C}{I} \Rightarrow M = \frac{S * I}{C} \quad (\text{Ec.19})$$

Donde : M = momento flector.

S = esfuerzo aplicado.

I = momento polar de inercia.

C = distancia desde el eje neutro de la carga hasta la superficie de la probeta.

$C = D/2$; D = diámetro menor de la probeta.

Para una barra de sección circular se tiene: $I = \frac{\pi * D^4}{64}$. **(Ec.20)**

Sustituyendo se tiene:

$$M = \frac{S * (\pi * D^4 / 64)}{D/2} = \frac{S * \pi * D^3}{32} \quad \text{(Ec.21)}$$

$$M = 0,0982 * S * D^3 \quad [\text{Lbf} - \text{pulg}] \quad \text{(Ec.22)}$$

En vista que las unidades utilizadas para el esfuerzo fueron en MPa y para el diámetro en mm, es necesario transformarlas a libras y a pulgadas respectivamente, ya que son las unidades en las que esta calibrada la barra que aplica el momento.

Entonces se tiene:

$$M = 0,0982 * (S * 145) * (D * 0,0394)^3 = 0,00087 * S * D^3 \quad [\text{Lbf} - \text{pulg}]. \quad \text{(Ec.23)}$$

Donde:

Las unidades del esfuerzo son MPa y las del diámetro son mm.

Una vez hecho esto, se aplica el siguiente procedimiento para realizar el ensayo de fatiga:

- Verificar que la máquina este apagada.
- Colocar el nivel de la barra en cero.

- Colocar la mordaza derecha en la probeta e introducirla en el husillo, colocar la rosca y apretar.
- Colocar la segunda rosca y la otra mordaza en el lado izquierdo de la probeta e introducirla en el husillo izquierdo de la máquina y apretar un poco la rosca.
- Acoplar la probeta de tal manera que tenga el menos movimiento posible de vaivén y así evitar movimientos bruscos durante el ensayo (vibraciones) que puedan afectar los resultados.
- Ajustar el tornillo que activa el apagado automático.
- Colocar el contador en cero.
- Encender la máquina y verificar la vibración, si es muy fuerte, apagar la máquina y ajustar la probeta hasta lograr la máxima estabilidad posible.
- Deslizar el peso de la barra hasta el valor calculado del momento.

2.6- DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LA ECUACIÓN DE BASQUIN.

Mediante el modelo de Basquin, se obtuvieron las ecuaciones de vida a la fatiga para dos condiciones distintas:

1. fatiga al aire material base.
2. fatiga al aire material recubierto.

Para cada condición, se trabajó con cuatro (4) niveles de esfuerzo y se ensayaron seis (6) probetas para cada nivel, para un total de veinticuatro (24) probetas por cada condición; para el ensayo de fatiga al aire del material base se trabajó con los siguientes porcentajes del esfuerzo de fluencia: 61, 65, 69, 72%, mientras que para el material recubierto se trabajó con: 65, 69, 73, 77% del esfuerzo de fluencia del material recubierto.

Para determinar la relación entre el esfuerzo aplicado (S) y los ciclos para la falla (N_f) se utilizó la ecuación de Basquin (**Ec. 1**).

Para obtener esta ecuación, se aplicó un método de regresión lineal a partir de los valores obtenidos en cada ensayo. Cada curva de Basquin se construyó a partir de los cuatro (4) niveles de esfuerzo para cada condición, con sus respectivos ciclos a falla para cada una de las seis (6) probetas ensayadas. Al graficar $\text{Log}(S)$ vs. $\text{Log}(N_f)$ se obtienen los veinticuatro (24) puntos a los que se le aplicó la regresión lineal. Se obtuvo la ecuación de una recta con su respectivo coeficiente de correlación lineal, donde el corte con las ordenadas es el parámetro S_f y la pendiente es el parámetro b .

2.7- DETERMINACIÓN DEL LÍMITE DE FATIGA POR EL MÉTODO DE LA ESCALERA.

Se determinó el límite de fatiga tanto para las probetas sin recubrimiento como para las probetas recubiertas, utilizando el método de la escalera, el cual es estadístico. Para aplicar este método se utilizaron quince (15) probetas para el material base y once (11) para el material recubierto ensayadas una por una. Tomando de ensayos anteriores el valor del límite de fatiga estimado, como el primer nivel de esfuerzo para la primera probeta. Si la probeta no falla hasta alcanzar el valor de cinco millones ($5 \cdot 10^6$) de ciclos, para el siguiente ensayo, se cambia la probeta y se aumenta en un escalón el esfuerzo, que en este trabajo fue de cinco (5) MPa. Este procedimiento se repite hasta que la probeta falle, en cuyo caso se disminuye el nivel de esfuerzo en un escalón a la siguiente probeta a ensayar; esto se sigue aplicando, aumentando el nivel de esfuerzo cuando la probeta no falle o disminuyendo cuando falle, hasta ensayar la cantidad total de probetas.

En el análisis para el cálculo del límite de fatiga, se toma en cuenta el suceso menos frecuente, que en el caso del material base fueron las probetas que fallaron y en el caso del material recubierto fueron las probetas que no fallaron; el límite de fatiga se calcula a partir de la ecuación que describe el método de la escalera (**Ec. 2**).

En esa expresión el signo más (+) se utiliza cuando el análisis se basa en las probetas que no fallan; en caso contrario se usa el signo menos (-).

También se obtuvo la desviación estándar para este método a partir de la siguiente ecuación:

$$S = 1,620 * d * \left[\frac{N * B - A^2}{N^2} + 0,029 \right] \quad (\text{Ec.24})$$

Donde:

$$S = D * E \quad (\text{Ec.25}) \qquad B = \Sigma (i^2 * n) \quad (\text{Ec.26})$$

Se calculó la reproducibilidad de las ecuaciones de Basquin, que en análisis estadísticos es importante reportar, mediante la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Reproducibilidad} = \left[1 - \frac{\text{N}^\circ \text{ de niveles de esfuerzo}}{\text{N}^\circ \text{ de probetas ensayadas}} \right] * 100 \quad (\text{Ec.27})$$

Ya que las dos condiciones de ensayo se realizaron con el mismo número de esfuerzos (4) y el mismo número de probetas (24), el valor de reproducibilidad es el mismo e igual a 83%, para cada una de las ecuaciones de Basquin.

2.8- ESTUDIO FRACTOGRÁFICO.

Este estudio se hace con la finalidad de caracterizar los mecanismos de falla que actuaron sobre las probetas de fatiga. La técnica utilizada fue microscopía electrónica de barrido (M.E.B), que nos permite analizar adecuadamente los mecanismos de fatiga y los mecanismos de nucleación y crecimiento de grietas. Este estudio se realizó en las superficies de fractura y sección longitudinal de probetas seleccionadas.

2.8.1- PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS.

Para este estudio se realizó una selección en las probetas de fatiga que fallaron con un número de ciclos próximo al promedio del nivel de esfuerzo más alto y más bajo, una

para el material base y una para el material base más el recubrimiento, es decir 2 probetas.

A cada muestra (2 partes), se le hizo un corte transversal a 4 mm de la superficie de fractura y a la otra parte se le realizó 2 cortes longitudinales de 2mm de separación entre ambas y de 7mm de profundidad para luego también hacerle un corte transversal a 4mm de la superficie de fractura con la intención de obtener una sección plana (tajada), estas últimas muestras fueron embutidas para luego ser pulidas en la cara longitudinal.

Posteriormente todas las muestras fueron limpiadas con detergente líquido, un cepillo de cerdas suaves y agua para eliminar la vaselina de la superficie de fractura; luego se colocaron las muestras en vikers de vidrio con acetona, en un equipo de limpieza ultrasónica marca Buehler, modelo Ultramet II (foto 11) , durante 15 minutos, luego se cambió la acetona y se colocaron por 15 minutos más. Se quitó el resto de acetona con agua, se le rociaron a las muestras unas gotas de alcohol y fue secada con una corriente de aire caliente, se realizó este procedimiento antes y después del pulido. Los cortes se realizaron con una cortadora de precisión Buehler y el pulido con una pulidora Ecomet5 (foto 12) .



Foto.11 Pulidora Buehler Ecomet5.



Foto 12. Equipo limpiador ultrasonido Buehler Ecomet II.

2.8.2- MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (M. E. B).

Las imágenes obtenidas para el estudio fractográfico fueron realizadas a través de un microscopio electrónico de barrido (M. E. B), marca Phillips, modelo XL30, con un voltaje de aceleración de 25 kV, usando un modo de imágenes de electrones secundarios para el estudio de la superficie de fractura.

Este equipo, cuenta un software especializado para la realización de mediciones sobre la imagen electrónica directamente.

3.- RESULTADOS Y ANÁLISIS.

La influencia del depósito de WC-12%Co aplicado por termorociado HVOF sobre las propiedades mecánicas estáticas de un acero SAE 4340, fueron evaluadas en ensayos de tracción, fatiga y mediante un análisis fractográfico, realizados tanto para el material base como para el material con recubrimiento.

Para los ensayos de tracción, tres (3) muestras del material base y tres (3) del material recubierto con un depósito de WC- 12%Co, fueron ensayadas.

Las tablas 7 y 8 muestran los resultados de los ensayos de tracción tanto del material base como del material recubierto respectivamente. Allí se encuentran los valores del esfuerzo de fluencia (σ_y), resistencia a la tracción (S_u), esfuerzo máximo a la tracción (σ_u), y esfuerzo a la fractura (σ_f), el porcentaje de reducción de área y el porcentaje de elongación. En las figuras 7 y 8, se muestran las curvas esfuerzo real- deformación real para cada probeta ensayada, tanto para el material base como para el material recubierto respectivamente.

Los ensayos de fatiga se realizaron en un intervalo de esfuerzo comprendido entre (709- 599) MPa para el sustrato, el cual corresponde a una fracción del esfuerzo de fluencia (σ_y) de aproximadamente (0,72- 0,61). Para los ensayos de fatiga realizados al material recubierto con un depósito de WC- 12%Co, el intervalo del esfuerzo aplicado es (669- 564) MPa, lo cual corresponde a una fracción del esfuerzo de fluencia (σ_y) del material recubierto entre (0,77- 0,65).

Los resultados de los ensayos de fatiga al aire del material base y del material recubierto se muestran en las tablas de la 9 a la 16, con su respectivo cálculo del límite de fatiga. Las tablas 9 y 11, presentan el número de probetas ensayadas, donde se representa el número de ciclos a la fractura (N_f) en términos de los esfuerzos alternantes aplicados (S), así como el momento flector que produce dicho esfuerzo y el valor del diámetro mínimo de la probeta. Cabe destacar, que se muestran los promedios y la desviación

estándar de cada nivel de esfuerzo. Se muestran las curvas log- log de resistencia a la fatiga (figuras 9 y 10), para cada condición ensayada, así como los parámetros de la ecuación de Basquin^[9] (tablas 10 y 12), los cuales fueron obtenidos mediante una regresión lineal realizada a los veinticuatro puntos (24) de cada curva, donde el antilogaritmo del corte con en el eje ordenado es el coeficiente de resistencia a la fatiga (S_f), y la pendiente de la recta es el exponente de resistencia a la fatiga (b).

Las tablas 13 y 14, muestran los resultados de los ensayos de fatiga al aire para la determinación del límite de fatiga, donde se observa el No. de probetas y los esfuerzos a los cuales fueron ensatadas cada una en cada condición (material base o material recubierto), así como también los ciclos a falla y lo ocurrido con dicha probeta (falla o no falla).

Las tablas 15 y 16, muestran los resultados del método de la escalera, tanto del material base como del material recubierto respectivamente, donde se observa el valor del límite de fatiga y su respectiva desviación, para cada condición del material.

Desde la figura 11 a la figura 24, se muestra el estudio fractográfico. Este estudio se realizó, seleccionando una probeta del mayor de los esfuerzos y una del menor de los esfuerzos ensayados en fatiga al aire del material recubierto. Estas probetas se seleccionaron tomando en cuenta que su número de ciclos a falla, fuera cercano al valor promedio de su respectivo nivel de esfuerzo.

Al final del grupo de resultados (tracción, fatiga, fractografía) se muestran las observaciones que serán la base del análisis de los mismos.

Tabla 7. RESULTADOS DEL ENSAYO DE TRACCIÓN DEL MATERIAL BASE DEL ACERO 4340.

Probeta	Esf.Fluencia (MPa)	Res.Traccion (MPa)	Esf.Tracción Real (MPa)	Esf.Fractura Real (MPa)	%Reduc. Área	%Elongac.
1	985	1102,83	1169,72	1689,95	54,62	13,98
2	995	1120,39	1199,52	1712,44	52,68	13,18
3	948	1104,04	1173,8	1817,64	57,16	13,41
PROMEDIO	976	1109,09	1181,01	1740,01	54,82	13,52
D.E.	24,8	9,8	16,2	68,2	2,2	0,4

Fig. 7 CURVAS DE TRACCIÓN MATERIAL BASE.

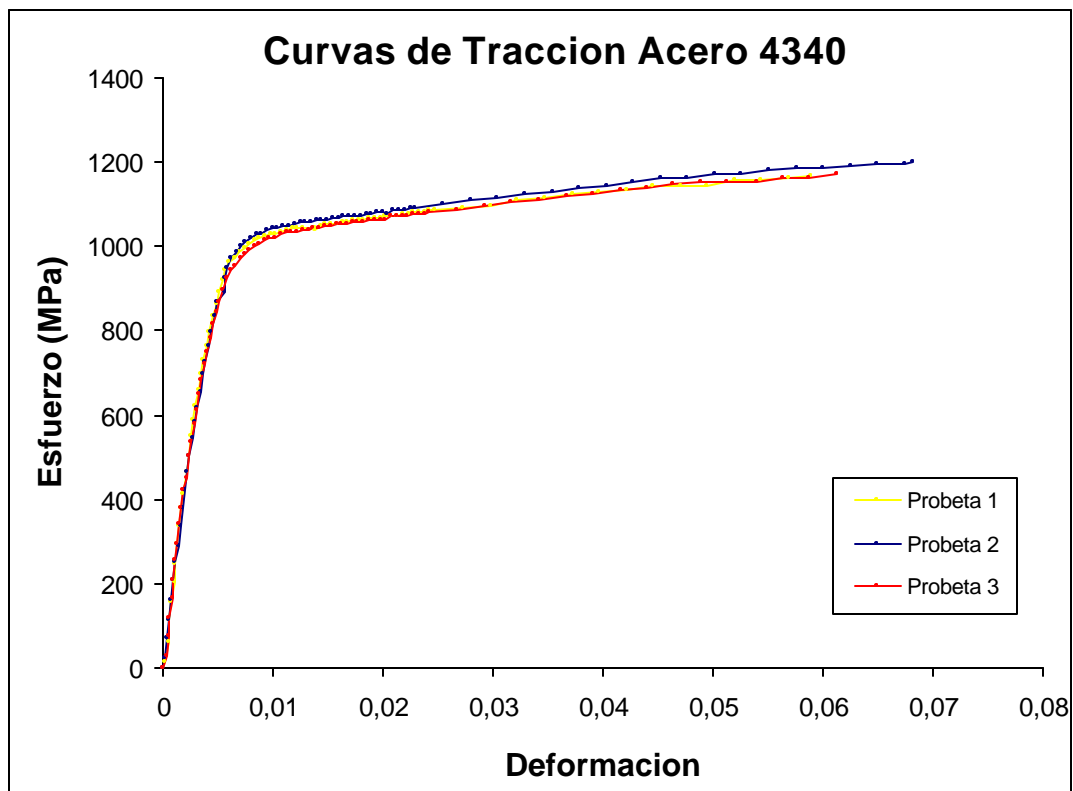


Tabla 8. RESULTADOS DEL ENSAYO DE TRACCIÓN DEL
ACERO SAE 4340, RECUBIERTO CON WC- Co.

Probeta	Esf.Fluencia (MPa)	Res.Traccion (MPa)	Esf.Tracción Real (MPa)	Esf.Fractura Real (MPa)	%Reduc. Área	%Elongac.
1	869	950,02	1010,78	1786,62	64,14	13,98
2	867	954,4	1018,62	1742,22	61,91	14,03
3	864	948,99	1010,34	1805,91	64,40	13,61
PROMEDIO	867	951,14	1013,25	1778,25	63,48	13,87
D.E.	2,5	2,9	4,7	32,7	1,4	0,23

Fig 8. CURVAS DE TRACCIÓN MATERIAL RECUBIERTO.

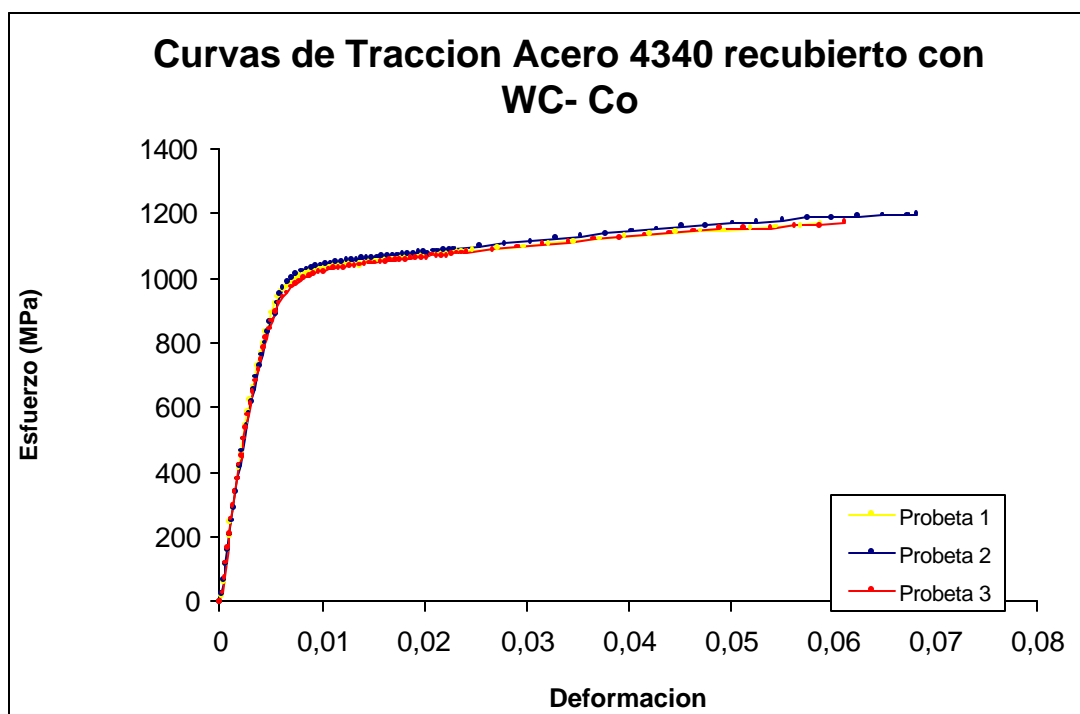
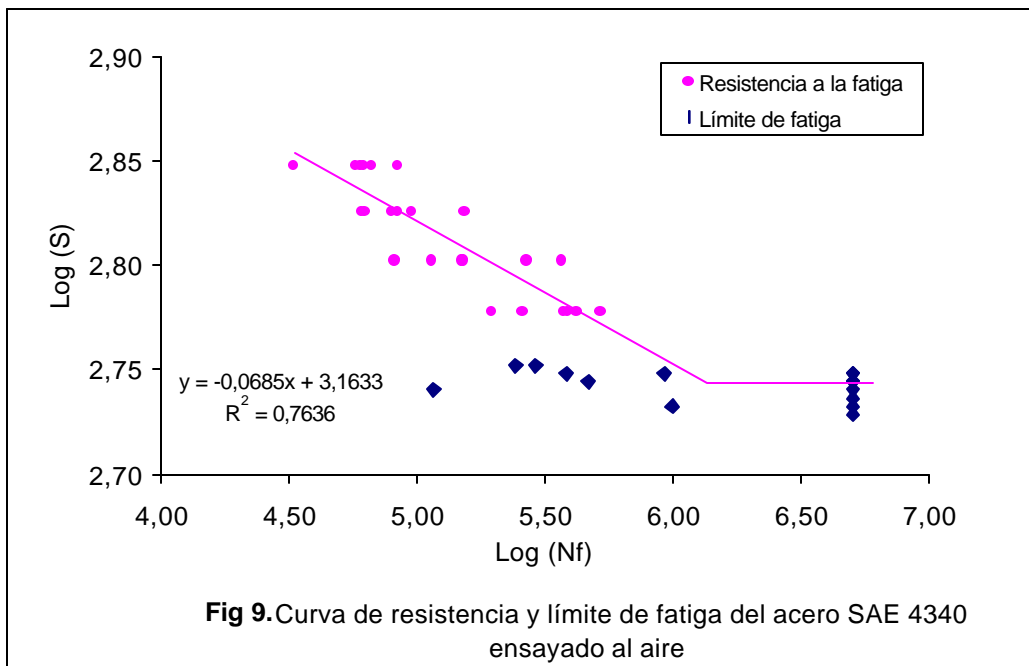


Tabla 9. Resultados del ensayo de fatiga al aire realizados al material base acero SAE 4340.

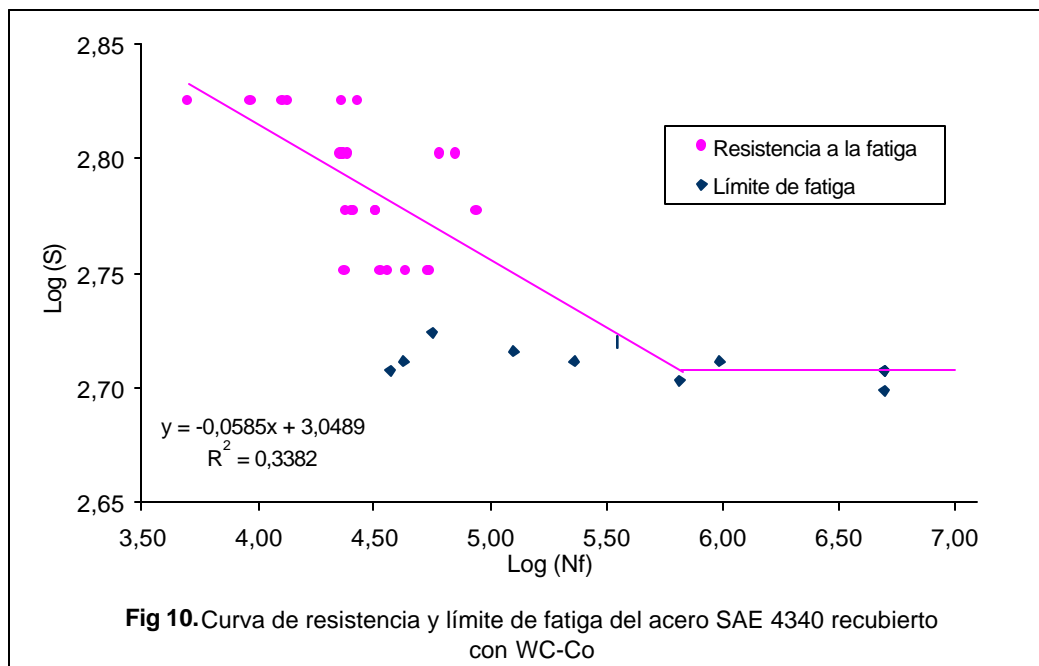
No. Probetas	704 (MPa)			669 (MPa)			634 (MPa)			599 (MPa)		
	Ciclos de falla (Nf)	Momento	Diámetro	Ciclos de falla (Nf)	Momento	Diámetro	Ciclos de falla (Nf)	Momento	Diámetro	Ciclos de falla (Nf)	Momento	Diámetro
1	83.200	147,4	6,22	152.200	161,30	6,52	267.300	148,7	6,46	257.300	141,8	6,48
2	57.600	189,2	6,76	60.500	157,60	6,47	365.300	152,2	6,51	194.500	147,1	6,56
3	33.000	164,4	6,45	84.300	156,20	6,45	81.500	157,9	6,59	372.700	139,8	6,45
4	61.400	162,1	6,42	62.100	168,10	6,61	151.300	159,3	6,61	521.300	150,5	6,61
5	66.000	171,3	6,54	79.000	165,10	6,57	148.600	147,3	6,44	387.200	137,9	6,42
6	59.800	170,5	6,53	94.300	165,80	6,58	113.200	155,7	6,56	418.100	147,1	6,56
Promedio	60.167	167,5	6,49	88.733	162,35	6,53	187.867	153,5	6,53	358.517	144,0	6,51
D.E	16.192	13,7	0,18	33.704	4,78	0,06	107.294	4,9	0,07	116.806	4,9	0,07

**Tabla 10.** Obtención de la ecuación de Basquin.

Datos de la curva		Parámetros Ec. Basquin	
Pendiente =	-0,0685	b = -0,0685	
Intersección eje (Y)=	3,1633	Sf = 1.456,34	
		Ecuación de Basquin	
R ² =	0,7636	S = 1.456,34*(Nf)^{-0,0685}	

Tabla 11. Resultados del ensayo de fatiga al aire realizados al material recubierto acero SAE 4340.

N° de Probeta	669 (MPa)			634 (MPa)			599 (MPa)			564 (MPa)		
	Ciclos de falla (Nf)	Momento	Diámetro	Ciclos de falla (Nf)	Momento	Diámetro	Ciclos de falla (Nf)	Momento	Diámetro	Ciclos de falla (Nf)	Momento	Diámetro
1	26.900	189,5	6,88	24.500	172,7	6,79	32.000	158,1	6,72	23.700	158,4	6,86
2	9.300	180,6	6,77	23.500	168,1	6,73	32.200	175,7	6,96	33.900	159,1	6,87
3	23.000	168,1	6,61	22.800	175,0	6,82	87.700	149,1	6,59	43.600	159,8	6,88
4	12.800	184,6	6,82	71.800	175,0	6,82	25.300	162,4	6,78	36.300	155,7	6,82
5	13.400	190,4	6,89	23.100	174,2	6,81	23.900	157,4	6,71	53.900	157,7	6,85
6	5.000	183,8	6,81	61.000	182,0	6,91	25.900	161,7	6,77	55.400	161,9	6,91
Promedio	15.067	182,8	6,80	37.783	174,5	6,81	37.833	160,7	6,76	41.133	158,8	6,87
D.E	8.312	8,1	0,10	22.435	4,5	0,06	24.682	8,7	0,12	12.266	2,1	0,03

**Tabla 12.** Obtención de la ecuación de Basquin.

Datos de la curva		Parámetros Ec. Basquin	
Pendiente =	-0,0585	b = -0,0585	
Intersección eje (Y)=	3,0489	Sf = 1.119,11	
		Ecuación de Basquin	
R ² =	0,3382	S = 1.119,11*(Nf)^{-0,0585}	

Tabla 13. Resultados del ensayo de fatiga al aire del acero SAE 4340, para la determinación del límite de fatiga.

No.PROBETA	ESFUERZO	CICLOS	Log (S)	Log (Nf)	FALLA	NO FALLA
1	540	992000	2,732	5,997	1	
2	535	5000000	2,728	6,699		1
3	540	5000000	2,732	6,699		1
4	545	5000000	2,736	6,699		1
5	550	5000000	2,740	6,699		1
6	555	5000000	2,744	6,699		1
7	560	5000000	2,748	6,699		1
8	565	241900	2,752	5,384	1	
9	560	5000000	2,748	6,699		1
10	565	287500	2,752	5,459	1	
11	560	918400	2,748	5,963	1	
12	555	5000000	2,744	6,699		1
13	560	380800	2,748	5,581	1	
14	555	463900	2,744	5,666	1	
15	550	114900	2,740	5,060	1	
					TOTAL FALLA	TOTAL NO FALLA
					7	8

Tabla 14. Resultados del ensayo de fatiga al aire del acero SAE 4340, recubierto con WC-Co, para la determinación del límite de fatiga.

No.PROBETA	ESFUERZO	CICLOS	Log (S)	Log (Nf)	FALLA	NO FALLA
1	530	56400	2,724	4,751	1	
2	525	353100	2,720	5,548	1	
3	520	126000	2,716	5,100	1	
4	515	972400	2,712	5,988	1	
5	510	5000000	2,708	6,699		1
6	515	42400	2,712	4,627	1	
7	510	5000000	2,708	6,699		1
8	515	230900	2,712	5,363	1	
9	510	37200	2,708	4,571	1	
10	505	654800	2,703	5,816	1	
11	500	5000000	2,699	6,699		1
					TOTAL FALLA	TOTAL NO FALLA
					8	3

Tabla 15. Aplicación del método de la escalera, para la obtención del límite de fatiga del acero SAE 4340.

Esfuerzo (MPa)	Nivel de Esfuerzo (i)	No. de Probeta															No. de probetas que fallan (f)	No. de probetas que no fallan	(i) * (f)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15			
565	5								1	1							2	0	10
560	4						0	0		1		1					2	2	8
555	3					0						0		1			1	2	3
550	2				0										1		1	1	2
545	1				0												0	1	0
540	0	1	0														1	1	0
535		0															0	1	
		SUMATORIA =															7	8	23
d=	5	$X = X_o + d*((A/N) - (1/2))$															$X = 553,93$ $S = 22,72$ Límite = 554 ± 23		
Xo=	540																		
N=	7																		
A=	23																		

Tabla 16. Aplicación del método de la escalera, para la obtención del límite de fatiga del acero SAE 4340, recubierto con WC-Co.

Esfuerzo (MPa)	Nivel de Esfuerzo (i)	No de Probeta											No de probetas que fallan	No de probetas que no fallan (f)	(i) * (f)	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11				
530	6	1												1	0	0
525	5		1											1	0	0
520	4			1										1	0	0
515	3				1		1		1					3	0	0
510	2					0		0		1				1	2	4
505	1										1			1	0	0
500	0											0		0	1	0
		SUMATORIA =											8	3	4	
d=	5	$X = X_o + d*((A/N) + (1/2))$											$X = 509,17$ $S = 7,43$ Límite = 509 ± 7			
Xo=	500															
N=	3															
A=	4															

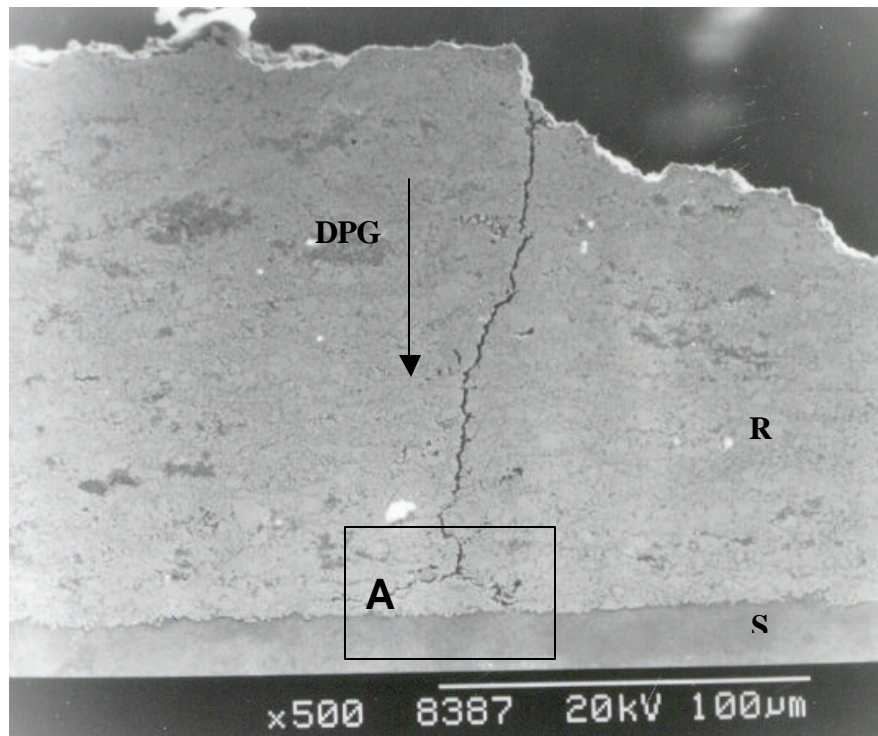


Fig. 11 Fotomicrografía dirección de propagación de la grieta (DPG) desde el recubrimiento (R) hacia el sustrato (S) con bifurcación en el detalle "A" cerca de la zona de la intercara.

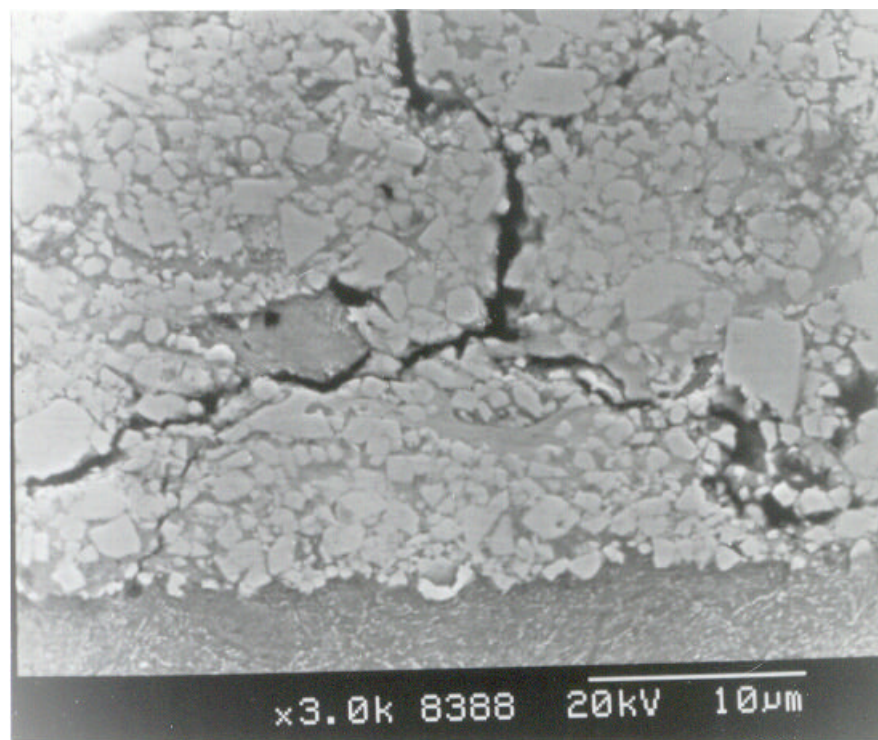


Fig. 12 Fotomicrografía del detalle "A" de la figura 4.

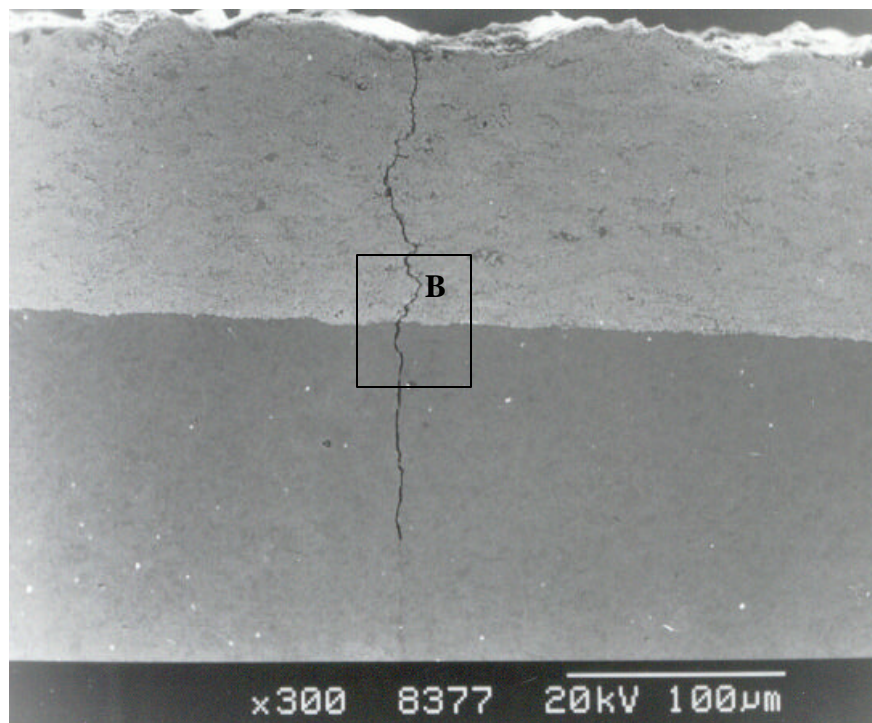


Fig. 13 Fotomicrografía de grieta de fatiga en el recubrimiento y sustrato.

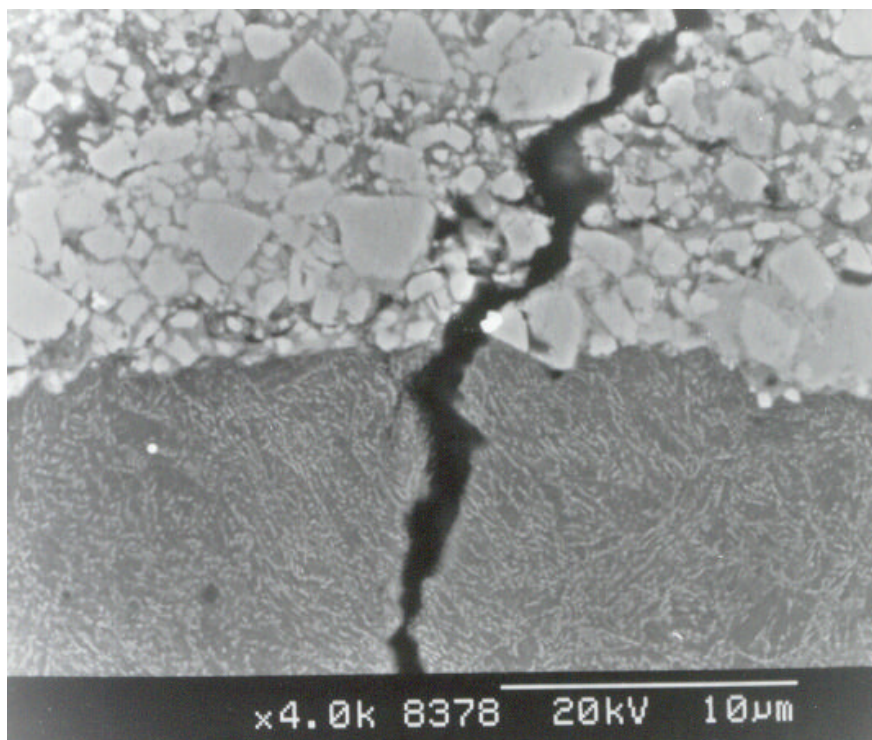


Fig. 14 Fotomicrografía del detalle "B" de la figura 6.

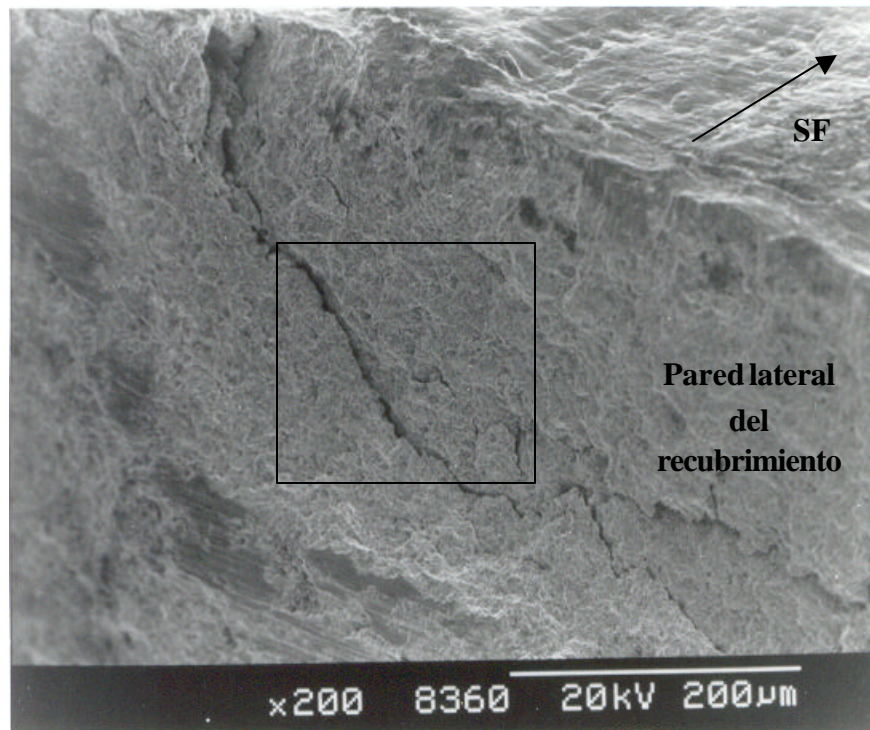


Fig. 15 Fotomicrografía de la delaminación del recubrimiento y grieta en la pared lateral de una probeta ensayada a 669 MPa. Superficie de fractura (SF).

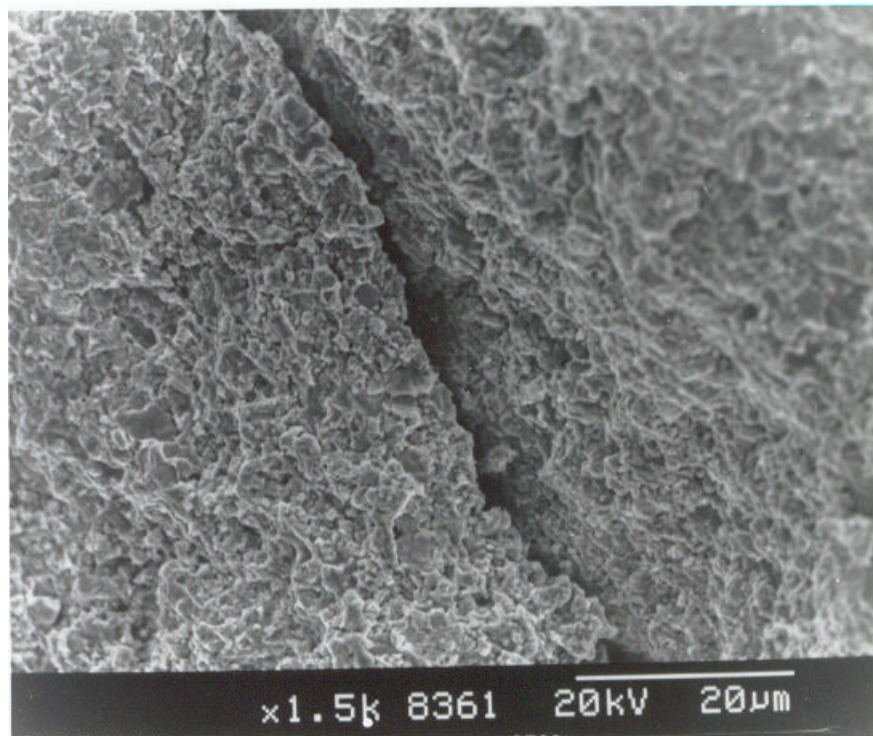


Fig. 16 Fotomicrografía del detalle “A” de la figura 8. Se observa la misma microestructura a ambos lados de la grieta.

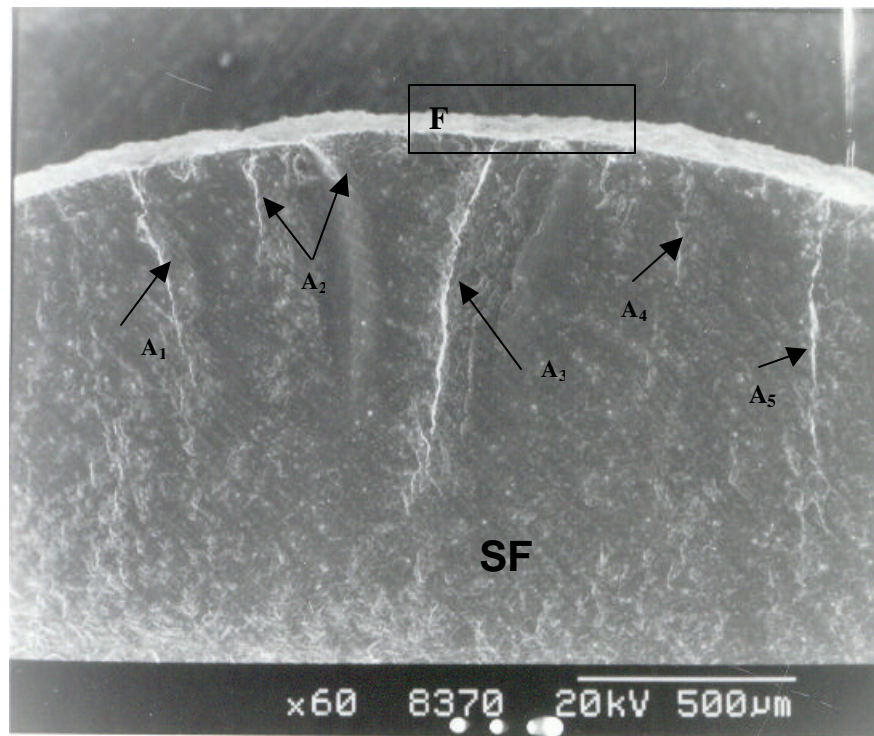


Fig. 17 Fotomicrografía de múltiples escalones de clivaje (A₁- A₅) en la superficie de fractura (SF) y desprendimiento del recubrimiento.

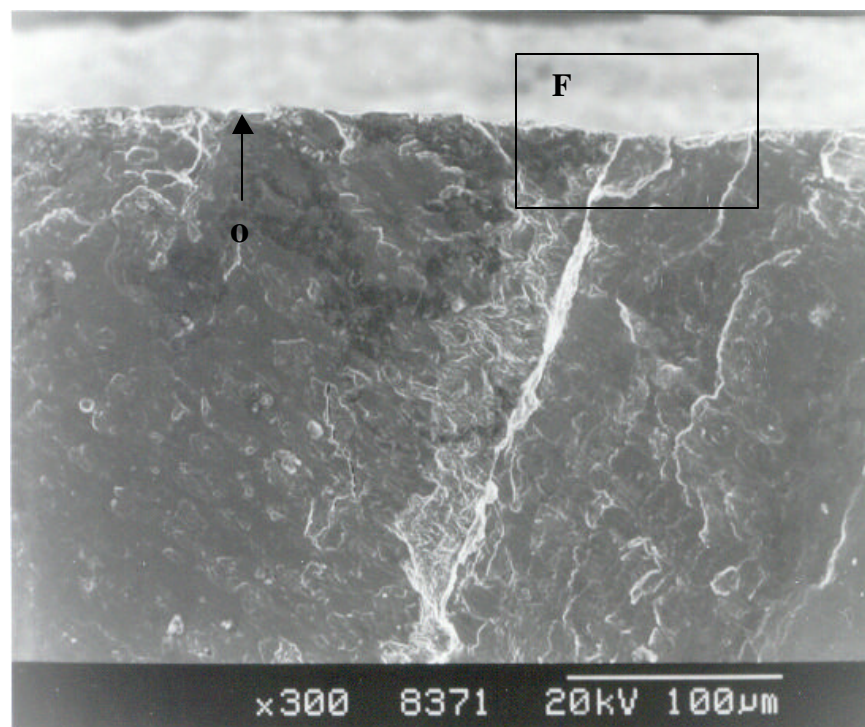


Fig. 18 Fotomicrografía del detalle "F" de la figura 10. También se observa un posible punto de inicio de grieta (o).

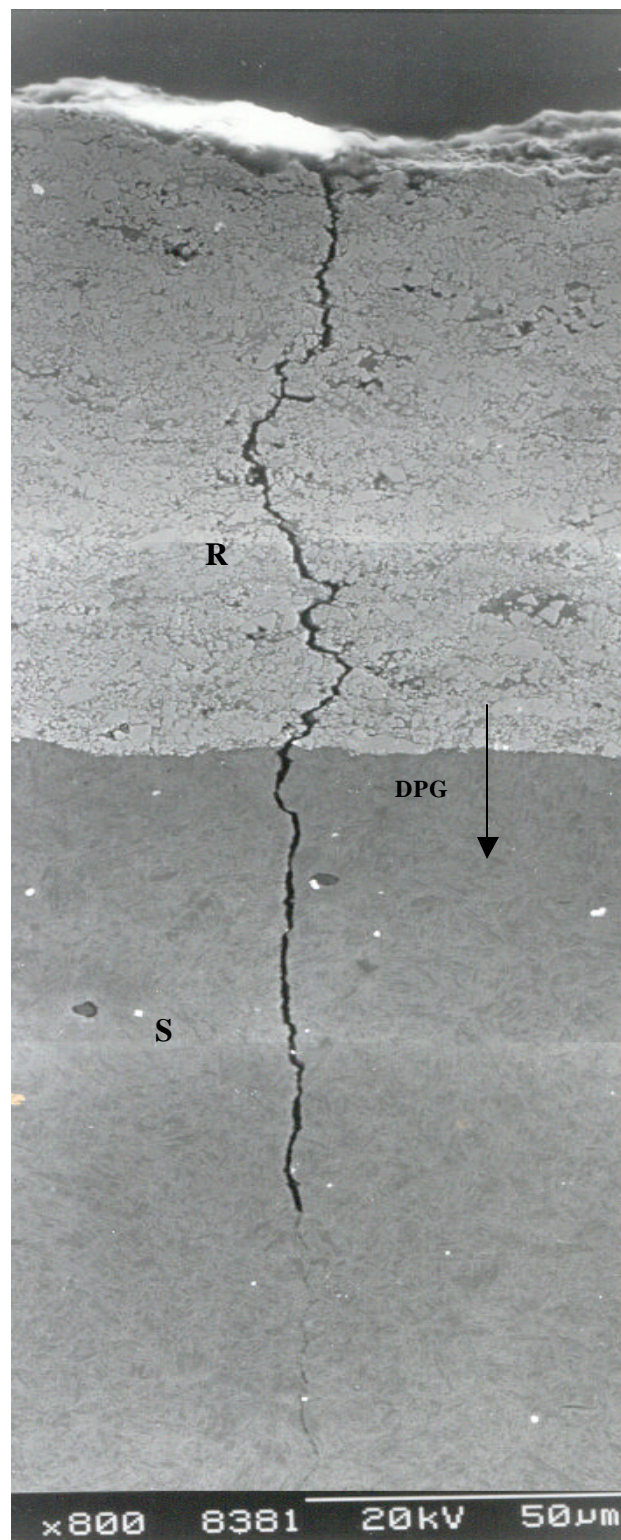


Fig. 19 Mosaico de tres fotomicrografías donde se evidencia el crecimiento de la grieta en el recubrimiento. Se observa la dirección de propagación la de grieta(DPG).

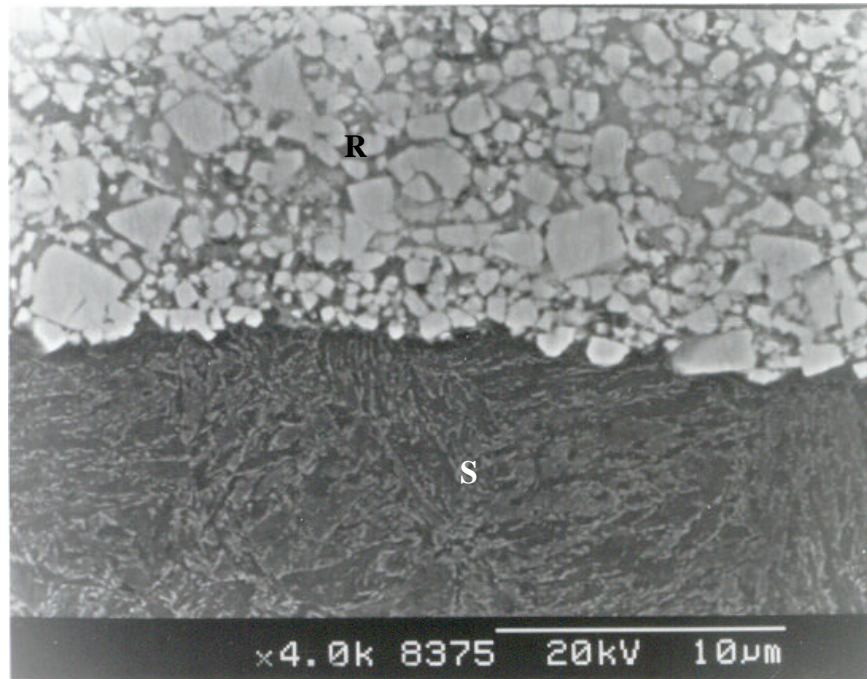


Fig. 20 Fotomicrografía recubrimiento(R)- substrato(S) de una probeta de acero SAE 4340 ensayada a fatiga.

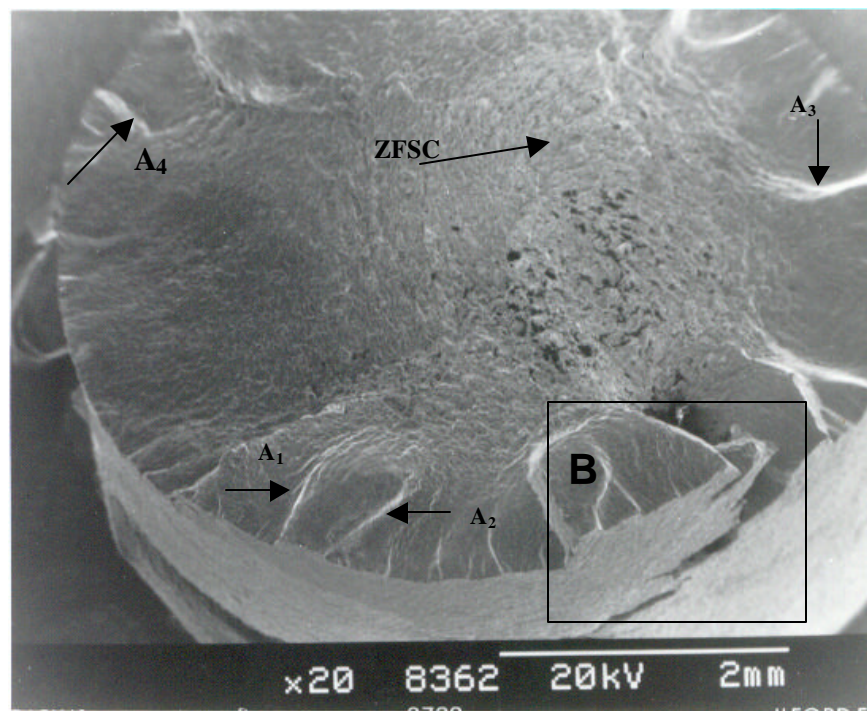


Fig. 21 Fotomicrografía de vista general de una probeta ensayada a 669 MPa. se observan múltiples escalones de clivaje (A_1 , A_2 , A_3 , A_4) en toda la periferia de la superficie de fractura. La zona de falla por sobrecarga (ZFSC) se encuentra en la parte superior derecha de la probeta.

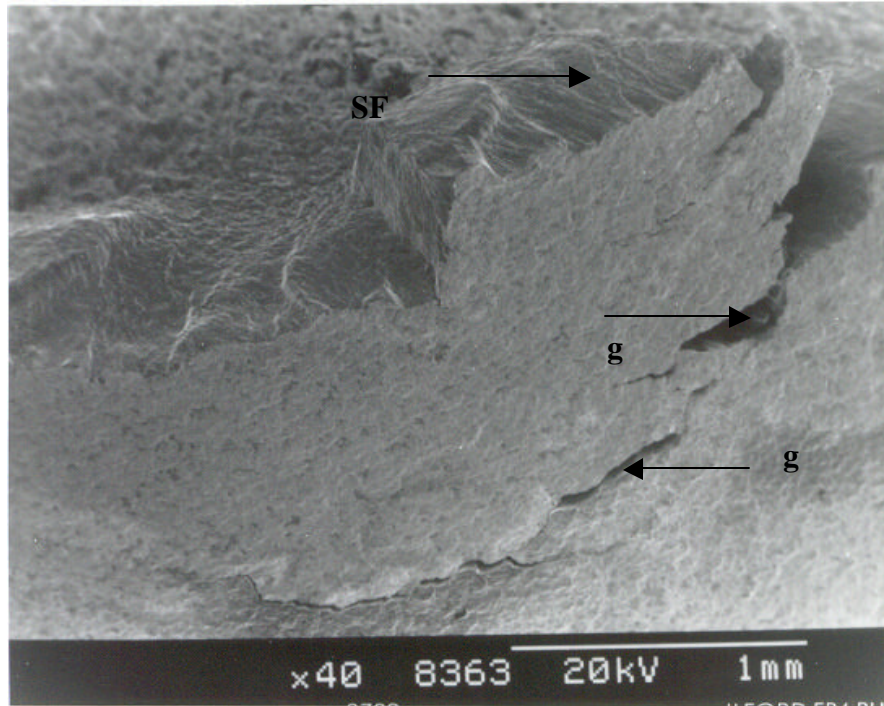


Fig. 22 Fotomicrografía escalón de clivaje detalle "B" figura 14. Se observan grietas (g) paralelas a la superficie de fractura (SF).

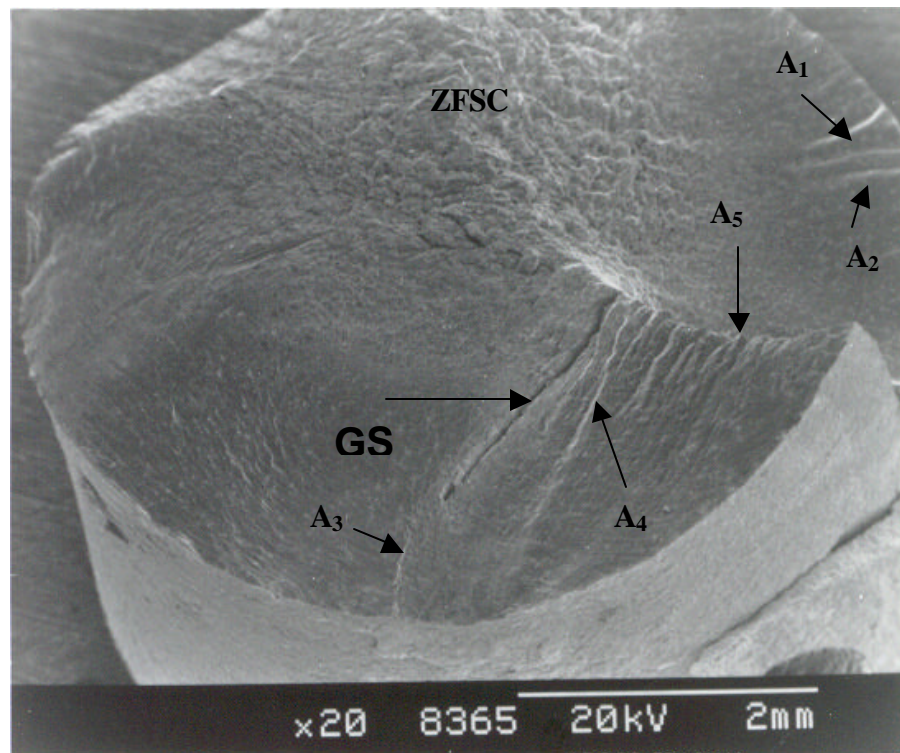


Fig. 23 Fotomicrografía de vista general de una probeta ensayada a 564 MPa. Se observan varios escalones de clivaje (A₁-A₅). Se observa grieta secundaria profunda (GS) y la zona de falla por sobrecarga (ZFSC) se encuentra en la parte superior central.

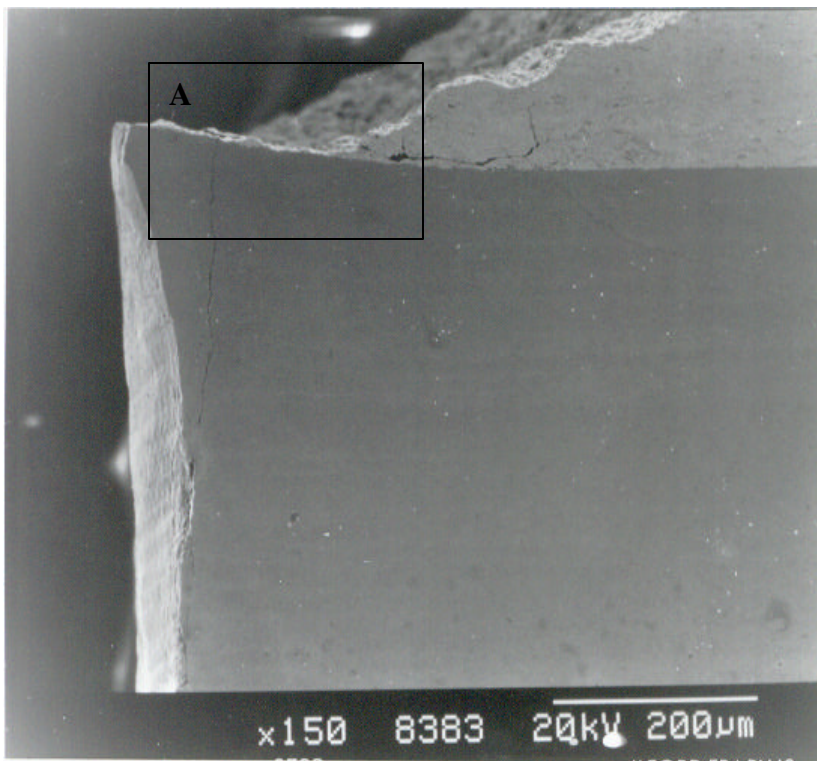


Fig. 24 Fotomicrografía que evidencia en el detalle “A” que el recubrimiento permanece adherido a la superficie del sustrato.

De los resultados obtenidos en el ensayo de tracción se observó, que el depósito de WC- 12%Co produjo una disminución en las propiedades mecánicas estáticas del material en el orden de: 11% σ_y , 14% S_u , 14% σ_u , 2% σ_f .

De los datos obtenidos en los ensayos de fatiga al aire se observó, una disminución significativa de la resistencia a la fatiga del acero respecto al material sin recubrimiento. Esta disminución alcanza un 90% en los ensayos realizados al menor esfuerzo (599 MPa). Los ensayos realizados al mayor esfuerzo (669 MPa), muestran una disminución en la resistencia a la fatiga de un 83% respecto al material sin recubrimiento. Así mismo, el límite de fatiga del material recubierto disminuye un 8%, al pasar de 554 MPa para el material base a 509 MPa del material recubierto. Estos resultados están en contraposición a los reportados previamente por Sartwell and Bretz^[17] , para un acero 4340, que reporta que los recubrimientos por HVOF, “no modifican o incrementan la resistencia a la fatiga del material base”.

En el estudio fractográfico realizado a las probetas recubiertas con un depósito de WC- 12%Co, sometidas a ensayos de fatiga al aire se observó lo siguiente:

En el análisis en microscopía electrónica de barrido (M.E.B), se observó en algunas zonas, la poca cohesión entre las partículas del recubrimiento, evidenciado por el casi total desprendimiento del recubrimiento, en las paredes laterales del las probetas. Esto se observó en las figuras 15 y 17.

También se observaron múltiples inicios de grieta en todas las probetas, como lo evidencian los escalones o mesetas de clivaje que se forman cuando se unen dos frentes de grieta (figuras 21 y 23).

El estudio de las secciones transversales reveló, grietas primarias paralelas a la superficie de fractura, como se observa en la figura 13. Estas grietas se encuentran mayormente en el recubrimiento. Las figuras 11 y 12 muestran que, tales grietas

presentaron ramificaciones en la dirección hacia el interior del sustrato, en la zona cercana a la intercara recubrimiento- sustrato.

En la figura 23, se observa la presencia de una grieta secundaria profunda, que evidencia el gran daño sufrido por el material al ser ensayado a fatiga.

Es de hacer notar, la presencia de escalones de clivaje bastantes significativos observados en las figuras 21 y 23, que son fotomicrografías de muestras ensayadas al más alto y al más bajo esfuerzo respectivamente. El tamaño de estos escalones es debido a que, cuando dos grietas que se encuentran bastante separadas una de la otra, avanzan y luego se unen en la superficie de fractura.

Cabe destacar, que la figura 21 que representa una probeta ensayada en el esfuerzo más alto, presenta un mayor número de inicios de grieta que la probeta ensayada al esfuerzo más bajo, representada en la figura 23.

En todas las muestras analizadas, no se observa el total desprendimiento del recubrimiento, esto se nota en las figuras 18 y 24 donde se observa que una gran parte del recubrimiento se desprendió pero aún se conserva una parte del mismo adherido al sustrato.

En las figuras 11, 13, 19 se observa, los defectos en la superficie del recubrimiento WC-12%Co.

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.

De los resultados obtenidos en los ensayos de tracción realizados tanto al material base como al material recubierto, donde se observó una disminución en las propiedades mecánicas estáticas del material recubierto respecto al sustrato, en un intervalo entre 2 y 14%, dicha disminución podría estar asociada a una posible fractura y desprendimiento del recubrimiento antes que la pieza alcance el esfuerzo de fluencia, esto influye en el conjunto ya que, el recubrimiento no participaría más en la resistencia mecánica del material y la fuerza aplicada estaría actuando en un área menor. No obstante, se puede decir, que a pesar de observar en el recubrimiento una mayor rigidez, esto no afecta sustancialmente el comportamiento del conjunto (recubrimiento- sustrato).

Antes de analizar los resultados de los ensayos de fatiga debemos tomar en cuenta algunos aspectos que afectan el comportamiento a la fatiga de los recubrimientos termorociados.

Algunas variables con respecto a la morfología y tamaño de las partículas es considerada^[19]. Hay dos factores que se relacionan entre sí: la distancia típica de rociado que según D. Cheng^[19] debe ser 0,254m y el tamaño de las partículas. Por ejemplo: por encima de la distancia típica de rociado, las partículas grandes (mayores de 30 μ m) son calentadas con dificultad pero a esas distancias estas experimentan la temperatura máxima.

De forma análoga, ocurre con la velocidad ya que por encima de la distancia de rociado las partículas grandes tienden a alcanzar velocidades más altas, todo esto se debe al mayor momento de inercia que presentan las partículas grandes respecto a las pequeñas (menores de 10 μ m).

Con respecto a la morfología, si la partícula es angular (obtenida por agua o molienda) el choque de esta con la superficie del sustrato, produce más concentradores de esfuerzo,

que son sitios preferenciales para la nucleación de la grieta, que las producidas con partículas esféricas (obtenida por atomización por gas).

La influencia de los esfuerzos residuales internos que presenta el recubrimiento; si estos son de naturaleza compresiva se espera que haya un incremento en la resistencia a la fatiga, por el contrario si son de tracción, el resultado será una disminución en la resistencia a la fatiga. En un estudio realizado a flexión pura ^[20], sobre un depósito de WC- 17%Co, se analizó los esfuerzos residuales por el método de remoción de capas, encontrándose que los mismos eran de naturaleza compresiva sobre un substrato de acero 4130 y otro de aluminio, dando como resultado, un aumento en la resistencia a la fatiga.

Otro factor de importancia, es la presencia o ausencia de defectos en el recubrimiento o en la zona cercana a la intercara recubrimiento- substrato, que permiten la nucleación de la grieta.

Estos factores pueden combinarse de tal manera de obtener un aumento o una disminución en la resistencia a la fatiga de un material recubierto.

De los resultados obtenidos en los ensayos de fatiga del acero SAE 4340 recubierto con un depósito de WC- 12%Co, mostraron una notable disminución de la resistencia a la fatiga respecto al material sin recubrir.

Estos resultados, probablemente están relacionados con la presencia de defectos que presenta el recubrimiento. Esto pudo ser constatado, en el estudio por M. E. B como lo muestran las figuras 10, 12, 18 y 25.

Los múltiples inicios de grieta presentados por todas las muestras analizadas, indican que el recubrimiento actuó como un concentrador de esfuerzo que favorece la nucleación de la grieta en este.

En las secciones transversales se observan grietas paralelas a la superficie de fractura, las cuales aparentemente nuclean en el recubrimiento. Estas grietas, aparentemente tienen un avance preferencial por la matriz del cobalto, ya que esta es más débil. Por otra parte, estas grietas presentaron ramificaciones en dirección a la zona cercana a la intercara recubrimiento substrato. Tal ramificación indica que el origen de la grieta se encuentra en el extremo opuesto, es decir, en la superficie del recubrimiento.

Debido al desprendimiento que presenta el recubrimiento en las paredes laterales de la probeta, se infiere que este no presenta una cohesión adecuada entre sus partículas.

4.- CONCLUSIONES.

1. Las probetas del acero SAE 4340 recubiertas con un depósito de WC- 12%Co de un espesor de 230 μm aproximadamente, presentan una disminución poco significativa en sus propiedades mecánicas estáticas respecto al material sin recubrir. A pesar de observar en el recubrimiento una mayor rigidez, esto no afecta sustancialmente al comportamiento del conjunto (substrato- recubrimiento).
2. Las probetas del acero SAE 4340 recubiertas con un depósito de WC- 12%Co de un espesor de 230 μm aproximadamente, presentan una disminución en la resistencia a la fatiga de un 90% en los ensayos realizados al más bajo de los esfuerzo y una disminución de un 83% en los ensayos realizados al más alto esfuerzo. Esto probablemente puede estar asociado a los defectos en la superficie del recubrimiento, los cuales se convierten en sitios potenciales para la nucleación de grietas de fatiga.
3. En los ensayos realizados para la obtención del límite de fatiga, se obtuvo una disminución poco significativa (8%), al pasar de 554 MPa para el material base a 509 MPa para el material recubierto.
4. La presencia del recubrimiento, induce en el conjunto la nucleación múltiple de las grietas de fatiga en la periferia de la superficie de fractura.
5. La observación de fallas de tipo cohesivas en el recubrimiento, puede ser especulado en términos de que ocurre un sobre calentamiento de las partículas durante el rociado térmico, lo cual probablemente genera oxidación, lo cual induce baja compactación entre las lamelas que conforman la estructura del recubrimiento.

5.- RECOMENDACIONES.

1. Se recomienda un estudio con la superficie maquinada de las muestras, ya que en procesos la pieza no se utiliza como depositado, se aplica un maquinado en la misma para reconstruir dimensiones originales y adicionalmente se mejora significativamente las condiciones superficiales.
2. Con el propósito de evitar un posible sobre calentamiento o un excesivo tiempo de exposición de las partículas en el medio, que trae consigo la oxidación de las partículas, debe hacerse un control preciso en lo referente a la distancia de rociado y a la temperatura máxima de trabajo, para que exista una menor influencia de estos factores en el comportamiento del recubrimiento.
3. Realizar análisis superficiales como por ejemplo: XPS, electrones Auger para establecer con precisión la existencia de óxidos sobre la superficie expuesta luego de la delaminación y así verificar que ciertamente se presentan los problemas debido a una mala praxis en el proceso de deposición.

BIBLIOGRAFIA.

- [1] M. P. Nascimento et al. "Effects of tungsten carbide thermal spray coating by HP/HVOF and hard chromium electroplating on AISI 4340 high strength steel". Surface & Coatings Technology 138 (2001) 113- 124.
- [2] A. Malishev, G. Nikolaiev y Y. Shuvalov. "Tecnología de los Materiales". Editorial Paz. Moscú 1983.
- [3] ASM International, "Materials Handbook, Properties and Selection: Irons, Steels and High Performance Alloys", Vol.1, 10th edition, Ohio (USA) 1994.
- [4] Catalogo de Ferrum. "Nuestros Productos". Caracas. S/F.
- [5] ASM International. "ASM Handbook, Surface Engineering", Vol. 5, 1994.
- [6] G. Dieter. "Metalurgia Mecánica". McGraw- Hill. Madrid 1967.
- [7] P. G. Forrest. "Fatiga de los Metales". Ediciones URMO. Bilbao 1972.
- [8] J. E. Shigley. "Diseño en Ingeniería Mecánica". McGraw- Hill. 5^{ta} Edición. México 1996.
- [9] ASM International. "ASM Handbook, Fatigue and Fracture", Vol. 19, 1997.
- [10] G. Dieter. "Mechanical Metallurgy". McGraw- Hill. Third Edition. 1986.
- [11] ASTM Designation E739- 91, V3 (1) (1997) 594- 600 [Part. 10] "Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress- Life (S- N) and Strain- Life (ϵ - N) Fatigue Data".
- [12] ASTM Designation A370- 96, V1 (2) (1997) 175- 226 [Part. 10] "Standard Test Methods and definitions for Mechanical Testing of Steel Products".
- [13] ASTM Designation E606- 92, V3 (1) (1997) 523- 537 [Part. 10] "Recommended Practice for Constant- Amplitude Low- Cycle Fatigue Testing".
- [14] Instruction Manual, Model RBF- 200 Rotating Beam Fatigue Testing Machine.
- [15] ASM International. "ASM Handbook, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special- Purpose Materials", Vol. 2, 1990.
- [16] ASM International. "ASM Handbook: Friction, Lubrication and Wear Technology", Vol. 18, 6^{ta} edition, 1992.
- [17] B.D. Sartwell, P.E. Bretz, Adv. Mater. Process. 156 (2) (1999) 25- 28.

- [18] J. R. Howes et al. “Thermal Spraying: Processes, Preparation, Coatings and Applications”. Welding Journal, Vol 78, 1994.
- [19] D. Cheng et al. “The effect of particle size and morphology on the In- Flight behavior of particles during high- velocity oxifuel thermal spraying”. Metallurgical and Materials Transactions, vol 32B – N⁰ 3. Junio 2001.
- [20] R. T. R. McGrann et al. “The effect of coating residual stress on the fatigue life of thermal spray- coated steel and aluminum”. Surface & Coatings Technology 108- 109 (1998) 59- 64.
- [21] C. Mariño y M. Ortiz “Estudio de Fatiga y Corrosión Fatiga de un Acero SAE 4140 Recubierto con un Depósito de Cromo Duro” Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencias de los Materiales UCV. Tesis Abril 2001.