

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

***EVALUACIÓN DEL LÍMITE DE RESISTENCIA A LA
FATIGA DE UN ACERO AISI 4340 BONIFICADO
RECUBIERTO CON PELÍCULAS DELGADAS
MULTICAPAS OBTENIDAS POR DEPOSICIÓN
FÍSICA EN FASE DE VAPOR ASISTIDA POR PLASMA***

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por los Bachilleres:
Luis José Hernández Bolívar
Fernando Alfonso Casanova Gondar
Para optar al título de
Ingeniero Mecánico

Caracas, 2004

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

***EVALUACIÓN DEL LÍMITE DE RESISTENCIA A LA
FATIGA DE UN ACERO AISI 4340 BONIFICADO
RECUBIERTO CON PELÍCULAS DELGADAS
MULTICAPAS OBTENIDAS POR DEPOSICIÓN
FÍSICA EN FASE DE VAPOR ASISTIDA POR PLASMA***

Tutor: Prof. Crisanto Villalobos

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por los Bachilleres:
Luis José Hernández Bolívar
Fernando Alfonso Casanova Gondar
Para optar al título de
Ingeniero Mecánico

Caracas, 2004

Caracas 18 de noviembre de 2004.

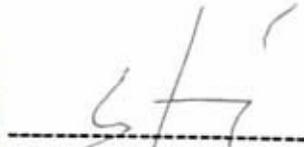
Los abajo firmantes, miembros del jurado designado por el Consejo de la Escuela de Ingeniería Mecánica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por los bachilleres Casanova Gondar, Fernando Alfonso y Hernández Bolívar, Luis José, titulado:

EVALUACIÓN DEL LÍMITE DE RESISTENCIA A LA FATIGA DE UN ACERO AISI 4340 BONIFICADO RECUBIERTO CON PELÍCULAS DELGADAS MULTICAPAS OBTENIDAS POR DEPOSICIÓN FÍSICA EN FASE DE VAPOR ASISTIDA POR PLASMA.

Consideran que los mismos cumplen con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Mecánico.


Prof. Alberto Pertuz
Jurado


Prof. Crisanto Villalobos
Tutor Académico


Prof. Andrea Scagni
Jurado

CASANOVA GONDAR, FERNANDO /Y/HERNÁNDEZ BOLÍVAR, LUIS JOSÉ.

EVALUACIÓN DEL LÍMITE DE RESISTENCIA A LA FATIGA DE UN ACERO AISI 4340 BONIFICADO RECUBIERTO CON PELÍCULAS DELGADAS MULTICAPAS OBTENIDAS POR DEPOSICIÓN FÍSICA EN FASE DE VAPOR ASISTIDA POR PLASMA

Tutor: **Prof. Crisanto J. Villalobos G.**

Tesis. Caracas. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería.

Escuela de Ingeniería Mecánica. 2004.

Palabras claves: Límite de Fatiga, Películas Delgadas, PAPVD

En el presente trabajo se evaluó el Límite de Fatiga a flexión rotativa de un acero AISI 4340 templado y revenido recubierto con películas delgadas del tipo multicapa denominada Balinit Futura (TiAlN/TiN) y del tipo bicapa denominada Balinit Hardlube (TiAlN/WC/C), mediante la técnica PAPVD en específico *Arc Enhanced Magnetron Sputtering*. Se mecanizaron 46 probetas según las normas ASTM A 370 y ASTM E 606 para ensayos de tracción y de fatiga, respectivamente. Se realizaron los ensayos de Fatiga para los dos recubrimientos. Los valores de esfuerzo para la evaluación del Límite de Fatiga fueron de 575 Mpa como valor inicial máximo para ambos recubrimientos, con escalones sucesivos de 5 Mpa, y como valor mínimo de 560 Mpa para Balinit Futura y de 545 MPa para Balinit Hardlube. El cálculo del Límite de Fatiga se realizó mediante el método estadístico denominado "Método de la Escalera". Se evaluaron superficialmente muestras cilíndricas para determinar la dureza compuesta del conjunto recubrimiento-substrato así como también del substrato tanto en estado de entrega (Bonificado), como a la salida del reactor, mediante un Microdurómetro Vickers utilizando un barrido de cargas de: 1000 500, 300, 200, 100, 50 y 25 gramos. De los resultados obtenidos de dureza, entre otras cosas lo más importante es que se determinó que el proceso de deposición no provoca ningún efecto sobre la microestructura del material base. Los resultados de los ensayos de tracción muestran un leve aumento de las propiedades mecánicas en un 4,67 % en el Esfuerzo de Fluencia y un 4,17 % en La resistencia a la tracción para el conjunto substrato-Balinit Futura mientras que para el conjunto substrato-Balinit Hardlube los aumentos estuvieron en el orden de 4,88 % del esfuerzo de fluencia y 5,44 % de la resistencia a la tracción, en comparación con el material sin recubrimiento. En los ensayos de fatiga se encontró un aumento de 13,47% y 11,02% en el Límite de Resistencia a la Fatiga del acero recubierto con Balinit Futura y Balinit Hardlube respectivamente, en comparación con el acero sin recubrimiento. Adicionalmente del análisis fractográfico se pudo inferir algunos aspectos relacionados con el proceso de fractura producto del ensayo. Se encontró que las probetas presentan múltiples zonas de inicio de grieta por fatiga. Derivado de este análisis se puede verificar el mecanismo de nucleación y crecimiento de la grieta por fatiga, se observó que para el Balinit Futura, la nucleación de las grietas se originaba en los poros, mientras que para el Balinit Hardlube la nucleación se iniciaba en la intercara WC/C-TiAlN.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
Objetivo General	2
Objetivos Específicos.....	2
Alcances	3
1.- MARCO TEÓRICO.....	5
1.1.- CARACTERÍSTICAS DEL ACERO AISI 4340.....	5
1.1.1.- Influencia de Los Elementos de Aleación en Las Propiedades del Acero	5
1.1.2.- Aleación	6
1.1.3. –Características	7
1.1.4. - Aplicaciones.....	8
1.2.- FATIGA.....	8
1.2.1- Reseña Histórica	8
1.2.2. - Conceptos Básicos	9
1.2.2.1- Fatiga.....	9
1.2.2.2.- Resistencia y Vida a la Fatiga.....	11
1.2.2.3.- Curva de Wöhler	11
1.2.2.4.- <i>Esfuerzos Cíclicos</i>	13
1.2.2.5.- Esfuerzos Residuales	15
1.2.3.-Teorías sobre la Fatiga.....	16
1.2.4.- Factores que afectan a la Fatiga.....	18
1.2.5.- Mecanismos de Fractura	22
1.2.5.1.- Características Microscópicas de la Fractura por Fatiga.....	23
1.2.5.2.- Características Macroscópicas de la Fractura por Fatiga	29

1.2.6.- Límite de Fatiga.....	31
1.2.7.- Método de la Escalera.....	35
1.3.- PROCESO DE DEPOSICIÓN	37
1.3.1.- Deposición Física en Fase de Vapor (PVD).....	39
1.3.1.1.- Deposición Física en Fase de Vapor Asistida por Plasma (PAPVD)	41
1.3.1.2.- Técnicas derivadas de los Procesos Físicos en Fase de Vapor	53
1.3.1.2.1.- Procesos de evaporación.....	53
1.3.1.2.2.- Procesos de Sputtering.....	54
1.3.1.2.3.- Ion Plating.....	58
1.4.- RECUBRIMIENTOS	63
1.4.1. BALINIT HARDLUBE	65
1.4.2. BALINIT FUTURA.....	66
2.- DESARROLLO EXPERIMENTAL	68
2.1.- MAQUINADO DE LAS PROBETAS Y DE ESPECIMENES.....	68
2.2.- DIMENSIONADO DE LAS PROBETAS	69
2.2.1.- Probetas de fatiga.....	69
2.2.2.- Probetas de tracción	70
2.2.2.- Probetas de dureza	71
2.3.- DEPOSICIÓN DE LOS RECUBRIMIENTOS	71
2.4.- ENSAYOS	72
2.4.1.- Ensayos de Fatiga	72
2.4.2.- Ensayos de Tracción	76
2.4.3.- Ensayo de Dureza	79
2.5.- ESTUDIO FRACTOGRÁFICO.....	81

3.- ANÁLISIS DE RESULTADOS	84
3.1.- ENSAYOS DE DUREZA	84
3.2.- ENSAYOS DE TRACCIÓN	89
3.3.- ENSAYOS DE FATIGA.	91
3.4.- ESTUDIO FRACTOGRÁFICO.....	95
CONCLUSIONES	100
RECOMENDACIONES	102
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	103

INTRODUCCIÓN

Actualmente la aplicación de la tecnología de recubrimientos ha pasado a ser de vital importancia para mejorar el rendimiento asociados a las propiedades de naturaleza superficial como pueden ser la estabilidad química a altas temperaturas y la durabilidad de elementos de máquinas. A partir de aquí se investiga las propiedades mecánicas de estos materiales, para así mejorar la estructura de costos para quienes aplican esta tecnología. No obstante, estas mejoras, en un número considerable de casos inciden en el deterioro de otras propiedades mecánicas relacionadas con el comportamiento global del espécimen, sobre todo, las relacionadas con condiciones de servicio que involucran la existencia de cargas cíclicas.

Nuestro estudio se basará en el cálculo del límite de resistencia a la fatiga de un acero Cromo-Níquel-Molibdeno de tipo microaleado, mediante la aplicación de un método estadístico, llamado método de la escalera. Este acero será recubierto con dos películas distintas, aplicadas por el método PAPVD (Deposición física en fase de vapor asistida por plasma), en específico *Magnetron Sputtering Ion Plating*, las cuales aportan un alto rendimiento en su desempeño en operaciones que requieren de alta dureza, buen comportamiento al desgaste, estabilidad química a elevadas temperaturas, por enumerar algunas propiedades de tipo superficial en las que aplica este tipo de tecnología.

Al conocer el límite de resistencia a la fatiga de este conjunto substrato recubrimiento, se podrá incrementar substancialmente el esfuerzo máximo que se puede aplicar al elemento de máquina en específico, y así poder obtener de éste, vida infinita.

Como objetivos de esta investigación se ha propuesto lo siguiente:

Objetivo General

Evaluar el límite de resistencia a la fatiga de un acero AISI 4340 bonificado (templado y revenido), cuando es recubierto con películas delgadas multicapas de Carburo de Tungsteno (WC/C), y Nitruro de Titanio al Aluminio (TiAlN), conocido comercialmente como Balinit Hardlube y de Nitruro de Titanio (TiN) y Nitruro de Titanio al Aluminio (TiAlN), conocido comercialmente como Balinit Futura, obtenidos por deposición física en fase de vapor asistida por plasma.

Para garantizar el cumplimiento de este objetivo general, se ha planteado desarrollar la consecución de actividades parciales u objetivos específicos:

Objetivos Específicos

- Determinar las propiedades mecánicas estáticas del material base y el material base con ambos recubrimientos específicamente resistencia a la tracción, esfuerzo de fluencia y dureza compuesta.
- Determinar el límite de resistencia a la fatiga del acero AISI 4340 bonificado, recubierto con Balinit Hardlube, empleando el método de la escalera.
- Determinar el límite de resistencia a la fatiga del acero AISI 4340 bonificado, recubierto con Balinit Futura, empleando el método de la escalera.

- Evaluación fractográfica de los especímenes a través de la técnica de microscopia electrónica de barrido, a fin de establecer los mecanismos de propagación de la grieta como consecuencia de la solicitud mecánica aplicada en el ensayo, para muestras fracturadas y no fracturadas.
- Comparar los valores de los límites de resistencia a la fatiga obtenidos como resultado de los ensayos realizados.

Finalmente dentro de los alcances propuestos, tenemos los siguientes.

Alcances

- Construir las curvas esfuerzo-deformación real, a partir de ensayos de tracción en carga axial, determinando a partir de estas curvas: Esfuerzo real a carga máxima y esfuerzo de fluencia.
- Construir la curva limite de fatiga para el acero AISI 4340 bonificado, recubierto con Balinit Hardlube, como una línea horizontal que coincide con el valor del menor esfuerzo donde ocurre el evento de menor frecuencia, siendo éste considerado como el esfuerzo limite.
- Construir la curva limite de fatiga para el acero AISI 4340 bonificado, recubierto con Balinit Futura, como una línea horizontal que coincide con el valor del menor esfuerzo donde ocurre el evento de menor frecuencia, siendo éste considerado como el esfuerzo limite.
- Estudio de las superficies de fractura estableciendo los potenciales puntos de nucleación de la grieta y forma de avance de la misma a través del conjunto substrato recubrimiento tratando de inferir los mecanismos de falla que prevalecen en el proceso.

- Construcción de las Curvas Dureza vs. Inverso de la Diagonal Promedio y Carga aplicada vs. Diagonal promedio, para el acero AISI 4340 bonificado.
- Construcción de las Curvas Dureza vs. Profundidad Relativa de Indentación para el conjunto con Balinit Hardlube y el conjunto con Balinit Futura.
- Tratar de calcular a partir de los datos de dureza compuesta, los valores absolutos de esta propiedad en los recubrimientos cerámicos aplicados.

1.- MARCO TEÓRICO

1.1.- CARACTERÍSTICAS DEL ACERO AISI 4340_[5] :

El acero al AISI 4340 (cromo-níquel-molibdeno), se utiliza para la fabricación de elementos de máquinas sometidos a grandes esfuerzos cíclicos y/o estáticos.

La primera cifra de la designación 4340, indica el tipo de acero (elemento de aleación principal), el segundo dígito indica el porcentaje (%) en peso aproximado del elemento de aleación principal, y los dos últimos dígitos proporcionan el contenido medio de carbono en porcentaje en peso (%).

El acero AISI 4340 es conocido por su capacidad para alcanzar una alta resistencia al ser tratado térmicamente, presenta tanto una alta resistencia a la fatiga como también elevada ductilidad y tenacidad. Este acero es considerado como un estándar con el cual se comparan otros aceros de alta resistencia mecánica.

1.1.1.- Influencia de Los Elementos de Aleación en Las Propiedades del Acero_[18]:

- **Cromo:**

Es uno de los elementos especiales más empleados para la fabricación de aceros aleados, usándose indistintamente en los aceros de construcción, en los de herramientas, en los inoxidable y los de resistencia en caliente. Se emplea en cantidades diversas desde 0.30 a 30, según los casos y sirve para aumentar la dureza y la resistencia a la tracción de los aceros, mejora la templabilidad, impide las deformaciones en el temple, aumenta la resistencia al desgaste, la resistencia a la corrosión, etc.

- **Níquel:**

Una de las ventajas más grandes que reporta el empleo del níquel, es evitar el crecimiento del grano en los tratamientos térmicos, lo que sirve para producir en ellos gran tenacidad. El níquel además hace descender los puntos críticos y por ello los tratamientos pueden hacerse a temperaturas ligeramente más bajas que la que corresponde a los aceros ordinarios. Experimentalmente se observa que con los aceros aleados con níquel se obtiene para una misma dureza, un límite de elasticidad ligeramente más elevado y mayores alargamientos y resistencias que con los aceros al carbono o de baja aleación.

- **Molibdeno:**

Mejora notablemente la resistencia a la tracción, la templabilidad y la resistencia al “creep” de los aceros.

El molibdeno se disuelve en la ferrita, pero tiene una fuerte tendencia a formar carburos. Es un potente estabilizador de los carburos complejos y tiende a retardar el ablandamiento de los aceros, durante el revenido. Aumenta también la resistencia de los aceros en caliente y reemplaza al tungsteno en la fabricación de los aceros rápidos, pudiéndose emplear para las mismas aplicaciones aproximadamente una parte de molibdeno por cada dos de tungsteno.

1.1.2.- Aleación:

El acero AISI 4340 posee alta resistencia a la tracción y torsión, muy buena resistencia al desgaste y al impacto. Se suministra en estado bonificado, es decir templado y revenido, lo que permite en la mayoría de los casos su

aplicación sin necesidad de tratamiento térmico posterior. Es utilizado a temperaturas de hasta 773 K, sin perder su estado bonificado.

En la tabla 1.1, se presenta la composición química del acero AISI 4340, obtenida de la literatura, el cual considera que cantidades pequeñas de ciertos elementos que no están especificados o que no son requeridos pueden estar presentes en los aceros aleados. Estos elementos son considerados como impurezas y se aceptan en ciertas cantidades, por ejemplo para el acero AISI-SAE 4340 se permite una cantidad de Cobre (Cu), de hasta un 0.35% en peso.

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Fe
0.38-0.43	0.15-0.35	0.60-0.80	0.035	0.15-0.35	0.70-0.90	1.65-2.00	0.20-0.30	Balance

Tabla 1.1. Composición química del acero AISI 4340, expresada en % en peso. [5]

1.1.3. –Características:

A continuación se presentan algunas de las características mecánicas y físicas más importantes del acero AISI 4340:

Estado de entrega	Bonificado
Mecanizado	Con buriles de acero rápido
Resistencia a la tracción (Mpa)	833,54 – 1127,7
Límite de fluencia (Mpa)	637,4 – 735,47
Alargamiento mínimo (%)	15
Contracción mínimo (%)	55
Dureza Brinell (HB)	340

Tabla 1.2. Características mecánicas del AISI 4340. [16]

Densidad (g/cm³)	7,75
Gravedad Específica	7,8
Punto de Fusión (°C)	1426,66
Modulo de Elasticidad (MPa)	210.000

Tabla 1.3. Características Físicas del AISI 4340.^[19]

1.1.4. - Aplicaciones:

El acero al Cromo-Níquel-Molibdeno, es utilizado en partes de maquinarias sometidas a muy altas cargas dinámicas, por ejemplo: cigüeñales, ejes de leva, árboles de transmisión, barras de torsión, ejes de cardán, ejes de bombas, ejes para hélices de aviones, pernos y tuercas a alta carga de tracción, rodillos de transportadores, vástagos y pines, muñones, brazos de dirección, engranajes, discos de embragues, piezas de chasis, acoples, ejes de piñones, ruedas dentadas, moldes para inyección de plástico.^[16]

1.2.- FATIGA

1.2.1- Reseña Histórica

El descubrimiento de la fatiga ocurrió en los años 1800, cuando distintos investigadores europeos observaron que tanto los puentes como los componentes de las vías férreas se agrietaban cuando eran sometidas a cargas repetidas. Con el progreso del siglo y la expansión del uso de los metales, además del aumento del uso de éste en las máquinas, mayor cantidad de fallas por cargas repetidas fueron reportadas. A mediados de ese siglo A. Whöler propuso un método mediante el cual se disminuía y en algunos casos se eliminaba la falla de los componentes sometidos a cargas cíclicas o repetidas.

Este método resultó en la construcción del diagrama Esfuerzo - N° de ciclos, actualmente conocido como el Diagrama S-N, o Curva de Whöler.

Las primeras fallas por cargas repetidas fueron reportadas en componentes como tuberías de arcilla y estructuras de concreto y madera, pero con los requerimientos de más máquinas con componentes metálicos a finales de 1800, se estimuló la necesidad de desarrollar procedimientos de diseño que previeran las fallas por aplicación de carga repetida en todos los tipos de equipos.

Hasta principios del siglo pasado no se tenía un gran conocimiento acerca de la física básica de la fatiga. Sin embargo, con el avance del entendimiento y desarrollo de la tecnología de materiales a lo largo de ese siglo, se ha logrado obtener una mejor comprensión de los efectos causados por la aplicación de cargas repetidas.

A partir de 1850 es reconocido que un material sometido a esfuerzos repetidos o fluctuantes fallará a un esfuerzo mucho más bajo que el necesario para producir la fractura en una sola aplicación de carga, a estas fallas se les conoció con el nombre de fallas por fatiga. Posteriormente se ha estudiado este mecanismo de fractura y en la actualidad se ha llegado a afirmar que el 90% de todas las fallas reportadas en maquinarias en servicio se deben al mecanismo de fatiga.

1.2.2. - Conceptos Básicos

1.2.2.1- Fatiga:

Por definición, la fatiga es el cambio estructural, progresivo, localizado y permanente que ocurre en materiales sometidos a cargas cíclicas y deformaciones fluctuantes a un esfuerzo nominal cuyo valor máximo es

inferior al esfuerzo de fluencia estático del material. La fatiga puede culminar en grietas y causar la fractura después de un número suficiente de fluctuaciones. [1]

Las fracturas por fatiga son causadas por la acción simultánea de esfuerzos cíclicos, esfuerzos de tensión y deformación plástica. Si uno de estos tres no está presente, la falla por fatiga no se iniciará ni se propagará. Los esfuerzos cíclicos inician la grieta y los esfuerzos de tensión producen la propagación de la grieta. Cabe destacar que los esfuerzos de compresión no causarán fatiga, pero las cargas de compresión sí pueden provocarla.

El proceso de falla por fatiga puede dividirse en cinco etapas:

1. Deformación plástica, previa al inicio de la grieta por fatiga.
2. Inicio de una o más microgrietas.
3. Propagación o unión de microgrietas para formar una o más macrogrietas.
4. Propagación de una o más macrogrietas.
5. Falla final o fractura. [1]

Normalmente la falla por fatiga se produce sin presentar ningún tipo de indicativo previo que permita evitarla. La superficie de fractura suele ser, normal al eje de esfuerzo de tracción principal y pueden ser reconocidas generalmente por el aspecto de dicha superficie, que presenta dos regiones relativamente bien diferenciadas, una región lisa, debida al frotamiento que ocurre cuando se propaga la grieta a través de la sección de la pieza, y otra región rugosa, originada por la fractura catastrófica del material debida a la disminución del área efectiva de la sección.

1.2.2.2.- Resistencia y Vida a la Fatiga:

La *Resistencia a la Fatiga* se define como el valor máximo del esfuerzo alternante o fluctuante, que podrá resistir sin fallar un material para un número dado de ciclos. [10]

El procedimiento para determinar la resistencia a la fatiga es ensayar un número de probetas similares, sometiendo cada una a un valor particular de carga fluctuante o alternante hasta su ruptura; así se obtiene una relación entre la carga o esfuerzo fluctuante (S), y el número de ciclos para la fractura (N). Se ha determinado que es preferible ensayar las muestras a partir de un número limitado de esfuerzos, que ensayar la misma cantidad de muestras en una mayor cantidad de niveles de esfuerzos, de esta forma se pueden obtener resultados con una menor dispersión.

La *Vida a la Fatiga* de cualquier espécimen o estructura es el número de ciclos de esfuerzo o deformación requeridos para causar su falla [10]. Este número depende de muchas variables, incluyendo nivel de esfuerzo, estado de esfuerzo, amplitud o forma de la onda de esfuerzo cíclica, medio ambiente y condición metalúrgica del material. Pequeños cambios en el espécimen o en las condiciones del ensayo pueden afectar significativamente el comportamiento de la fatiga, haciendo más difícil el análisis de éste.

1.2.2.3.- Curva de Wöhler:

La forma más recomendada para representar ordenadamente todos los datos obtenidos de los ensayos y pruebas de fatiga, y de esta forma obtener una rápida visualización de los resultados y principales propiedades del material, es por medio de las *curvas de Wöhler o curvas S-N* (Figura 1.1). Esta

representa la duración de la probeta, expresada en número de ciclos hasta la ruptura (N), para la máxima tensión aplicada.

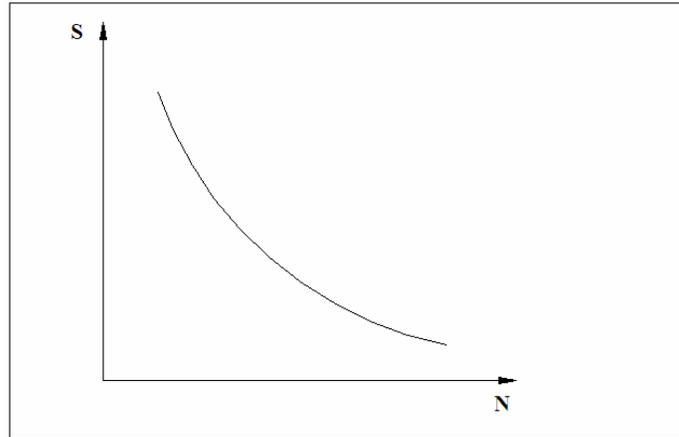


Figura 1.1. Curva de Wöhler o Curva de S-N.

La *curva S-N* también suele ser representada en escala doble logarítmica para mayor comodidad, colocando el logaritmo decimal de los esfuerzos alternantes ($\log S$) en el eje de las abscisas, contra el logaritmo decimal del número de ciclos a falla ($\log N$), transformando de esta manera la curva en una línea recta (Figura 1.2), la cual es expresada mediante la ecuación sugerida por Basquin.^[15]

Ecuación de Basquin:

$$S_a = S'_f (2N)^b \quad (\text{Ecuación 1.1})$$

Donde S_a es la resistencia a la fatiga del material; S'_f representa el coeficiente de resistencia a la fatiga, b representa el exponente de fatiga, $2N$ el número de reversos a falla o también puede ser representada por una ecuación potencial simple:

$$S_a = S_f (N)^b \quad (\text{Ecuación 1.2})$$

Donde, S_a es la resistencia a la fatiga del material, S_f sería el coeficiente de resistencia a la fatiga, N el número de ciclos y b el exponente de fatiga.

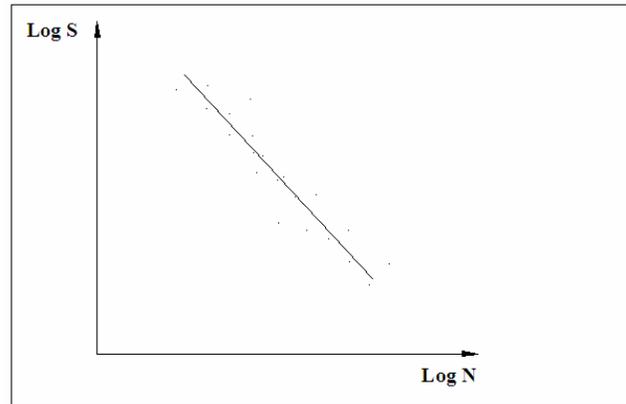


Figura 1.2. Curva S-N doble logarítmica.

1.2.2.4.- Esfuerzos Cíclicos:^[9]

Existen tres tipos principales de esfuerzos fluctuaciones de tensión capaces de producir de fatiga, estos son los siguientes:

- *Ciclo de Inversión completa:* éste es el caso ideal que produce una máquina de ensayo de viga rotativa, y que se aproxima a las condiciones observadas en el servicio para el caso de un árbol giratorio que trabaje a velocidad constante y sin sobrecargas. En este tipo de ciclos de esfuerzos, el esfuerzo máximo ($S_{\max} = S_a$), es igual al esfuerzo mínimo ($S_{\min} = S_a$).

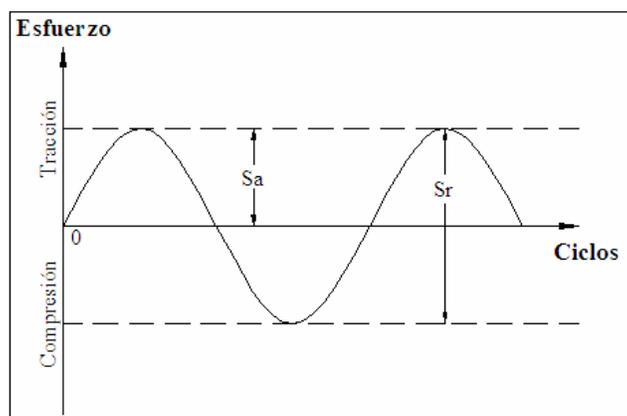


Figura 1.3. Ciclo de Inversión Completa.

- *Ciclo de Tensión Repetida*: este ciclo se caracteriza porque el esfuerzo máximo y el esfuerzo mínimo no son iguales. Ambos son de tracción, pero en este ciclo se puede tener por igual, esfuerzos máximos y mínimos de signos opuestos o ambas de compresión.

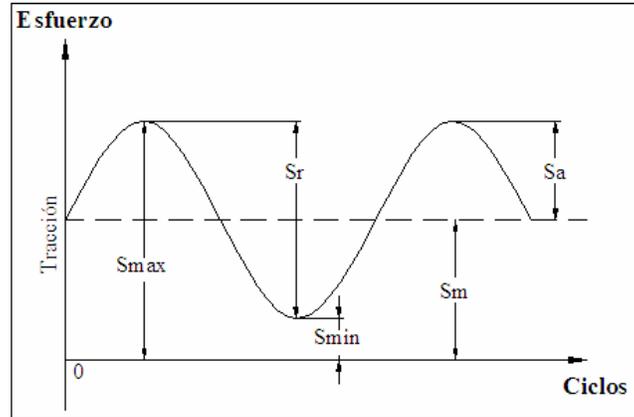


Figura 1.4. Ciclo de Tensión Repetida.

- *Ciclo de Tensión Irregular o Aleatoria*: en este caso los esfuerzos producidos para un ciclo de carga, no siguen un patrón ordenado. Generalmente son producidos por cargas periódicas imprevisibles.

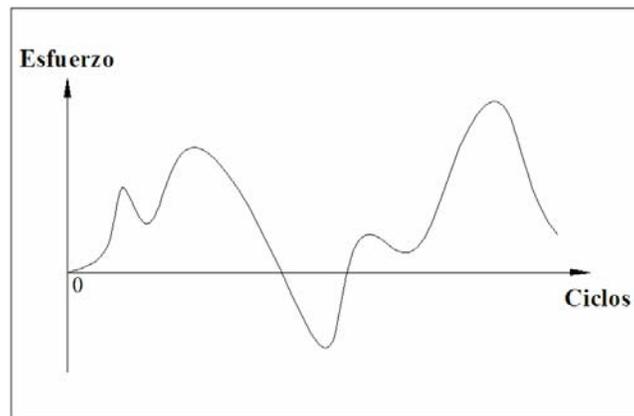


Figura 1.5. Ciclo de Tensión Irregular o Aleatoria.

Estos ciclos de esfuerzos están constituidos por dos componentes: un esfuerzo medio o estacionario (S_m), y otro alterno o variable (S_a); también se debe considerar el intervalo de esfuerzos (S_r).

Podemos expresar este intervalo de esfuerzos como:

$$S_r = S_{\max} - S_{\min}$$

De igual forma podemos expresar el esfuerzo alterno como la mitad de este intervalo:

$$S_a = \frac{S_r}{2}$$

Por otro lado, el esfuerzo medio es la media algebraica entre el esfuerzo máximo y el mínimo:

$$S_m = \frac{S_{\max} + S_{\min}}{2}$$

Otra cantidad que se emplea algunas al representar los datos de fatiga, es la relación de esfuerzos R, y se define como:

$$R = \frac{S_{\min}}{S_{\max}}$$

Es importante resaltar que estas ecuaciones no son válidas para ciclos de esfuerzos irregulares o aleatorios.

1.2.2.5.- Esfuerzos Residuales:

Los esfuerzos o tensiones residuales o internos constituyen el sistema de esfuerzos que pueden existir en un cuerpo cuando está libre de la acción de fuerzas externas. Los esfuerzos residuales se producen cuando un cuerpo sufre deformación plástica no uniforme. En general, el signo del esfuerzo residual

producido por deformación no homogénea será opuesto al de la deformación plástica que lo produjo.^[9]

El sistema de esfuerzos residuales existentes en un cuerpo debe estar en equilibrio estático, por lo que la fuerza total que actúe sobre cualquier plano que atraviese el cuerpo y el momento total de las fuerzas en cualquier plano deben ser nulos.

Los esfuerzos residuales sólo pueden ser elásticos. El valor máximo que llega a alcanzar estos esfuerzos, es el límite elástico del material. Un esfuerzo que sobrepase este valor, sin fuerza externa oponente, disminuiría automáticamente hasta alcanzar el valor de dicho límite.

Es importante distinguir entre macrotensiones y microtensiones residuales, ya que las macrotensiones varían continuamente a través del cuerpo y actúan sobre regiones grandes comparadas con las dimensiones atómicas, mientras que las microtensiones actúan sobre regiones a veces sólo de unas cuantas células unidad, aunque pueden extenderse en la mayor parte de un grano.

1.2.3.-Teorías sobre la Fatiga

Teoría de Orowan:^[9] esta teoría predice la forma general de las curvas de Wöhler, pero no se basa en ningún mecanismo específico de deformación, sino en el concepto general de que la deformación por fatiga es heterogénea. Orowan demostró que para ciclos repetidos de amplitud de tensión constante, las regiones plásticas experimentarían un aumento de tensión y una disminución de la deformación, como consecuencia del progresivo endurecimiento por deformación localizado. Demostró además, que la

deformación plástica total (suma de deformaciones positivas y negativas), converge hacia un valor finito cuando el número de ciclos crece indefinidamente. Este valor límite de la deformación plástica total aumenta con el incremento de la tensión aplicada a la probeta. La existencia de un límite de fatiga se basa en el hecho de que, por debajo de una tensión determinada, la deformación plástica total no puede alcanzar el valor crítico necesario para la fractura. Sin embargo, si la tensión es tan grande que la deformación plástica total excede el valor límite, se forma una grieta, la cual produce concentraciones de esfuerzos y así se forma una región plástica localizada en la que se repite el proceso, y éste se repetirá hasta producir la ruptura mediante el crecimiento de dicha grieta. Esta teoría, en esencia, supone que el endurecimiento por deformación localizado consume la plasticidad del metal y se produce la ruptura.

Concepto de Wood sobre la fatiga: W. A. Wood a diferencia de Orowan, interpretó sus observaciones microscópicas del deslizamiento producido por fatiga, como indicativo de que las bandas de deslizamiento son el resultado de una sistemática acumulación de movimientos de deslizamiento fino correspondientes a desplazamientos de 10^{-7} cm, en vez de los pasos de 10^{-5} y 10^{-4} cm que se observan en las bandas de deslizamiento estático. La figura 1.6 ilustra el concepto de Wood referente a cómo la deformación continuada por deslizamiento fino puede conducir a una grieta por fatiga. Este mecanismo explica por qué las grietas de fatiga se inician sobre superficies y en las intrusiones y extrusiones de bandas de deslizamiento.

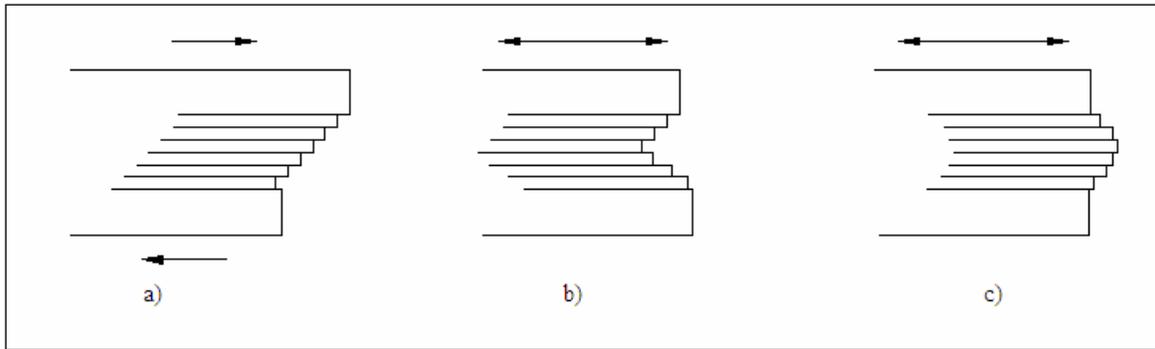


Figura 1.6. Conceptos de Wood: a) Deformación estática; b) Deformación de fatiga que conduce a la formación de una entalla superficial (intrusión del material); c) Deformación por fatiga que conduce a la extrusión de una banda de deslizamiento. [9]

1.2.4.- Factores que afectan a la Fatiga

Existen distintos factores que deben ser considerados en el análisis de los estudios sobre fatiga, los cuales pueden representar variaciones importantes sobre el comportamiento de los materiales tanto en el laboratorio como en servicio. Entre los más significativos están:

- **Concentradores de Esfuerzo:** la resistencia a la fatiga disminuye de manera muy importante por la introducción de un concentrador de esfuerzo, tal como una entalla o un agujero. Como las piezas reales de las maquinarias tienen invariablemente accidentes que concentran las tensiones, no es de sorprender que las grietas de la fatiga se inicien en esas irregularidades geométricas. La eficacia de las entallas en la disminución del límite de fatiga se expresa mediante el factor de fatiga con entalla, el cual se expresa mediante la relación del límite de fatiga de las probetas sin entallas, al mismo valor de las probetas entalladas. Se ha encontrado que los valores de este factor varían dependiendo de la severidad de la entalla, el tipo de entalla, el tipo de carga y el nivel de esfuerzo. Una de las mejores maneras de combatir la rotura por fatiga, es la reducción al mínimo posible de los concentradores de esfuerzos

mediante un cuidadoso diseño y evitar la aparición incidental de los mismos a través de una mecanización y fabricación muy cuidadosa.

- ***Efecto del Tamaño:*** un problema práctico importante es la predicción del comportamiento en fatiga de miembros grandes de máquinas, a partir de los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio con probetas pequeñas. La experiencia ha demostrado que en la mayoría de los casos existe un efecto de tamaño, es decir la resistencia a la fatiga de elementos grandes es más baja que la de elementos pequeños. Al cambiar el tamaño de la probeta de fatiga resultan afectados dos factores: Al aumentar el diámetro aumenta el volumen y el área superficial de la probeta, la variación de esta área superficial es de suma importancia debido a que allí, se inician las grietas por fatiga. Por otro lado, en las probetas lisas o entalladas cargadas a flexión o torsión, decrece el gradiente de tensiones a través del diámetro y aumenta el volumen del material sometido a tensiones altas a medida que crece el diámetro.^[3]

- ***Efectos de Superficie:*** la importancia de este efecto radica en que prácticamente todas las fracturas por fatiga se inician en la superficie. Los factores que afectan a la superficie pueden dividirse en tres categorías:

Rugosidad de la superficie: se ha demostrado que los diferentes acabados de las superficies obtenidos por los distintos procedimientos de mecanizado, afectan apreciablemente el comportamiento de la fatiga. A medida que la rugosidad superficial sea menor, menor será su efecto y mayor su duración media en fatiga.

Cambios en las propiedades superficiales: debido a la influencia que tiene la condición superficial sobre la resistencia a la fatiga, cualquier

fenómeno que cambie la resistencia a la fatiga de la superficie del material, alterará significativamente las propiedades de fatiga. Las condiciones particulares en la obtención de algunos recubrimientos pueden producir variaciones en las tensiones residuales, adherencia, porosidad, etc.

Tensiones residuales superficiales: éstas pueden servir para mejorar el límite de resistencia a la fatiga, o bien para afectarlo negativamente. Por lo general, si el esfuerzo remanente en la superficie de un elemento es de compresión se mejora el límite mencionado. Las fallas por fatiga resultan fallas por tensión o al menos causadas por esfuerzos de tracción y, por consiguiente, todo lo que los reduzca también disminuirá la posibilidad de una falla por fatiga. La formación de un sistema favorable de tensiones residuales de compresión es, seguramente, el método más eficaz para mejorar el comportamiento en la fatiga.

- **Temperatura:** cuando las temperaturas de operación son menores que las temperaturas del lugar de trabajo, la fractura por fragilidad de los materiales es una posibilidad latente y debe investigarse antes de realizar cualquier estudio. Cuando las temperaturas de operación son mayores que la del lugar de estudio, se debe tomar en cuenta su influencia debido a que la resistencia de fluencia disminuye muy rápido con la temperatura. Cualquier esfuerzo inducirá flujo plástico en un material que opere a altas temperaturas; así que debe tomarse en cuenta ese factor.

La cantidad limitada de datos disponibles indica que el límite de resistencia a la fatiga para aceros aumenta ligeramente cuando se eleva la temperatura y después empieza a disminuir en el orden de los 200 y 370 °C.^[12]

- **Tratamientos Térmicos y la microestructura:** la resistencia a la fatiga se incrementa usualmente por 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. 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 de revenido, disminuyen ambas resistencias, a la tracción y a la fatiga, aunque la relación de fatiga aumenta usualmente, entendiéndose como *relación de fatiga* a la relación entre el límite de fatiga (o resistencia a la fatiga para 10^8 ciclos), y la resistencia a la tracción. La influencia del tamaño de grano en la resistencia a la fatiga de los aceros, tiene poca importancia. 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.^[10]

- **Inclusiones:** 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 que es debido al aumento de la concentración de tensiones introducidas por las inclusiones o por la oquedad que contiene la inclusión. Las inclusiones alargadas tienen poco efecto si son paralelas a la dirección del esfuerzo, pero pueden 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 la fatiga; estarán usualmente alargadas en la dirección de laminación y tendrán poco efecto en la resistencia a la fatiga longitudinal, pero reducirán apreciablemente la resistencia a la fatiga transversal. Se ha

demostrado que la presencia de inclusiones en el acero AISI 4340, tiene un mayor efecto en la resistencia a la fatiga transversal que en la longitudinal.

- ***Frecuencia de aplicación de la carga:*** entre 200 y 7000 ciclos/min., se ha observado poco o ningún efecto sobre la resistencia a la fatiga, asumiendo que la temperatura permanece constante mientras se lleva a cabo el ensayo. Hay alguna evidencia de que por debajo de 200 ciclos/min. ocurre una pequeña disminución de la resistencia a la fatiga de algunos materiales. En el intervalo comprendido entre 7000 y 60000-90000 ciclos/min., existe un incremento en la resistencia a la fatiga de la mayoría de los materiales, pero por encima de estas velocidades se presenta una marcada disminución de la resistencia. También se ha determinado que los periodos de descanso entre los ciclos o entre los bloques de ciclos no tienen un efecto mensurable sobre la resistencia a la fatiga.

1.2.5.- Mecanismos de Fractura

Los metales pueden fallar por distintos mecanismos causados por diferentes razones, la determinación de la causa de falla es vital en la prevención de ésta. Una de las fuentes más importantes de información relacionada con las causas de falla, consiste en el análisis de la superficie de fractura. Una superficie de fractura es un registro detallado de una parte del historial de la falla, éste contiene evidencia del efecto en la fractura de variables como son: carga aplicada, efectos ambientales y calidad del material. La técnica principalmente utilizada para analizar esta evidencia consiste en el análisis Fractográfico el cual nos suministra información sobre cómo los

materiales sufren esta fractura y de cómo el medio ambiente ejerce una influencia directa en ella.

La fractura en materiales ingenieriles pueden ocurrir por una vía transgranular (a través de los granos), o por una vía intergranular (a lo largo de los límites de grano, ver figura 1.7). Sin embargo sin tomar en cuenta las vías de fractura, existen esencialmente cuatro formas topográficas asociadas a los modos de fractura: microhoyuelo, clivaje, fatiga y ruptura decohesiva. Cada uno de estos modos de fractura posee una apariencia característica de la superficie fracturada y a su vez mecanismos por los cuales la fractura se propaga. Este estudio abarcará sólo el modo de fractura por fatiga.

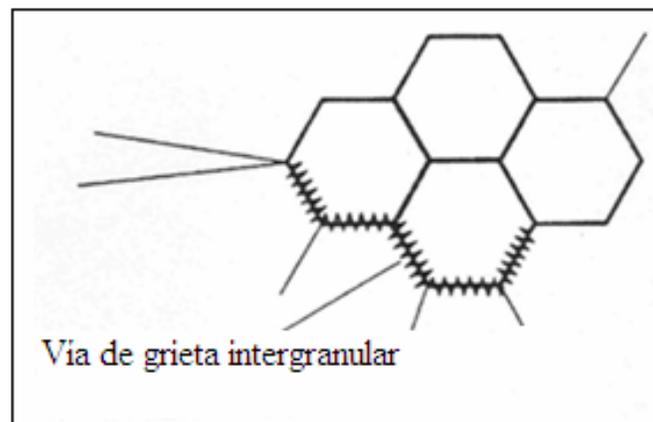


Figura 1.7. Fractura de grieta vía intergranular.

1.2.5.1.- Características Microscópicas de la Fractura por Fatiga: una fractura por fatiga generalmente ocurre en tres etapas: en la primera etapa se inicia la fractura, durante la segunda etapa esta fractura se propaga hasta poco menos de la totalidad de su longitud, y por último, en la tercera etapa la grieta avanza hasta producir una falla catastrófica.

Etapa I: durante esta etapa la iniciación y el crecimiento de la grieta por fatiga, ocurre principalmente por el rompimiento de los planos de deslizamiento esto debido a inversiones repetidas de sistemas activos de deslizamiento en los metales. El crecimiento de la grieta es influenciado en gran parte por la microestructura del material y el esfuerzo medio aplicado, y aproximadamente el 90% de la vida de fatiga puede ser consumida en el inicio de esta posible grieta. La grieta tiende a seguir planos cristalográficos, pero cambia su dirección en discontinuidades como pueden ser límites de granos. A grandes amplitudes de deformación plástica, las grietas por fatiga se pueden iniciar en límites de granos. Las superficies de una fractura por fatiga en esta etapa son presentadas en forma de facetas (figura 1.8), y no exhiben las llamadas estriaciones de fatiga. Esta Etapa I es normalmente observada en fracturas de alto ciclaje a bajo esfuerzo y en pocas ocasiones en fracturas causadas a bajo ciclaje y altos esfuerzos.



Figura 1.8. Superficie de la Etapa I (Facetas). [2]

Etapa II: la parte fundamental del desarrollo de una fractura por fatiga consiste en el crecimiento de grieta en esta segunda etapa, en la cual la

fractura ocurre generalmente de forma transgranular y es en su mayoría influenciada más por la magnitud de esfuerzos alternantes que por esfuerzos medios o por la microestructura del material. Las fracturas generadas en esta etapa generalmente exhiben marcas conocidas como *estriaciones de fatiga* (figura 1.9), las cuales son un registro visual de la posición del frente de grieta durante la propagación de la misma a través del material. Bajo condiciones normales, cada estriación es el resultado de un ciclo de carga y además marca el avance del frente de grieta. Sin embargo, cuando existe una disminución repentina en la carga aplicada, la grieta puede temporalmente detener su propagación y no formar estriaciones. La grieta continúa su propagación sólo después de cierto número de ciclos aplicados a esfuerzos menores. Este fenómeno es debido a la presencia de un campo de esfuerzos de compresión residuales dentro de la zona plástica en la punta de la grieta producida después del último alto esfuerzo aplicado en el ciclo de fatiga.[2]

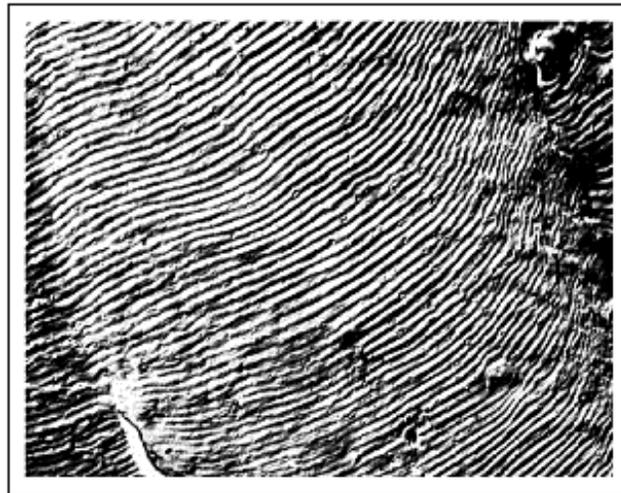


Figura 1.9. Estriaciones de fatiga.[2]

Tanto la propagación de la grieta por fatiga como el espaciamiento entre las estriaciones pueden ser afectadas por distintas variables tales como:

condiciones de carga, resistencia del material, microestructura y los factores ambientales. Considerando únicamente las condiciones de carga, las cuales pueden incluir el esfuerzo medio, el esfuerzo alternante y la frecuencia cíclica, la magnitud del esfuerzo alternante tiene el mayor efecto en el espaciamiento de las estriaciones.

Otra característica física encontrada en la superficie de fractura es la presencia de "mesetas" paralelas separadas por canales longitudinales; estas mesetas son generalmente perpendiculares a la dirección de los máximos esfuerzos principales actuantes y están conformadas por un grupo de estriaciones que tienen direcciones semejantes.

La concentración de esfuerzo de una grieta por fatiga es confinada a una pequeña región en la punta de la grieta, sufriendo ésta una deformación plástica y el resto del material una deformación elástica.

En esta etapa de la fatiga, la grieta se propaga una cierta distancia con cada ciclo de esfuerzo. A medida que la carga de tensión es aplicada se produce un deslizamiento a lo largo de los planos orientados favorablemente según la dirección del esfuerzo máximo de corte. Como consecuencia del avance del deslizamiento, la punta de la grieta se ensancha, perdiendo así su filo en el borde, conocido como el mecanismo de *despunte plástico*, y reafilándose por deslizamientos inversos parciales durante la declinación de la carga por cada ciclo de fatiga (figura 1.10). Esto produce esfuerzos de compresión en la punta de la grieta, debido a la relajación de los esfuerzos residuales de tensión elásticos inducidos en la región del material sin agrietar durante el aumento de la carga de fatiga.

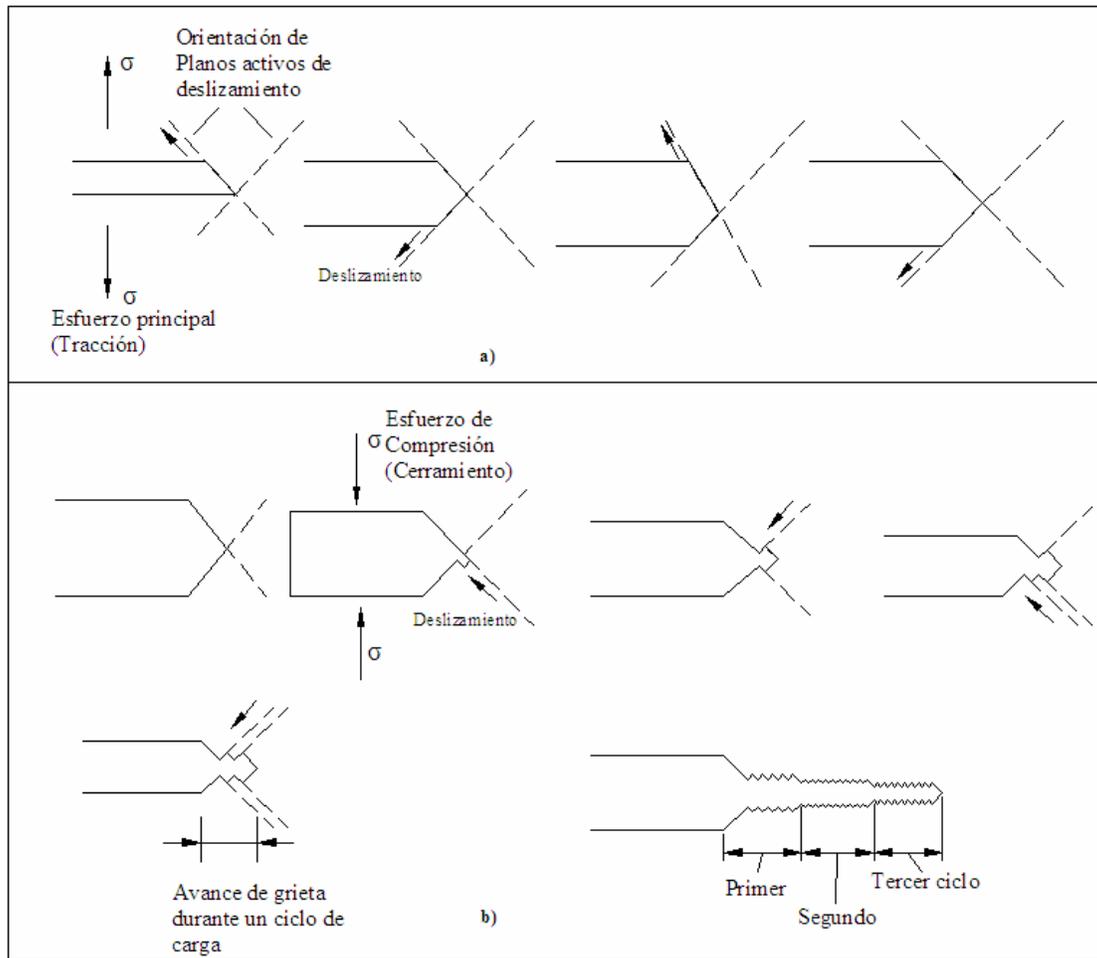


Figura 1.10. Mecanismo de propagación de grieta por deslizamiento inverso en la punta de la grieta. **a)** Apertura de grieta y despunte plástico por deslizamiento de planos de deslizamiento alterno, con incremento del esfuerzo de tracción. **b)** Cerramiento de grieta y reafilamiento de la punta por deslizamientos inversos parciales en planos de deslizamientos alterno, con incremento del esfuerzo de compresión. [2]

Para una propagación de grieta en esta etapa sobre condiciones de frecuentes aplicaciones de cargas cíclicas constantes, y con un avance de grieta entre 10^{-5} y 10^{-3} mm/ciclos, la velocidad de avance de grieta puede ser expresada como una función del factor de intensidad de esfuerzo K:

$$\frac{da}{dN} = C \cdot (\Delta K)^m \quad (\text{Ecuación 1.3})$$

Donde a es la distancia del avance de la grieta por fatiga, N es el número de ciclos aplicados para el avance de la distancia a , m y C son constantes que dependen de las propiedades del material, y ΔK es la diferencia entre el máximo y el mínimo factor de intensidad de esfuerzo por cada ciclo de carga. El factor de intensidad de esfuerzo K , describe la condición de esfuerzo de la grieta y es función del esfuerzo aplicado y el factor de forma de la grieta, generalmente se expresa como la razón entre la profundidad de la grieta y su longitud.^[2]

Cuando la estriación de fatiga es producida por cada ciclo de carga, da/dN representa el espaciado de estriaciones. La ecuación 1.3 no describe adecuadamente la velocidad de avance de grieta ni en la Etapa I ni en la Etapa III, ya que tiende a sobrestimar en la Etapa I y a subestimar en la Etapa III dicha velocidad.

Otra característica de la propagación de la grieta de fatiga, es que una vez que ha sido nucleada su velocidad de avance y su dirección, están controladas totalmente por los esfuerzos localizados en la punta de la grieta.

Etapa III: es la fase terminal de la propagación de una grieta por fatiga, en la cual el modo de formación de estriaciones es progresivamente desplazado por el modo de fractura estática, como la ruptura por hoyuelos o clivaje. La velocidad del avance de la grieta aumenta durante esta etapa hasta que la grieta se transforma en inestable y la pieza falla. Debido a que la propagación es cada vez más dominada por los modos de fractura estática, este estado es afectado tanto por la microestructura como por el esfuerzo medio.

1.2.5.2.- Características Macroscópicas de la Fractura por Fatiga:

Para describir cualquier fractura por fatiga es necesario realizar generalizaciones y presentar características que se asemejen con casos ideales ya tratados. Es un hecho que no existen dos fracturas por fatiga idénticas, pero todas ellas poseen ciertas características semejantes entre si. Dependiendo del material, condiciones de carga y medio ambiente asociado, algunas de estas características no son claramente identificables, haciendo su diagnóstico más complicado. La figura 1.11 muestra el caso ideal de las características de fracturas por fatiga más notorias. La apreciación de estas características dependerá en gran medida de los factores mencionados, y no de la forma geométrica de la pieza.

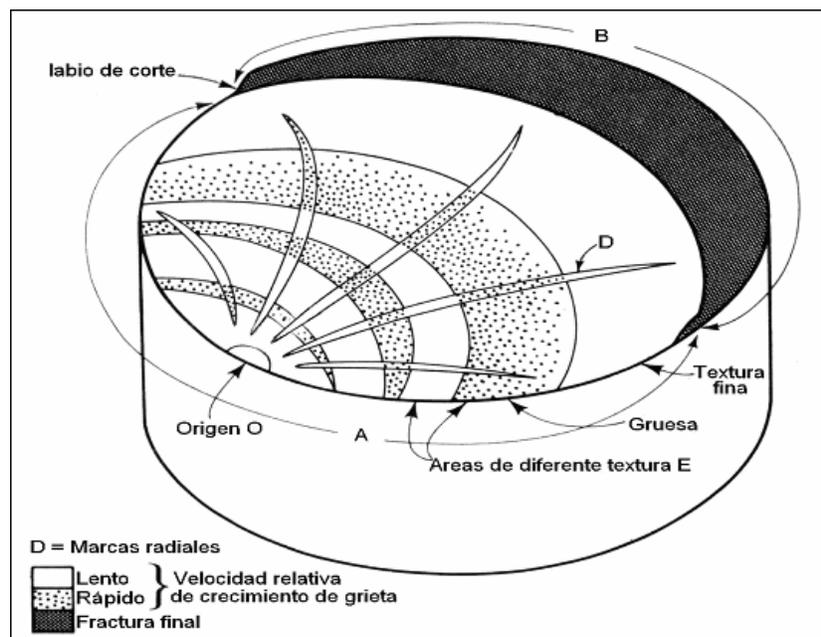


Figura 1.11. Características macroscópicas de la superficie de fractura.[11]

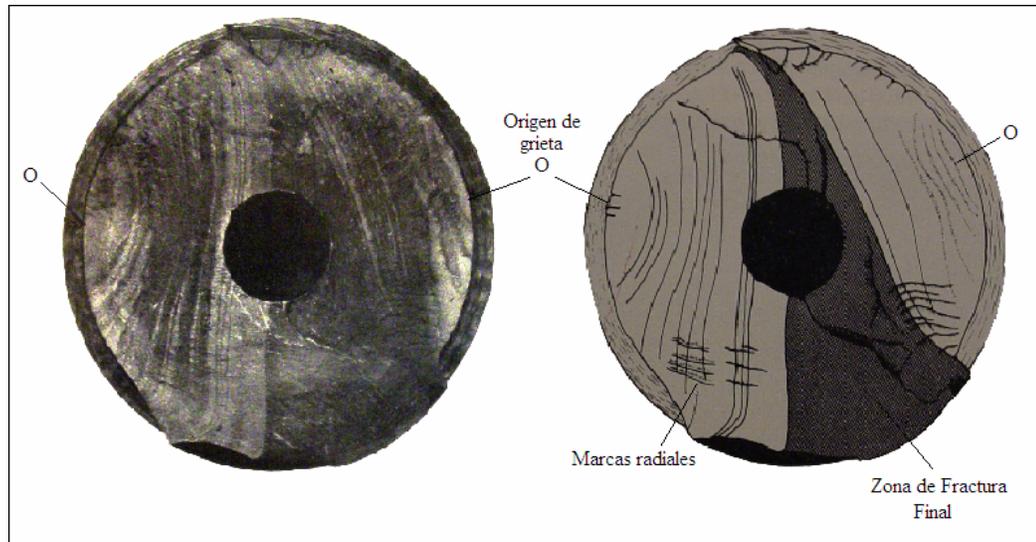


Figura 1.12. Superficie de fractura por fatiga de una pieza aeronáutica.^[11]

La fractura por fatiga puede ser dividida en dos áreas principales (figura 1.11): **A**, área de fatiga, que es relativamente lisa; y **B**, área de fractura final, que posee una textura más rugosa e irregular. Esta área de fractura final, la cual pudo haber ocurrido bajo tracción, flexión o torsión, es evidencia de la deformación plástica que ocurre antes de la separación final. El área de fatiga contiene el origen o los orígenes **O** y otras características que indican la dirección y velocidad de avance de grieta en cualquier etapa de su propagación. Las marcas radiales **D** y las marcas de playa **E**, son marcas residuales dejadas por el avance de la grieta y ambas pueden ser utilizadas para ubicar el origen de la misma. Debido a que la grieta crece a través de la sección, su frente puede cambiar de una forma convexa a una cóncava al aproximarse al final de la fractura, y las marcas radiales convergerán.^[11]

Las marcas radiales tienden a aparecer en la etapa intermedia del crecimiento de la grieta, cuando su propagación todavía es lenta. En la etapa siguiente de crecimiento cuando la deformación plástica apreciable ocurre, las marcas radiales desaparecen. Las marcas de playa que aparecen en la

superficie de la fractura son exhibidas como límites entre diferentes texturas de la fractura y diferentes grados de corrosión que han ocurrido en el crecimiento de la grieta.

1.2.6.- Límite de Fatiga:

Por definición el Límite de Fatiga (en la literatura anglosajona “*endurance limit*”), es el valor máximo de esfuerzo que un material es capaz de soportar para un número infinito de ciclos de carga [3].

Los metales que presentan un límite de fatiga son, entre otros, el hierro forjado y la fundición, los aceros de baja aleación y media resistencia, los aceros inoxidable, las aleaciones de aluminio magnesio y algunas aleaciones de titanio. Se cree tradicionalmente que éste es el comportamiento normal para la mayoría de los metales, y no es así; y probablemente los no metales no presentan límite de fatiga. Este concepto erróneo ha surgido debido a que la mayoría de las investigaciones se han realizado en aceros, esto ha provocado un uso demasiado amplio del término límite de fatiga, que debería de usarse solamente para aquellos metales que presentan un tramo horizontal en sus curvas de Wöhler. Este tramo horizontal es presentado a un esfuerzo límite determinado, por debajo del cual se presume que el material durará un número infinito de ciclos sin fracturar. La mayoría de los metales no féreos como las aleaciones de aluminio, las de magnesio y las de cobre, tienen una curva de Wöhler cuya pendiente disminuye progresivamente al aumentar el número de ciclos, aproximándose a la horizontal, pero sin llegar a serlo nunca, ver figura 1.13. No tienen por tanto un verdadero límite de fatiga, y se suele utilizar el término resistencia a la fatiga para un número de ciclos convenido arbitrariamente.

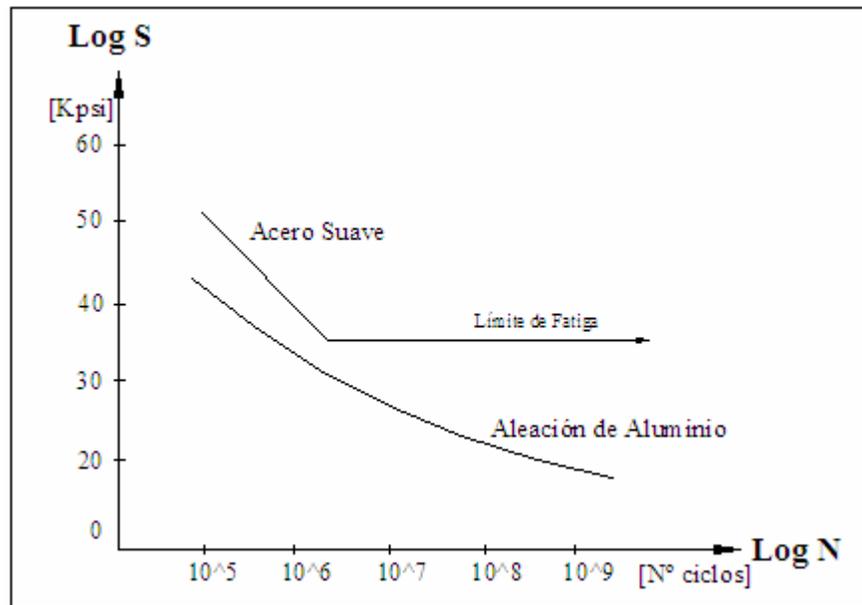


Figura 1.13. Curvas típicas de Wöhler de metales férreos y no férreos.

Una posible explicación al hecho de que algunos materiales no presenten un límite de fatiga bien definido, es dada por Rally y Sinclair, que observaron que los metales que sufren envejecimiento por deformación tienen una curva de Wöhler con un punto anguloso nítido y un límite de fatiga bien definido. Sus ensayos con aceros suaves comprobaron, que al disminuir el contenido de carbono y de nitrógeno, y por tanto, la tendencia al envejecimiento por deformación, se suavizaba la curva de Wöhler y el punto anguloso aparecía para un número de ciclos más altos que si los contenidos de carbono fueran más altos. Esto sugiere que el límite de fatiga, representa la tensión a la que existe una compensación entre el deterioro por fatiga y el endurecimiento por envejecimiento localizado.^[9]

El Límite de Fatiga se puede ver afectado por diversos factores, entre los cuales se encuentra el efecto de tamaño, que según datos experimentales éste presenta datos contradictorios y no muy completos, por ejemplo para aceros suaves la disminución del límite de fatiga no excede un 10% para

diámetros comprendidos entre 2,5 y 50 mm [9]; para piezas de dimensiones mayores se observa una mayor disminución de dicho valor.

Se ha encontrado, en ensayos realizados con probetas transversales a la dirección de las piezas forjadas de acero, un límite de fatiga transversal cuyo valor es sólo del 60 al 70 % del longitudinal [9]. Se demostró que prácticamente todas las roturas de fatiga de las probetas transversales se inician en inclusiones no metálicas. La eliminación casi completa de las inclusiones en el acero fabricado al vacío, produce un incremento considerable del límite de fatiga transversal. El bajo límite de fatiga transversal de los aceros que contienen inclusiones se atribuye a la concentración de esfuerzos que éstas producen.

Los materiales férreos, que suelen mostrar un límite de fatiga definido en los ensayos a la temperatura ambiente, ya no lo tienen cuando se ensayan a temperaturas superiores a 420 °C aproximadamente.

A la hora de diseñar o analizar fallas, es conveniente utilizar un método rápido de estimación del Límite de Fatiga, el cual se basa en la *relación de fatiga*. Como se muestra la figura 1.14, el límite de fatiga (calculado en ensayos de flexión rotatoria), varía para los aceros desde aproximadamente 40 a 60 % de la resistencia última a la tensión (S_{uts}), hasta un valor de S_{uts} cercano a los 200 Kpsi (1400 MPa).

Parte de la dispersión observada en los resultados de los ensayos de fatiga, se debe a la variación en las condiciones y procedimiento de ensayo, los cuales deben ser cuidadosamente controlados cuando se realizan investigaciones estadísticas. Esto es particularmente importante porque no se puede distinguir con certeza entre la dispersión debida a las variaciones del ensayo y las debidas a la variación del material.

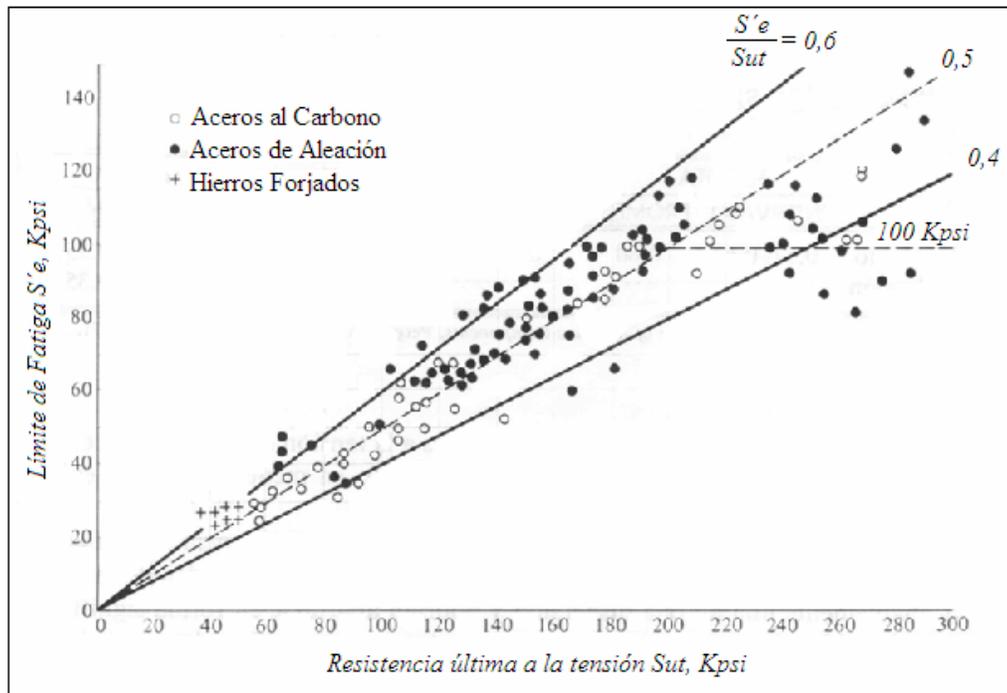


Figura 1.14. Gráfica Límite de Fatiga vs. Resistencia última a la tensión. [15]

El análisis estadístico de los datos de fatiga y sobre todo en la región del límite, debido a su dispersión exige de técnicas especiales. Al realizar ensayos con el fin de determinarlo, se puede ensayar una probeta determinada solamente a una tensión dada, y si dicha probeta falla antes del límite prescrito (5×10^6 ciclos en el caso de los aceros), sabremos que el límite de fatiga de la muestra se encuentra en un punto por debajo del nivel de tensiones utilizado. Por el contrario, si la probeta no falla en el número de ciclos establecido, sabremos que su límite de fatiga se encuentra en algún punto por encima de la tensión de ensayo. Como cada muestra puede someterse a ensayo una sola vez, es necesario estimar los estadísticos del límite de fatiga por medio del ensayo, a diferentes niveles de tensión, de un gran número de probetas que se consideren idénticas, tomándose en cuenta, que cada probeta tendrá su propio límite de fatiga.

1.2.7.- Método de la Escalera [13].

Este método ofrece un buen sistema para determinar el límite medio de fatiga, utilizando un número de muestras de entre 12 y 25 probetas, pero presenta el inconveniente de que los ensayos deben realizarse sucesivamente. El cálculo del límite de fatiga consiste en la aplicación de este método estadístico, el cual se basa en el evento de menor frecuencia, sea el fallo o no de las probetas durante el ensayo; este consiste en ensayar una probeta a un esfuerzo determinado, si ésta no falla, se ensayará la probeta subsiguiente a un escalón de esfuerzo por encima del esfuerzo ensayado anteriormente. Si por lo contrario, la probeta falla, la nueva probeta se ensayará a un escalón de esfuerzo por debajo del esfuerzo ensayado anteriormente.

El método se realiza de forma sucesiva a niveles de esfuerzos por encima o por debajo del esfuerzo anterior aplicado, de acuerdo al resultado del ensayo anterior; entonces el límite medio de fatiga se calcula de la siguiente manera:

- Se construye una tabla con los siguientes términos:

S_i = Esfuerzo aplicado durante el ensayo; para el esfuerzo menor donde ocurre el evento de menor frecuencia se le asigna el valor $i = 0$ y a los esfuerzos superiores en orden creciente se les asigna los valores de 1, 2, 3,.. n.

i = valor del nivel de esfuerzo.

p_i = número de probetas ensayadas en el nivel de esfuerzo S_i .

N = sumatoria de los p_i , para el evento de menor frecuencia.

A = sumatoria de los $i \cdot p_i$, para el evento de menor frecuencia.

B = sumatoria de los $i^2 \cdot p_i$, para el evento de menor frecuencia.

- Luego se calcula el límite medio de fatiga a través de la ecuación:

$$S_L = S_0 + d \left(\frac{A}{N} \pm \frac{1}{2} \right) \quad (\text{Ecuación 1.4})$$

Se construye la curva de límite de fatiga con una línea horizontal que coincide con el valor de límite obtenido con la ecuación anterior.

S_i	i	p_i	i*p_i	i²*p_i
S _n	n	V	n*V	n ² *V
S ₃	3	W	3*W	3 ² *W
S ₂	2	X	2*X	2 ² *X
S ₁	1	Y	1*Y	1 ² *Y
S ₀	0	Z	0*Z	0 ² *Z
Σ		N	A	B

Figura 1.15. Modelo de tabla para almacenar datos para el cálculo de límite de fatiga.

- Por último se calcula la desviación estándar por la siguiente relación:

$$s = 1,62 * d \left(\frac{N * B - A^2}{N^2} + 0,029 \right) \quad (\text{Ecuación 1.5})$$

Donde:

S_L: Límite medio de fatiga

S₀: Esfuerzo menor aplicado para el evento de menor frecuencia

d: Amplitud entre los esfuerzos aplicados a cada ensayo

A: Sumatoria del valor designado para cada esfuerzo por el número de probetas correspondientes al evento de menor frecuencia de cada nivel.

N: Sumatoria del número de probetas correspondiente al evento de menor frecuencia para cada nivel de esfuerzo.

±: El + cuando el evento de menor frecuencia es “no falla” y viceversa.

s: desviación estándar.

B: Sumatoria del valor designado para cada esfuerzo al cuadrado por el número de probetas correspondientes al evento de menor frecuencia de cada nivel donde: S_L es el límite medio de fatiga, S_0 es el menor esfuerzo aplicado para el evento de menor frecuencia d es el escalón de esfuerzo aplicado y, el signo + se utiliza cuando el evento de menor frecuencia es el de probetas que fallan y el signo – cuando el evento de menor frecuencia es el de probetas que no fallan.

Nota: se tiene que cumplir que $(NB-A^2)/N^2 > 0,03$.

1.3.- PROCESO DE DEPOSICIÓN

En la actualidad se puede observar que la mayoría de los metales están recubiertos por diferentes materiales y en una amplia variedad de técnicas de aplicación. Las principales razones para recubrir un metal están comprendidas entre las siguientes:

- Mejorar la estética del producto acabado
- Aumentar la resistencia al desgaste
- Reducir la fricción de la superficie
- Preparar la superficie para un procesamiento posterior

- Reconstruir superficies gastadas durante el servicio
- Proporcionar protección contra la corrosión del sustrato

La característica común de los procesos de recubrimiento industrial es que todos producen un recubrimiento separado sobre la superficie del material del sustrato. Se debe obtener una buena adhesión entre el recubrimiento y el sustrato, y para que esto ocurra la superficie del sustrato debe estar muy limpia. Sin embargo, para recubrimientos en los que se requiera algún tipo de anclaje mecánico, esta superficie debe poseer cierto grado de rugosidad, que garantice una buena adhesión entre las superficies en contacto.

Está demostrado que las películas depositadas atómicamente dependen en gran parte del material en el cual ha sido depositado, de la química y morfología de la superficie del sustrato, del proceso de preparación de esta superficie y los detalles del proceso de deposición y sus parámetros.

En la actualidad existe una gran variedad de procesos de deposición, y estos varían de acuerdo a su aplicación y a su economía. Entre los más utilizados se encuentran:

- Inmersión en caliente.
- Electroplateado.
- Depósitos autocatalíticos (Electroless).
- Deposición Química en fase de Vapor (CVD).
- Deposición Física en fase de Vapor (PVD):
 - Convencional (térmico).
 - Asistido por plasma.
- Recubrimiento por rociado térmico (termo-rociado):
 - Plasma.

- HVOF.
- Arco Eléctrico.
- Llama.
- Recubrimiento con fusión del material base:
 - Arco transferido por plasma. (PTA).
 - Arco rápido.
 - Rociado y fundido.
 - Cordón de soldadura.
 - Soldadura por proceso metal gas inerte.

1.3.1.- Deposición Física en Fase de Vapor (PVD)

Los procesos PVD puros como indican sus siglas, utilizan medios físicos para obtener directamente las especies de un material denominado blanco, evaporarlas y depositarlas sobre el sustrato. Dado que este transporte de las especies se realiza por medios físicos, es necesario alto vacío para que el camino libre medio de los átomos y las moléculas supere la distancia blanco-sustrato y las dimensiones de la cámara de trabajo. Sin embargo, la ventaja de las bajas temperaturas y la ausencia de residuos de reacciones químicas han estimulado el crecimiento de este tipo de técnicas.

La formación de una superficie ingenieril útil y comercialmente atractiva usando un proceso PVD envuelve varios estados:

1. Selección del sustrato (Material Base) y desarrollo de un proceso apropiado para la preparación de la superficie.
2. Selección de material de recubrimiento que va a producir las propiedades requeridas en la superficie.

3. Selección del proceso de PVD para proveer propiedades reproducibles, compatibilidad con procesos subsecuentes y estabilidad a largo plazo.
4. Desarrollo de los parámetros del proceso de fabricación, parámetros límites y técnicas de control y monitoreo.
5. Desarrollo de una técnica apropiada para determinar las propiedades del recubrimiento y estabilidad del producto.
6. Creación de especificaciones escritas e instrucciones de procesos de fabricación para recubrir el substrato, preparación de la superficie, proceso de deposición y procedimientos de caracterización. [4]

Las propiedades del recubrimiento de un material depositado por un proceso PVD dependen de 4 factores:

- ***Condición de la superficie del substrato:*** morfología de la superficie (rugosidad, inclusiones, partículas contaminantes), química de la superficie (composición superficial, contaminantes), propiedades mecánicas, defectos superficiales, sitios preferenciales de nucleación y la estabilidad de la superficie.
- ***Detalles del proceso de deposición y geometría del sistema:*** Ángulo de incidencia y distribución de la deposición del flujo de átomos, temperatura del substrato, velocidad de deposición, gases contaminantes y bombardeo concurrente de partículas de alta energía (flujo, masa, energía).
- ***Detalles de crecimiento de película sobre la superficie del substrato:*** Temperatura del substrato, nucleación, formación de la intercara, generación de defectos en la intercara, energía introducida para el crecimiento de película, movilidad superficial de los átomos de deposición, crecimiento morfológico

de la película, gases atrapados, reacción con el ambiente de deposición y cambios en las propiedades de película durante la deposición.

- ***Procesos y reacciones después de la deposición:*** reacción de la superficie de película con el ambiente, corrosión, degradación interfacial. [4]

1.3.1.1.- Deposición Física en Fase de Vapor Asistida por Plasma (PAPVD)

Las técnicas de plasma han suplantado en gran parte a las técnicas convencionales de recubrimiento y modificación superficial, y se prevé que su campo de aplicación industrial crecerá y se diversificará significativamente en el futuro, complementándose también con otras técnicas de modificación superficial basadas en láseres, haces iónicos y electrónicos.

Este tipo de proceso es el de mayor aplicación en la actualidad, posee los mismos principios de operación que en los procesos PVD, pero en este caso se utiliza un plasma como agente ionizante favoreciendo dicho proceso.

Se dice en general que el estado de plasma es el cuarto estado de la materia. Esto se debe a que si tomamos un gas constituido por átomos y/o moléculas (neutros), y le entregamos suficiente cantidad de energía, los átomos comienzan a ionizarse y aparecen en el gas partículas con carga eléctrica (iones y electrones). Cuando el número de partículas cargadas es suficientemente grande como para que el comportamiento dinámico del sistema quede determinado por fuerzas electromagnéticas (de largo alcance), y no por colisiones binarias entre partículas neutras (como en el caso de los gases ideales), decimos que el gas se ha transformado en un plasma.

A diferencia de lo que ocurre con los otros estados de la materia, no existe una transición de fase entre el gas y el plasma, sino que se produce una

variación continua, aunque relativamente brusca, en el grado de ionización y por lo tanto no puede definirse un valor de temperatura preciso en el cual el gas se transforma en plasma.

De igual manera podemos decir que el plasma es una clase particular de gas ionizado. El requisito para que este gas se pueda definir como un “plasma” es que este presente un “comportamiento colectivo”, en cuyo caso la concentración de cargas positivas es prácticamente igual a la de cargas negativas transformando al gas en una especie eléctricamente neutra. Se entiende por “comportamiento colectivo” a la capacidad de las cargas libres de distribuirse espacialmente, en caso de producirse una perturbación electrostática en el gas, de modo de aislar al plasma de dicha perturbación y preservar su condición de gas neutro. [7]

Ventajas de las técnicas asistidas por plasma. [7]

- Posibilidad de obtener recubrimientos con composición química y estructura controlada (ej: morfología, estequiometría, tensiones residuales, dureza, etc.) como resultado del control de las condiciones de deposición durante el proceso.
- Posibilidad de obtener recubrimientos de mejor adherencia, como resultado de los procesos de limpieza por bombardeo iónico antes y durante la deposición.
- Alto grado de reproducibilidad y mayor control de los parámetros del proceso y de las propiedades del recubrimiento.

- Posibilidad de utilizar temperaturas de deposición más bajas que en los métodos convencionales y, en particular, en relación con otros procesos térmicos, como el CVD térmico.
- Tiempos de proceso significativamente menores en el caso de endurecimiento superficial asistido por plasma.
- Posibilidad de depositar una amplia variedad de materiales inorgánicos tales como metales, aleaciones y compuestos, así como materiales orgánicos.

Aplicaciones de las técnicas asistidas por Plasma. [7]

Entre las áreas de aplicación más conocidas y sus usos específicos, se pueden nombrar los siguientes:

Recubrimientos protectores: antidesgaste, anticorrosión, lubricación sólida, barrera de difusión, barrera térmica.

Medicina: biocompatibilidad para insertos quirúrgicos. Lentes de contacto e intraoculares, esterilización instrumental, etc.

Recubrimientos decorativos: utensilios de cocina, bandas y pulseras para relojes, marcos para anteojos, joyería.

Recubrimientos ópticos: antiraya transparente para lentes orgánicos, filtros ópticos, control de reflectividad, control ambiental.

Microelectrónica: resistencia y capacitores de película delgada, contactos eléctricos para circuitos integrados, circuitos integrados, memorias magnéticas.

Tratamientos de textiles: repelente de agua, antiarrugas, antiestáticos, antiencogimiento, efectos estéticos decorativos.

Modificación superficial: endurecimiento superficial, limpieza superficial, control de topografía superficial.

Control ambiental: membranas selectivas, acondicionamiento térmico de edificios.

Los procesos de PAPVD ofrecen una amplia gama de materiales de recubrimiento como lo son: metales con o sin componentes ferrosos, cerámicos, polímeros, compuestos orgánicos y hasta componentes dieléctricos.

Crecimiento Atómico de Película

El crecimiento atómico de película ocurre como un resultado de la condensación de átomos sobre la superficie. Los estados de formación de película son:

1. **Vaporización:** En la deposición física en fase de vapor, los vapores pueden ser obtenidos a través de técnicas térmicas y no térmicas. Las térmicas requieren de calentamiento, así como evaporación en vacío y sublimación. Las no térmicas incluyen el bombardeo, arco de vaporización, láser erosión, y otros.^[4]
2. **Transporte:** El material vaporizado puede ser transportado a través de un vacío, gas, o plasma. El ambiente vacío permite el control de la contaminación a un nivel deseado. El ambiente gaseoso puede energizar térmicamente partículas y causar nucleación en fase vapor, dependiendo de

la densidad del gas. El ambiente de plasma “activa” especies reactivas, haciéndolas más reactivas químicamente.

3. Condensación y nucleación de los átomos: los átomos que chocan sobre una superficie en un ambiente de vacío, pueden ser proyectados inmediatamente, y después de un tiempo de permanencia son re- evaporados o condensados en la superficie. Si los átomos no reaccionan inmediatamente con la superficie, estos tendrán algún ángulo de movilidad con la superficie antes de que estos condensen.

3.1. Movilidad superficial: la movilidad de un átomo en una superficie, dependerá de la energía que posea el átomo, el enlace químico y la temperatura de la superficie. La movilidad en la superficie puede variar debido a los cambios químicos o cristalográficos. Los diferentes planos cristalográficos de una superficie poseen distintas energías libres de superficie, la cuales afectan la difusión en ellas. Esto significa, que diferentes planos cristalográficos crecerán a diferentes velocidades durante la condensación de los átomos.

3.2. Nucleación: los átomos se condensan sobre la superficie por pérdida de energía. Esta pérdida de energía es provocada por:

- La formación y rompimiento de enlaces químicos con los átomos de la superficie del sustrato.
- Encuentran sitios de nucleación preferencial (impurezas, escalones atómicos, etc.).
- Colisiones con otras superficies de átomos.
- Colisiones o reacciones con especies adsorbidas en la superficie.

La nucleación puede producirse de las siguientes maneras:

3.2.1 Por reacción superficial: los átomos condensados reaccionan con la superficie para formar un enlace químico átomo a átomo. El enlace químico puede ser: por enlace metálico cuando los átomos comparten electrones orbitales, por enlace electrostático cuando los iones son formados debido a pérdidas y ganancias de electrones, o por atracción electrostática debido a la polarización de las moléculas. Si la interacción átomo a átomo es fuerte, la movilidad superficial es baja y cada superficie atómica puede actuar como un sitio de nucleación.

3.2.2 En sitios de nucleación preferencial: si la interacción del átomo adherido con la superficie es débil, éste tendrá una alta movilidad superficial y condensará en los sitios preferenciales de nucleación, donde hay un enlace más fuerte ya sea por un cambio químico o un incremento en el número de valencia.

Los sitios preferenciales de nucleación pueden ser:

- Discontinuidades morfológicas en la superficie tales como escalones y ralladuras.
- Defectos distribuidos en la superficie como defectos puntuales o límites de grano.
- Átomos externos en la superficie.
- Zonas superficiales que tienen distinta orientación química o cristalográfica.

3.2.3 Nucleación por colisión: Los átomos evaporados móviles en la superficie pueden sufrir nucleación con otros átomos de distintas especies también móviles en la superficie por colisión. De esta forma la densidad de nucleación dependerá de la velocidad de deposición de la película.

3.2.4 Nucleación por reacción con átomos adsorbidos: Las especies móviles en la superficie pueden reaccionar con especies adsorbidas por la superficie como el oxígeno, este proceso en algunos casos puede tener un efecto importante en procesos de deposición reactivos.

3.3. Densidad de nucleación: En general el número de núcleos por unidad de área o “densidad de nucleación” debe ser alto esto es necesario para poder desarrollar una película densa y así lograr un total y delgado recubrimiento. La variación en la densidad de nucleación y el subsiguiente crecimiento de la película resultaran en la variación de las propiedades del recubrimiento en la superficie.

3.4. Modificación de la densidad de nucleación: Existen gran cantidad de formas para modificar la nucleación de los átomos tanto en la superficie como en la deposición de la película, entre ellas destacan:

- Cambios en la temperatura de deposición, el incremento de ésta aumentará también la movilidad superficial de los átomos.
- Incremento de la velocidad de deposición o de la probabilidad de colisión en la difusión de la especies.
- Cambios químicos en la superficie para convertirla en más reactiva.
- Sensibilización de la superficie utilizando agentes nucleadores.

- Generar sitios favorables para la nucleación (discontinuidades morfológicas, defectos puntuales, etc.).
- Cambios en la rugosidad de la superficie.
- Creación de nuevas superficies o recubrimiento base o “capa de imprimación”.

4. Crecimiento del núcleo: Cuando los átomos se condensan forman nucleación. Si la superficie es del mismo material que los átomos depositados el proceso es llamado nucleación homogénea, por el contrario si estos son de diferentes materiales el proceso se denomina nucleación heterogénea. Han sido identificados tres tipos de mecanismos de nucleación, ellos difieren de acuerdo a la naturaleza de interacción entre átomos depositados y el material del sustrato:

- a) El mecanismo van der Merwe, el cual consiste en el crecimiento monocapa por monocapa.
- b) El mecanismo Volmer - Weber (V-W), caracterizado por una nucleación y crecimiento tridimensional.
- c) El mecanismo de Stranski – Krastanov (S-K), donde una capa de la superficie alterada es formada por reacción con el material depositado.

5. Formación de la intercara: El material de película depositado puede reaccionar con el sustrato para formar una región interfacial. El material en la región interfacial es denominado “material de la intercara”, sus propiedades son importantes para las propiedades de adhesión eléctricas y

electrónicas de los sistemas película substrato. Las regiones interfaciales son categorizadas como:

- *Interfase Abrupta:* Es caracterizada por un cambio abrupto entre el material de película y el material del substrato en una distancia de espaciamiento atómico (entre 0.2 y 0.5 nm), con cambios abruptos concurrentes en las propiedades del material, típicamente la adhesión en este sistema es baja debido a los vacíos interfaciales.
- *Interfase Mecánica:* es una interfase abrupta sobre una superficie rugosa donde el material depositado forma una capa de una morfología tal que propicia el anclaje mecánico. La resistencia de esta interfase depende de las propiedades mecánicas de los materiales.
- *Interfase de difusión:* Es caracterizado por un cambio gradual o graduación de la composición a través de la región interfacial sin formación compuesta. Este tipo de sistemas interfaciales es frecuentemente encontrado en sistemas metálicos. Si existe contaminación en la superficie, la difusión puede ser suprimida.
- *Interfase compuesta:* Un proceso de difusión junto con una reacción química, forman una región interfacial compuesta. Los compuestos formados son frecuentemente frágiles y altos esfuerzos son usualmente producidos debido a los cambios volumétricos involucrados en la formación de nuevas fases. Algunas veces estos esfuerzos son aliviados por microgrietas en la región interfacial, debilitando así el material de la intercara. Este tipo de interfase es encontrado en sistemas reactivos, tales como oxígeno con películas de metales activos sobre sustratos óxidos, o en sistemas de formaciones intermetálicas como Au-Al.

La composición y estructura de la interfase puede ser modificada por:

- Limpieza de la superficie del sustrato y su preparación.
- Cambios en la temperatura del sustrato y tiempo de deposición.
- Introducción de energía en la región de la superficie durante la deposición, por bombardeo iónico concurrente, calentamiento por láser y otros.

6. Crecimiento de Película: La película crece por la nucleación continua de átomos depositados sobre materiales aplicados previamente. El crecimiento de película, así como el modo de nucleación, determina muchas propiedades, tales como: la densidad, área superficial, área morfológica y tamaño de grano. Algunos aspectos importantes en el crecimiento de película son:

- Rugosidad superficial del sustrato.
- Temperatura de la superficie.
- Movilidad superficial del “adátomo”.
- Efecto del ángulo de incidencia.
- Reacción y transporte de masa durante la deposición, así como efectos de segregación y aglomeración de poros.

6.1 Desarrollo de la rugosidad superficial:

En una escala atómica, la superficie morfológica puede variar desde muy pulida hasta una superficie muy rugosa. Generalmente el crecimiento de película incrementa en superficies rugosas a causa de algunos factores como crecimiento rápido de planos cristalográficos entre otros. La rugosidad no puede ser uniforme sobre la superficie, o pueden haber áreas locales con

rugosidad debido a rayas, partículas encajadas, partículas contaminantes y alguna carga para variar las propiedades de película en esas áreas.

6.2 Modelo de Zona Estructural (SZM):

Típicamente la película cercana a la intercara es influenciada por el sustrato y/o el material de la intercara, este toma un espesor apreciable antes de que la película establezca un modo de crecimiento particular. Luego que este modo de crecimiento ha sido establecido, la morfología de la película puede ser descrita por un modelo de zona estructural (Structural Zone Model). El SZM fue primero aplicado a recubrimientos depositados en vacío, por Movchan y Demchishin en 1969. Luego el SZM fue extendido a depósitos de películas mediante bombardeo por Thornton como muestra la Fig.1.16 y después fue modificado por Meissier.

En el caso de los procesos de plasma, existen un número de variables en el proceso que pueden controlarse a voluntad y que tienen incidencia en la estructura de la película. Entre ellas la temperatura del sustrato (T_s), constituye una variable fundamental de control, por lo cual junto con la temperatura de fusión del material depositado (T_m), determina los procesos de difusión tanto en la superficie como en los sólidos de las especies depositadas, así como también los procesos de desorción. A continuación se presenta la descripción de los modelos de zona estructural:

Zona 1 (formada cuando $T_s/T_m \leq 0.3$): Los efectos de difusión no son importantes, se caracteriza por una estructura columnar con granos pequeños y alargados débilmente unidos entre sí lo que establece una porosidad longitudinal en la estructura. Los depósitos metálicos con esta estructura

poseen alta dureza, pero baja resistencia cuando son sometidos a tensiones normales a la dirección de crecimiento.

Zona T: En esta zona el recubrimiento tiene una morfología fibrosa y es considerada por ser la zona de transición entre la zona 1 y la zona 2. La formación del material en la zona T es debido al bombardeo de partículas de alta energía emitidas del blanco bombardeado a bajas presiones del gas.

Zona 2 (formada cuando $0.3 < T_s/T_m \leq 0.5$): En esta zona al aumentar la temperatura del substrato aumentan los efectos de difusión y se produce una estructura más densa, con un mayor grado de unión entre las columnas y con límites entre ellas similares a bordes de grano. Los depósitos metálicos poseen propiedades similares a las fundiciones metálicas.

Zona 3 (formada cuando $0.5 < T_s/T_m \leq 1$): Esta zona se caracteriza por una estructura más perfecta y de aspecto brillante, por efectos de recristalización y por granos equiaxiados. La estructura y propiedades corresponden a un metal tratado térmicamente. Frecuentemente la morfología columnar altamente modificada es visible, con las columnas siendo simples cristales de material.

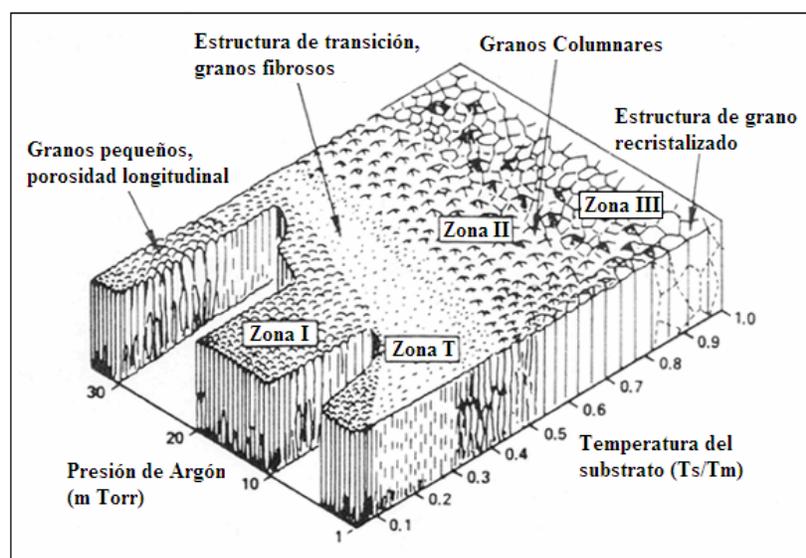


Figura 1.16. Modelo de Zona Estructural. [4]

Si bien existen otros modelos de zonas más recientes, el SZM ilustra adecuadamente los efectos de la temperatura sobre la morfología del recubrimiento. Otra característica del recubrimiento que es controlable en base al proceso de deposición, son sus tensiones internas, que dependen fuertemente del bombardeo de iones positivos sobre la película cuando el sustrato tiene un potencial negativo con respecto al plasma. En las películas producidas por evaporación, las tensiones internas son en general de tracción. En el caso de películas con bombardeo de iones, por el contrario, las tensiones internas son compresivas. Cuanto mayor es el potencial del sustrato, mayores son las tensiones internas. En general, un estado de tensiones internas compresivo determina una buena adherencia, aunque más allá de un cierto límite, las tensiones internas pueden llegar a producir el desprendimiento espontáneo de la película.

1.3.1.2.- Técnicas derivadas de los Procesos Físicos en Fase de Vapor

Los procesos básicos de deposición por PVD son evaporación y “Sputtering”, estos surgieron antes del desarrollo de la física del plasma y del CVD térmico. En el proceso de evaporación, por calentamiento resistivo o por el bombardeo iónico de alta energía, se funde el material que luego será condensado en el sustrato. En Sputtering, el bombardeo de un material blanco con iones incidentes permite arrancar directamente átomos que luego serán depositados en el sustrato.

1.3.1.2.1.- Procesos de evaporación:^[7]

La evaporación en vacío es uno de los métodos más extendidos para depositar filmes finos, la técnica consiste en la vaporización de un material

sólido (calentándolo a altas temperaturas) que luego será condensado sobre un sustrato frío para formar una película delgada.

Dos desventajas de esta técnica tradicional son:

i) Deposición no estequiométrica de la película debido a una disociación parcial de los compuestos.

ii) Altos requerimientos de potencia para evaporar materiales con punto de fusión o sublimación elevado, como los cerámicos.

Estas desventajas han sido resueltas por los tratamientos asistidos por plasma. Las variables principales a controlar en este proceso son la velocidad de evaporación y de condensación así como la distribución espacial de los vapores que dependen fundamentalmente de la geometría de la fuente.

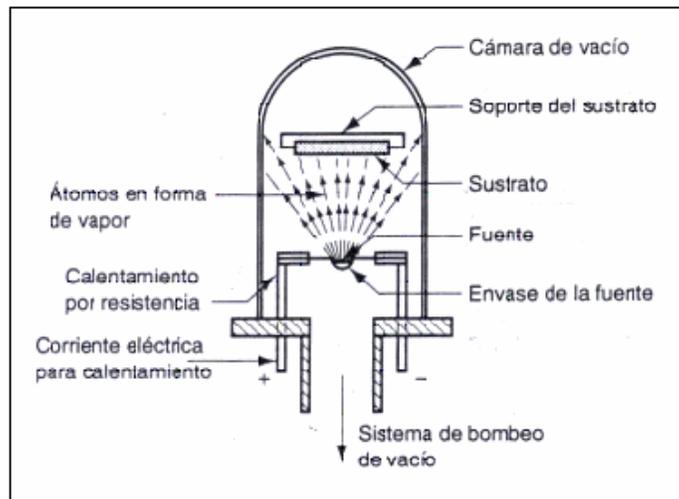


Figura 1.17. Instalación para un proceso PVD por evaporación al vacío.^[12]

1.3.1.2.2.- Procesos de Sputtering:

Se definen así a los procesos de vaporización no térmicos, en los cuales los átomos en la superficie son físicamente removidos por la transferencia de

momentum, de un bombardeo energético de especies de tamaño atómico o molecular.^[4]

Normalmente este proceso utiliza una descarga luminosa o un haz de iones para generar un flujo de iones incidentes en el material a vaporizar.

El proceso de sputtering es el más adecuado para la deposición de películas multicomponentes, donde los distintos átomos son eyectados capa por capa de un blanco multicomponentes y la película se forma homogéneamente sobre el substrato comprendiendo al blanco.

Comparado con otros procesos de deposición de película delgada, el “sputtering”, posee una cantidad de ventajas que se mencionan a continuación:

- Uso de un ilimitado número de recursos y materiales de película de deposición (metales, semiconductores, aleaciones, compuestos, etc.).
- Facilidad para la deposición a baja temperatura en materiales refractarios.
- Eliminación de las gotas producidas durante la evaporación térmica.
- Facilidad para formar capas delgadas de varios componentes.
- Uniformidad en el espesor de película sobre grandes áreas.
- Proceso ambientalmente amigable.^[4]

A su vez, este proceso posee ciertas limitaciones, y éstas son las siguientes:

- Las velocidades de deposición se encuentra por debajo de 300 nm/min.
- Costos elevados debido a los requerimientos de vacío.
- Eficiencia energética baja (70% o más de la energía es consumida para el calentamiento del blanco).^[4]

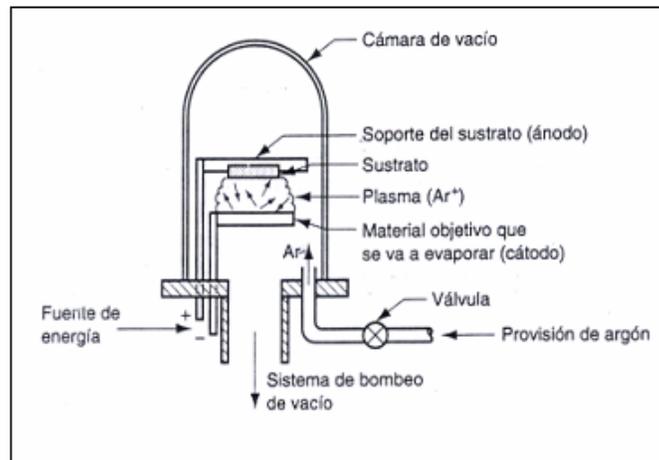


Figura 1.18. Instalación de un proceso PVD "Sputtering". [12]

Para superar este tipo de limitaciones en el proceso de sputtering tradicional, se han logrado crear variaciones del mismo, como por ejemplo poner el sustrato a potencial o negativo, o incluir campos magnéticos para obtener una mayor aceleración de iones. Los principales modelos derivados de esta técnica son los siguientes:

Sputtering tipo glow discharge: En este proceso los iones se obtienen simplemente de una descarga tipo *glow*, entre dos electrodos en un gas a baja presión. La zona más importante en este proceso es el espacio oscuro del cátodo, allí se produce la mayor caída del potencial y la consiguiente aceleración de iones.

Sputtering tipo diodo: Este es el método más utilizado debido a su simplicidad, el blanco es el cátodo y el sustrato se coloca en el ánodo o bien puede mantenerse flotante, en este caso se corre el riesgo de que atraiga material contaminante o iones del gas que contaminen la película.

Bias Sputtering: Este arreglo consiste en la aplicación de un potencial negativo al sustrato mucho más alto con respecto al potencial aplicado al blanco. Un aspecto a considerar es que el sustrato es sometido a un bombardeo capaz de eliminar tanto gases absorbidos durante el proceso como óxidos presentes en la superficie.

Getter Sputtering: Este proceso aprovecha las propiedades del material blanco capaz de atraer ciertos átomos o moléculas por afinidad, lo que se pretende es que sea atraído hacia el blanco las impurezas presentes en el gas antes de que se inicie el proceso.

Sputtering asistido tipo triodo: la eficiencia del sputtering aumenta si se provee a la descarga con electrones auxiliares, provenientes de un filamento emisor termoiónico. Una de las ventajas de este método es el buen control que se tiene de la densidad de corriente y por lo tanto de la velocidad del sputtering, que puede llegar a ser tan alta como los procesos de sputtering por Magnetron.

Sputtering asistido por RF (Radio frecuencia): en éste no se aumenta el número de electrones, sino que se aumenta la eficiencia de ionización de los electrones presentes en la descarga, mediante la aplicación de un campo de radio de frecuencia en la zona del cátodo. Es una técnica muy versátil para la deposición de alta eficiencia sobre aisladores y semiconductores.

Magnetron Sputtering: en este proceso, la eficiencia iónica es mayor que en el proceso de sputtering clásico a bajas presiones, debido a la aplicación de un campo magnético transversal, normal al campo eléctrico, que aumenta el camino libre medio de los electrones.

Entre las ventajas más representativas de este método se encuentran las siguientes:

- La utilización eficiente de la potencia de descarga del cátodo.
- Mayor generación de densidades de corriente a tensiones más bajas.
- Velocidades de deposición mayores en un orden de magnitud a las técnicas de sputtering sin campo magnético.
- Disminución de la dispersión atómica en las paredes de la cámara y en el sustrato.
- Reducción en el calentamiento del sustrato.
- Facilidad de conversión al procesamiento a escala industrial.

1.3.1.2.3.- Ion Plating:

Este proceso consiste fundamentalmente en evaporar el material blanco mientras se bombardea simultáneamente el sustrato, el cual actúa como cátodo (tensión negativa) para atraer los iones, lo que asegura una energía suficiente para una buena adhesión del recubrimiento al sustrato.

Una vez establecido el vacío requerido en la cámara, se inyecta el gas aplicando un campo eléctrico para ionizarlo y así establecer el plasma. Esto produce un bombardeo iónico (sputtering) del sustrato, por lo que su superficie se frota hasta una condición de limpieza atómica, favoreciendo así la deposición de recubrimientos tipo multicapas. Luego, se calienta el blanco

lo suficiente para generar vapores de recubrimiento. Las moléculas de vapor pasan a través del plasma y recubren el sustrato.

Los métodos de calentamiento usados para la evaporación del blanco, son similares a los que se emplean en la técnica evaporación al vacío: calentamiento por resistencia, bombardeo con haz de electrones, etc.

Parámetros de Bombardeo en el proceso de Ion Plating. [4]

Existe una variedad de configuraciones de Ion Plating que pueden ser usadas, para los cuales se requiere el control de determinados parámetros, estos son:

- ***Tipos de iones y estado de ionización:*** la masa del bombardeo de especies es importante para la energía y momentum transferido durante la colisión.

El tipo de gas más comúnmente usado para la formación de plasma y bombardeo de iones es el argón, porque ser el menos costoso de los gases inertes. Tanto el Criptón como el mercurio han sido usados con anterioridad. Los gases reactivos comúnmente usados son el oxígeno y el nitrógeno. Una mezcla de gases inertes y reactivos es frecuentemente usada para incrementar la eficiencia de la transferencia de momentum en deposiciones reactivas.

- ***Energía de la partícula:*** la energía debería ser suficientemente alta para suministrar una transferencia energética de colisión apreciable, pero no suficientemente alta para ser físicamente implantada y atrapada en la película de deposición donde puede precipitar y formar poros. Para baja temperatura de deposición, la energía del Ion no debería

exceder de 300 eV. Si el substrato es calentado a 400 °C o más, la energía puede ser incrementada.

- ***Razón de flujo:*** la relación de átomos depositados para el bombardeo de especies es importante para las propiedades de película. Para completar la ruptura de la morfología columnar del crecimiento de película y para obtener la máxima densidad y la mínima microporosidad, la energía requerida para la deposición de las especies por bombardeo es cerca de 20 eV por deposición de átomos.
- ***Composición de gas y flujo másico:*** el gas usado para un plasma inerte debe ser libre de contaminantes (vapor de agua y oxígeno), que será activado en el plasma. Gases inertes pueden ser purificados calentando reactivos superficiales (titanio, uranio). Mezclas de gases pueden ser usados para películas de deposición teniendo propiedades y composiciones diferentes tal como el color.
- ***Uniformidad en el bombardeo:*** En Ion Plating basado en plasma, a diferencia del Ion Plating basado en el vacío, la distribución del flujo iónico y energético son difíciles de medir directamente. La consistencia, uniformidad y reproducibilidad en estos procesos son controlados teniendo una consistente fuente de vaporización, geometría del sistema, dispositivos móviles, composición y flujo del gas y poder del substrato (voltaje y corriente).
- ***Temperatura del substrato:*** en algunos casos, las películas en el proceso de Ion Plating son depositadas sin calentamiento deliberado del substrato, y esto puede ser particularmente ventajoso cuando el substrato es térmicamente sensible como por ejemplo el plástico. Para

las más altas densidades de depósito y de mayor reacción completa es generalmente deseable una elevada temperatura.

- ***Incorporación del gas:*** A bajas temperaturas del sustrato, el bombardeo de gas puede ser incorporado dentro del crecimiento de película, particularmente si la energía de bombardeo es alta. Para minimizar la incorporación del gas, la energía de bombardeo debe mantenerse por debajo de los 300 eV. Bajas temperaturas de bombardeo pueden ser usados para incorporar deliberadamente el gas dentro de la superficie de una deposición de la película.

Entre las ventajas del plasma basado en Ion Plating tenemos:

- Excelente habilidad para recubrir la superficie, bajo las condiciones apropiadas.
- Habilidad para tener un sitio de limpieza de la superficie del sustrato.
- Habilidad para introducir calor y defectos a la primera monocapa de la superficie para mejorar la nucleación, reacción y difusión.
- Habilidad para obtener buena adhesión en sistemas difíciles de deposición.
- Mejoramiento del proceso de deposición reactivo.
- Flexibilidad en los requerimientos de las propiedades de película por el control de las condiciones de bombardeo.
- El equipo o los equipos requeridos son equivalentes a los de cualquier deposición por bombardeo.
- La fuente del material de deposición puede ser de vaporización térmica, bombardeo o gases químicos.^[4]

Las limitaciones del proceso de Ion Plating se describen a continuación:

- Muchos parámetros durante el proceso deben ser controlados.
- La contaminación se elimina de la superficie pero queda en el plasma y se convierte en una variable importante del proceso.
- El proceso como tal puede ser muy dependiente de la geometría del sustrato y la fijación del mismo (uniformidad del bombardeo y disponibilidad de las especies reactivas sobre una superficie compleja puede ser difícil de obtener).
- El bombardeo gaseoso de las especies puede ser incorporado en la superficie del sustrato y en la película depositada si es usada una energía de bombardeo muy alta.
- El calentamiento del sustrato puede ser excesivo.
- Altos esfuerzos de compresión residual pueden ser introducidos en la capa de película.^[4]

Las aplicaciones típicas del Ion Plating pueden ser para:

- Buena adhesión entre la película y el sustrato, por ejemplo, plata en acero para espejos.
- Aplicación de capas eléctricamente conductoras sobre el plástico y semiconductores.
- Recubrimientos para resistencia al desgaste y la abrasión (por ejemplo: TiN y TiAlN, sobre herramientas).
- Recubrimientos decorativos aplicados a Hardware, joyerías, pistolas y cubertería.
- Protección contra la corrosión.

- Para deposición de películas aislantes, por ejemplo dióxido de silicio (SiO_2) y dióxido de Zirconio (ZrO_2).
- Deposición de cristales ópticos y capas de conducción eléctrica.^[4]

1.4.- RECUBRIMIENTOS

Los recubrimientos extraduros BALINIT[®] se depositan a temperaturas inferiores a 500 °C mediante un proceso (Ion Plating), desarrollado por la empresa Balzers. Incrementan considerablemente la dureza de la superficie y muestran una excepcional resistencia al desgaste y unas buenas propiedades de deslizamiento. Incluso una vez recubiertas, las herramientas y los componentes de precisión cumplen todos los requerimientos relativos a la tolerancia dimensional y a la agudeza de los filos. Las capas de estos recubrimientos oscilan entre 1 y 4 μm de espesor.

El BALINIT[®] tiene las ventajas de su particular buena adhesión y la baja rugosidad de la capa. Desde 1978, BALINIT[®] se ha utilizado con gran éxito no solo en herramientas de corte, sino también en herramientas utilizadas en tecnologías de conformado así como en el procesado de plásticos. En el proceso Ion Plating, la capa TiN en la herramienta crece uniformemente y reproduce el contorno de la superficie. Esto asegura una excelente agudeza del filo, especialmente porque no es necesario el redondear el filo de corte antes de recubrir, como ocurre en otros procesos como el CVD. La menor rugosidad del BALINIT[®] PVD deriva en un menor flujo de la viruta: los filos están sujetos a menores cargas térmicas.

Las herramientas de metal duro recubiertas con BALINIT[®] se distinguen por su vida útil más larga y por su mejora en el rendimiento de corte. Las principales ventajas son:

- Una mayor vida útil de la herramienta, reduce los costos de herramienta y reafilado.
- Mayores intervalos de cambio de herramientas, conducen a una reducción en los tiempos de parada de máquina.
- La mejora de la capacidad de corte disminuye los tiempos de mecanizado y ciclo, y reduce los costos unitarios.
- La mejora de la calidad de la superficie hace más fáciles las operaciones posteriores, o incluso las hace superfluas, y reduce los costos de fabricación.

Las herramientas de metal duro recubiertas con BALINIT[®] se utilizan con gran éxito en operaciones de fresado, taladrado, perforado, torneado, tronzado, ranurado, roscado, y aserrado. Entre los materiales de las piezas de trabajo se incluyen aceros de alta dureza (más de 700 MPa), aceros fundidos, fundición gris, y plásticos reforzados con fibras.

El desgaste de la superficie de incidencia y la rotura del filo son las principales razones de fallo de herramienta en el mecanizado de fundiciones. El recubrimiento BALINIT[®] retarda la aparición de estos procesos de desgaste, duplicando o incluso triplicando la vida útil de la herramienta y consiguiendo además una mejora en la calidad de la superficie de las piezas de fundición mecanizadas.

	TEER[®] DYMON iC [21]	BALINIT[®] HARDLUBE [20]	BALINIT[®] FUTURA [20]
Material recubrimiento	Diamante	TiAlN y WC/C	TiAlN
Microdureza (HV 0.05)	1400	2600 y 1000	3000
Coefficiente fricción contra acero (seco)	0.03 - 0.1	0.2	0.4
Espesor recubrimiento [μm]	2	2 - 6 (1/3 WC/C y 2/3 TiAlN)	1 - 5
Temperatura [$^{\circ}\text{C}$] máxima de trabajo	-	800 - 1000	800
Color recubrimiento	Negro	Gris oscuro	Violeta gris

Tabla 1.4. Comparación entre recubrimientos comerciales.

1.4.1. BALINIT[®] HARDLUBE

El recubrimiento *BALINIT[®] HARDLUBE* creado por Balzers hace frente a todos aquellos mecanismos de desgaste que se dan en la formación y evacuación de viruta. Este recubrimiento combina las ventajas que proporciona la alta dureza y estabilidad térmica del recubrimiento TiAlN con las buenas propiedades de deslizamiento y lubricación del recubrimiento WC/C.

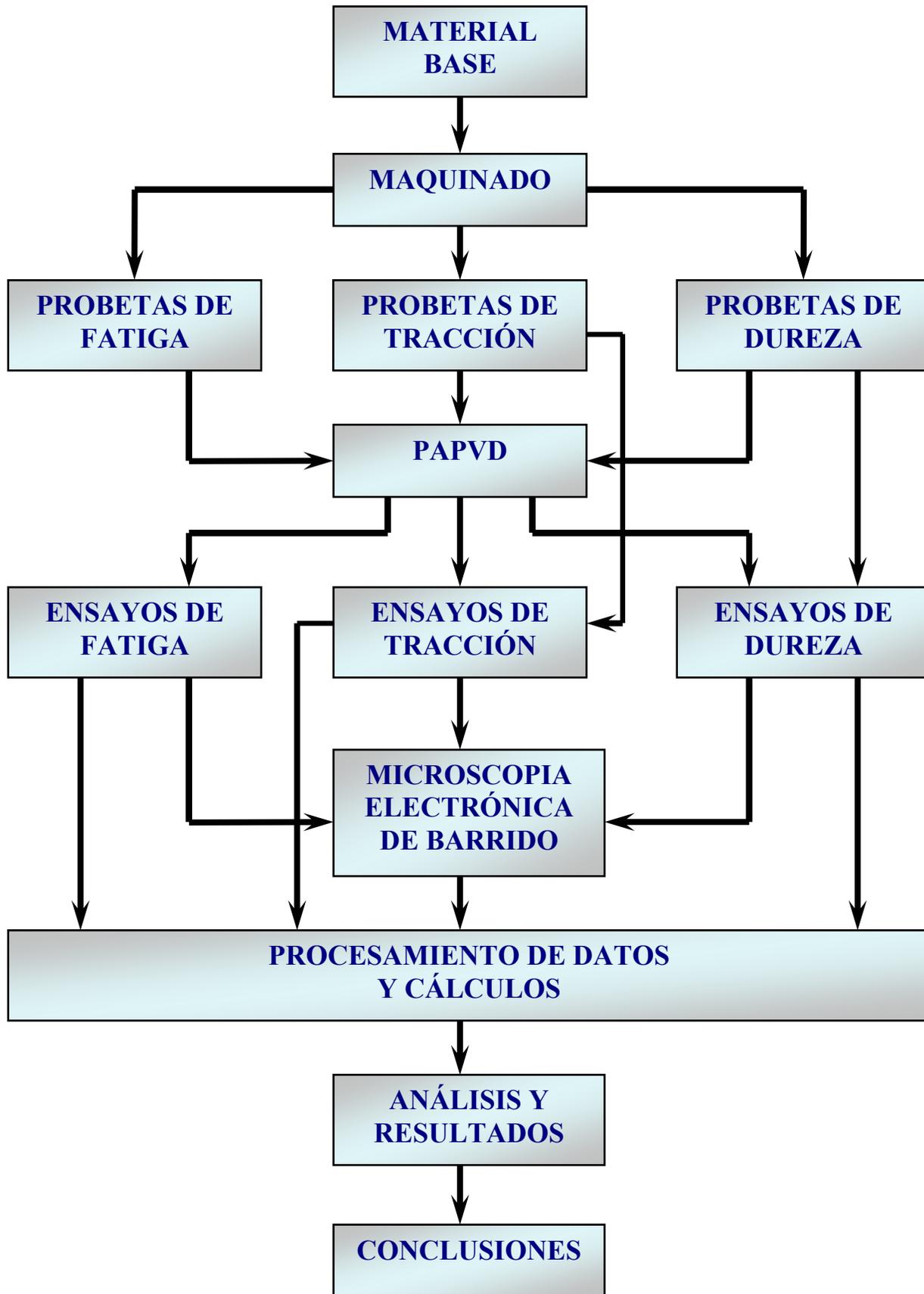
El bajo coeficiente de fricción del recubrimiento WC/C mejora el inicio del proceso de corte y da como resultado que la ranura tenga la apariencia de estar pulida después de unas pocas revoluciones. El rizado de la viruta se controla uniformemente y las virutas evacuadas encuentran poca fricción en su salida. Los momentos de torsión y las fuerzas de corte se mantienen uniformemente bajas durante la vida útil de la herramienta, incluso cuando se trabaja en agujeros profundos. [6]

Por otro lado, cuando se desgasta el recubrimiento WC/C en los filos de corte, la capa dura inferior de TiAlN protege contra el desgaste a los filos que soportan grandes cargas, incluso a temperaturas de trabajo extremadamente altas. Como resultado, la utilización de herramientas recubiertas con *BALINIT[®] HARDLUBE* permitirá el mecanizar en seco en procesos de producción donde se den varias operaciones de mecanizado.

1.4.2. BALINIT[®] FUTURA

El *BALINIT[®] FUTURA* es un recubrimiento extraduro multicapa que combina la elevada tenacidad de la estructura multicapa y la buena estabilidad térmica y química de la capa de Nitruro de Titanio al Aluminio (TiAlN). Combinando estas dos propiedades este recubrimiento protege las herramientas de corte contra el desgaste prematuro producido por tensiones severas.

Las herramientas recubiertas con *BALINIT[®] FUTURA* pueden trabajar a altas velocidades y avances, y además presentan un incremento en la vida útil de la herramienta en las más drásticas condiciones de trabajo.^[6]



2.- DESARROLLO EXPERIMENTAL

El material utilizado fue un acero AISI 4340 bonificado (templado y revenido), el cual fue obtenido de barras cilíndricas de 1/2 pulgada de diámetro, su composición química está representada en la siguiente tabla:

S	Al	P	Mo	Si	Cu	C	Mn	Cr	Ni	Fe
0.011	0.015	0.024	0.23	0.24	0.25	0.41	0.69	0.79	1.73	95.61

Tabla 2.1. Composición química del acero AISI 4340 en % en peso.

2.1.- MAQUINADO DE LAS PROBETAS Y DE ESPECIMENES

En la realización de los trabajos de maquinado, necesarios para fabricar las probetas utilizadas en los ensayos a partir del material base, se requirió de los servicios de la empresa taller metalmecánico JV C.A., ubicado en la carretera Caracas Guarenas, sector Turumo; para tal fin esta empresa cuenta con tornos de control numérico los cuales son esenciales debido a su precisión para cumplir las normas de estandarización que deben poseer las probetas a ensayar. Una vez mecanizadas las probetas, se realizó el lijado y pulido, logrando un acabado superficial adecuado, este proceso se llevó a cabo en un torno de bajas revoluciones con un movimiento del papel abrasivo en sentido longitudinal al eje de la probeta, con el fin de evitar entallas circunferenciales que puedan propiciar el inicio de grietas por fatiga, a su vez un excelente acabado superficial ayuda favorablemente en la adhesión del recubrimiento al substrato, en el caso de la aplicación de la técnica de PVD.

2.2.- DIMENSIONADO DE LAS PROBETAS

2.2.1.- Probetas de fatiga:

El dimensionado de las probetas de fatiga fue realizado aplicando la norma ASTM E-606, en la figura 2.1 se puede apreciar las relaciones que existen entre el diámetro de los hombros de la probeta, el radio continuo de la sección de ensayo, la longitud de la sección de ensayo y la longitud de la probeta con respecto al diámetro de la sección de ensayo (d). En este caso fue recomendado un valor igual a $d = 6,35$ mm.

Cabe destacar que según los manuales de la empresa fabricante del equipo a utilizar (Fatigue Dynamics), el diámetro de los hombros de las probetas de fatiga de con o sin recubrimiento son de 12,7 mm, la longitud de la probeta de 101,6 mm y la longitud de los hombros de la probeta de 31,75 mm, cumpliendo estos valores con la norma respectiva.

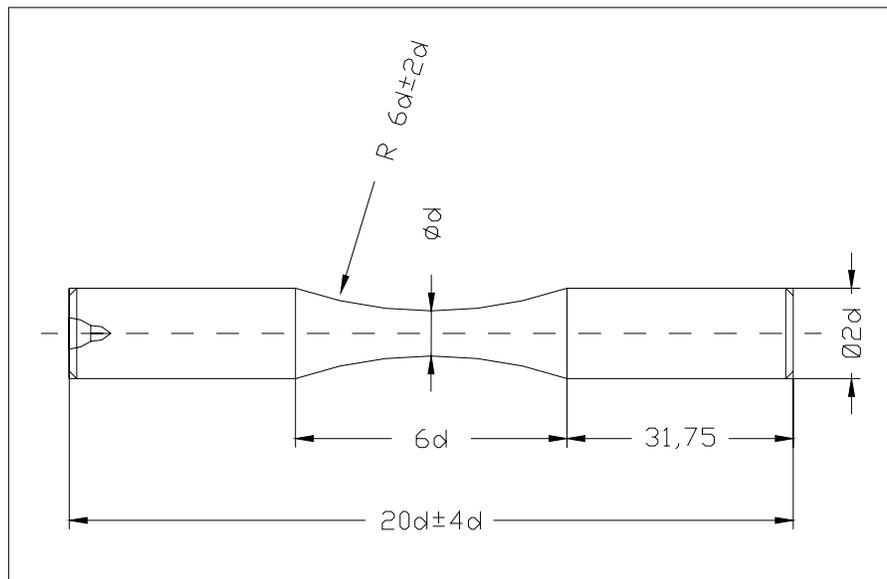


Fig. 2.1. Probeta de Fatiga. (Medidas en mm)

2.2.2.- Probetas de tracción:

Para realizar el dimensionado de las probetas de tracción fue aplicada a la sección de ensayo la norma ASTM A-370, la cual establece los siguientes criterios:

d = diámetro de las sección de ensayo

A = longitud de la sección de ensayo

R = radio del filete

Los valores de “ A ” y “ R ” varían para diferentes valores de “ d ”, este diámetro está comprendido entre 2,50 mm y 12,50 mm. Fue recomendado para realizar nuestros ensayos un diámetro $d = 6,25 \pm 0,12$ mm, y sus medidas respectivas según la norma son las siguientes:

$A = 32$ mm

$R = 5$ mm

En cuanto a la longitud total de la probeta, y la longitud de los hombros, se tomaron según los valores representados en la figura 2.2, eso para evitar la utilización de extensores en las mordazas en la máquina de ensayos de tracción. El diámetro del hombro de la probeta es el mismo de la barra cilíndrica original.

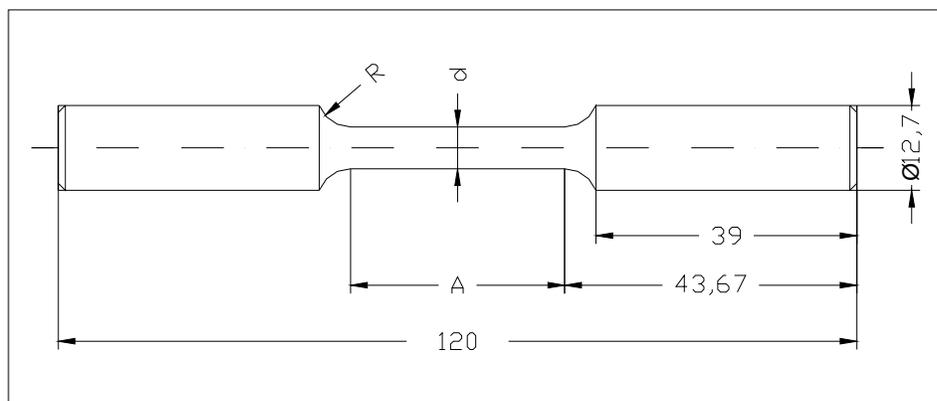


Fig. 2.2. Probeta de Tracción. (Medidas en mm)

2.2.2.- Probetas de dureza:

No existe norma en el dimensionamiento de las probetas para los ensayos de dureza. Estas fueron obtenidas de la barra cilíndrica original cortadas con una altura de 10 mm conservando el diámetro original de 1/2 pulgada (12,7 mm).

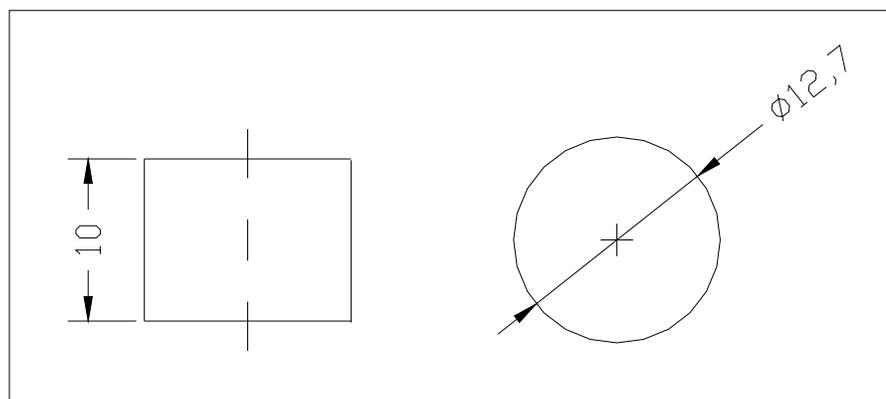


Fig. 2.3. Probeta de Dureza. (Medidas en mm)

2.3.- DEPOSICIÓN DE LOS RECUBRIMIENTOS

La técnica de deposición utilizada para recubrir las muestras a ensayar fue Deposición Física en Fase Vapor Asistida por Plasma (PAPVD), el método aplicado fue el “Ion Plating”, en específico “Arc Enhanced Magnetron Sputtering”.

Unos de los efectos de este método es que el bombardeo de iones produce un efecto de permanente limpieza sobre el substrato, ya que elimina especies débilmente unidas a la superficie. Además de esto el aporte de energía térmica promueve la movilidad superficial de las especies depositadas, lo que conduce al desarrollo de un recubrimiento con mayor perfección estructural.

Los recubrimientos depositados son conocidos comercialmente como BALINIT FUTURA y BALINIT HARDLUBE, ambos del tipo multicapa y poseen en su intercara una película de Titanio puro (Ti), para mejorar de manera considerable la adhesión del recubrimiento al sustrato; el primero constituido por capas de Nitruro de Titanio al Aluminio (TiAlN), alternadas con capas de Nitruro de Titanio (TiN), hasta formar 24 capas con un espesor total de recubrimiento de 2 μm ; el segundo está conformado en una estructura tipo bicapa de Nitruro de Titanio al Aluminio (TiAlN), y Carburo de Tungsteno (WC/C), este último con 1/3 del espesor total, el cual es de 2 μm .

El proceso de deposición fue realizado por la empresa BALZERS LTD, en Querétaro, México.

2.4.- ENSAYOS

2.4.1.- Ensayos de Fatiga:

Estos ensayos fueron realizados en el Laboratorio de Ensayos Mecánicos de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Central de Venezuela.

La máquina utilizada es de flexión rotativa tipo viga en voladizo, marca *Fatigue Dynamics*, modelo *RBF-2000*, la cual nos permite aplicar ciclos de carga de inversión completa a probetas de forma cilíndrica, ésta posee un variador de velocidad, un marcador digital de ciclos y una regla graduada en la cual se mide el momento flector aplicado a la muestra a ensayar mediante un contrapeso. Ver figura 2.4.

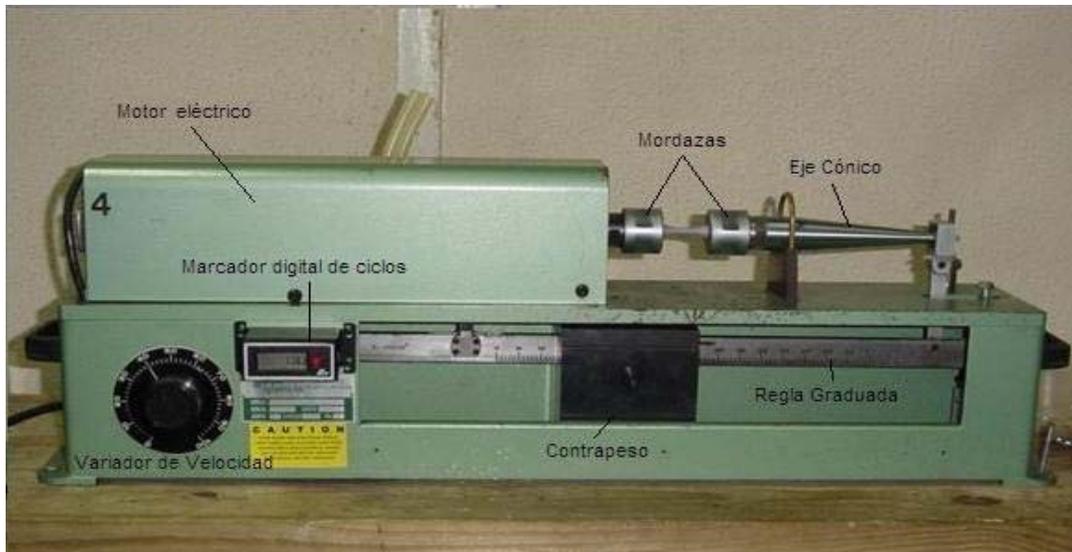


Fig. 2.4. Máquina de ensayos de Fatiga

El montaje de los especímenes se ejecutó siguiendo este procedimiento:

1. Medición del diámetro menor de la probeta (d).
2. Verificar el nivel de esfuerzo correspondiente (S).
3. Calcular el momento flector a aplicar (M).
4. Colocar las mordazas interiores en la probeta.
5. Ajustar las mordazas exteriores de manera que la muestra quede fija tanto al eje del motor, como al eje cónico.
6. Balancear la probeta.
7. Inicializar el contador digital de ciclos (ajustar a cero).
8. Ajustar la velocidad de giro.
9. Aplicar el momento flector con el contrapeso en la regla graduada.
10. Encender la máquina.

Para poder someter las probetas al esfuerzo (S), calculado en el diseño del ensayo, es necesario aplicar el momento flector (M) correspondiente,

ajustando el contrapeso en la regla graduada, ya que éste representa la fuerza necesaria para obtener dicho momento.

El momento flector (M) depende tanto del esfuerzo aplicado (S), como del diámetro menor de la probeta (d), ya que según la siguiente ecuación de esfuerzo:

$$S = \frac{M * C}{I} ,$$

Despejando tenemos

$$M = \frac{S * I}{C}$$

Donde:

I = momento polar de inercia [mm⁴]

C = distancia del eje neutro de carga a la superficie de la probeta [mm]

Para una barra circular,

$$I = \frac{\pi * d^4}{64} ,$$

Sustituyendo, se tiene que:

$$M = \frac{S * (\pi * d^4 / 64)}{d / 2} = \frac{S * \pi * d^3}{32} ,$$

Entonces el momento flector se obtiene de la siguiente manera:

$$M = 0,0982 * S * d^3 \text{ [Mpa*mm}^3\text{]}$$

Debido a que la máquina trabaja en unidades inglesas, la ecuación utilizada para calcular el momento flector a aplicar directamente en la regla graduada, es la siguiente:

$$M = 0,00087 * S * d^3 \text{ [Lbf*pulg]}$$

Para evaluar el Límite de Fatiga, se tomaron 15 probetas de cada conjunto substrato-recubrimiento; los ensayos se realizaron siguiendo el procedimiento del método de la escalera, el cual establece que al fallar la probeta, se debe aumentar el nivel de esfuerzo o escalón, al no fallar la probeta se debe disminuir este nivel. Para ambos recubrimientos se tomó un esfuerzo inicial de 575 MPa siendo éste el valor máximo de esfuerzo utilizado, y un escalón de 5 MPa. En el caso de BALINIT FUTURA el valor de esfuerzo mínimo fue de 565 MPa y para el BALINIT HARDLUBE de 545 MPa.



Figura 2.5. Probetas de ensayos Fatiga

A partir de los datos obtenidos para cada uno de los recubrimientos, se procedió a la construcción de la recta que representa el Límite de Fatiga para el conjunto substrato recubrimiento, aplicando los lineamientos que dicta el Método de la Escalera. Este método estadístico se basa en el análisis y manejo del evento de menor frecuencia, tomando como evento si la probeta “falló” o “no falló”. Considerando que una probeta “falló”, si se fractura antes de cumplir $5 \cdot 10^6$ ciclos, de lo contrario se establece que la misma “no falló”, sin importar el número de ciclos que alcance posteriormente. El valor del Límite de Fatiga se representó en una gráfica denominada curva de Wöhler, en donde el logaritmo decimal del esfuerzo alternante (S) está colocado en el eje de las abscisas, y en el eje de las ordenadas el logaritmo decimal del número de ciclos (N), obteniéndose así una mejor visualización de los resultados.

2.4.2.- Ensayos de Tracción:

Estos ensayos fueron realizados en el Laboratorio de Ensayos Mecánicos de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Central de Venezuela.

Fue utilizada una máquina universal de ensayos mecánicos marca *Instron* modelo 8502, la cual consta de un sistema de medición computarizado capaz de reportar datos con una frecuencia de 3 Hertz, se utilizó una velocidad de desplazamiento de la mordaza móvil (actuador) de 3 mm/min. Este equipo fue utilizado para ensayar un total de 6 probetas a tracción, sobre las cuales se obtuvieron datos de alargamiento y carga aplicada, mediante el análisis de estos datos se procedió a la construcción de la curva esfuerzo-deformación, para obtener así los valores de esfuerzo de fluencia (σ_y) y esfuerzo real a carga máxima (σ_{uts}) necesarios para realizar el diseño de los

ensayos de fatiga, ya que los mismos se realizaron a una fracción del esfuerzo de fluencia determinado en tracción uniaxial.



Figura 2.6. Probeta de ensayos de Tracción



Figura 2.7. Máquina de ensayos de Tracción

Corrección de los datos por efecto de la deformación elástica.

Antes de realizar las consideraciones referentes a los datos obtenidos del ensayo de tracción se debe tomar en cuenta el efecto conocido como deformación elástica que sufren los elementos de máquina durante el ensayo.

Es de suponer que la deformación sufrida por las distintas partes de la máquina (mordaza, actuadores, extensiones, etc.), es mínima pero no por esto es despreciable. Para considerar este efecto se utiliza la siguiente expresión:

$$(\Delta L_i)_{corr} = \Delta L_i - \Delta F_i \left(\frac{1}{K_{exp}} - \frac{1}{K_{prob}} \right)$$

Donde: K_{exp} y K_{pro} son la rigidez experimental del conjunto y rigidez teórica del material de la probeta, respectivamente. Dichas cantidades se expresan:

$$K_{prob} = \frac{A_0 E}{L_0} \qquad K_{exp} = \frac{\sum F_i}{\sum \Delta L_i}$$

Donde:

A_0 : área transversal inicial de la sección de ensayo de la probeta.

E : módulo de elasticidad del material.

L_0 : longitud inicial de la sección de ensayo de la probeta.

Estas ecuaciones fueron procesadas en una hoja de cálculo agilizando el proceso de corrección, una vez obtenido los datos de $(\Delta L_i)_{corr}$ para cada estado de carga correspondiente (F_i), se procedió a la construcción de la curva Esfuerzo vs. Deformación real (σ vs. ϵ), a partir de la curva esfuerzo deformación ingenieril (S vs. e), para esto se utilizaron las siguientes relaciones:

Esfuerzo ingenieril:

$$S_i = \frac{F_i}{A_o}$$

Deformación ingenieril:

$$e_i = \frac{(\Delta l_i)_{corr}}{l_0}$$

Esfuerzo real:

$$\sigma_i = S_i (1 + e_i)$$

Deformación real:

$$\varepsilon_i = \text{Ln} (1 + e_i)$$

Es importante destacar que a partir de los datos obtenidos en este procedimiento, conoceremos determinadas variable referentes al material sobre las cuales se sustentará nuestro estudio, uno de los valores más importantes es el Esfuerzo de fluencia, ya que a partir de este valor se establecerá la carga inicial que le será aplicada a la probeta en el ensayo de fatiga. Las referencias bibliográficas^[3] nos indican que el límite de la resistencia a la fatiga se encuentra generalmente, entre el 60 % y el 70 % del esfuerzo de fluencia del material, de allí que teniendo este valor de fluencia, se pueda ensayar en material a fatiga con una buena aproximación de carga para calcular su límite sin el riesgo de que el material supere su nivel de fluencia, y además estableciendo un buen punto de inicio para la aplicación del método de la escalera.

2.4.3.- Ensayo de Dureza:

Este ensayo se realizó con el fin de evaluar superficialmente la dureza compuesta del substrato-recubrimiento e inferir la dureza absoluta de los

recubrimientos. Para ello se realizaron las pruebas a cuatro probetas, una al material base, otras dos al material base recubiertas con Balinit Futura y Balinit Hardlube respectivamente, y una cuarta muestra del material base con recubrimiento, pero la indentación efectuada a ésta fue al material base como tal, de manera de determinar si el acero sufrió algún cambio en sus propiedades intrínsecas por efecto del proceso de deposición.

Se utilizó un microdurómetro marca *Leco*, con un indentador Vickers, el cual es un diamante en forma piramidal con un ángulo de 136° entre sus caras. Este sistema posee una pletina motorizada capaz de reproducir los puntos de penetración que se han programado en el diseño de la malla. Además del indentador posee un lente óptico capaz de reproducir la imagen de dicha indentación y midiendo sobre ésta, se determina la dureza de la muestra dependiendo de la longitud de la diagonal observada, con esto se diseña el modelo requerido de penetraciones de manera que los efectos de endurecimiento por deformación no alteren los resultados de la prueba. La plantilla o malla utilizada se programó para realizar 20 penetraciones por muestra, dispuestas en forma rectangular (5 x 4), con un espaciamiento entre ellas de $300\mu\text{m}$ y un barrido de carga de 25, 50, 100, 200, 300, 500 y 1000 gramos respectivamente.



Figura 2.8. Máquina de ensayos de dureza

Para el análisis de estos datos se utilizó la ecuación estándar de Vickers:

$$HV = \frac{2P \times \text{Sen}(\alpha/2)}{D^2}$$

Esta ecuación estima la dureza en función de la carga aplicada y del valor de las diagonales de la huella, en donde:

HV: representa la dureza Vickers.

P: Representa la carga aplicada.

D: Representa la longitud promedio de las diagonales.

Estos datos fueron representados para el caso del material base sin recubrir y el material base después de la aplicación del recubrimiento, en curvas de Dureza vs. Inverso de la diagonal promedio y Carga vs. Diagonal promedio en escala doble logarítmica, y para el caso de los conjuntos con Balinit Futura y con Balinit Hardlube, se graficó las curvas de Dureza vs. RID (profundidad relativa de indentación).

2.5.- ESTUDIO FRACTOGRÁFICO.

Varias probetas del material recubierto ensayadas a fatiga fueron examinadas mediante Microscopía Electrónica de Barrido (MEB), o también conocido por sus siglas en inglés SEM (*Scanning Electron Microscopy*), a fin de conocer las características topográficas de la superficie de fractura y, por ende, los mecanismos involucrados en la ocurrencia de dichas fracturas.

En el estudio fractográfico realizado por MEB se determinaron principalmente el origen y condición de la fractura de algunas probetas, para lo cual fue necesario hacer evaluaciones sobre el plano de fractura y el perpendicular al mismo. El estudio sobre el plano de fractura permitió conocer

las características del inicio y la propagación de grietas, indicando el mecanismo involucrado en ello y la condición existente durante el mismo; en tanto que el estudio sobre el corte perpendicular al plano de fractura, es decir, paralelo al plano longitudinal de la probeta, permitió identificar el origen de grietas a lo largo del conjunto substrato recubrimiento.

El estudio se llevó a cabo seleccionando dos (2) probetas fracturadas por recubrimiento, a las cuales se le aplicó un corte transversal de 7 mm a partir del plano de fractura y un corte longitudinal con igualmente 7 mm a partir de dicho plano, consiguiéndose un total de 4 muestras.



Figura 2.9. Corte Longitudinal (embutido)



Figura 2.10. Corte Transversal

Los cortes Transversales se realizaron en una máquina de disco abrasivo marca *BUEHLER*, modelo *ABRASIMET 2*, mientras que los cortes longitudinales por requerir mayor precisión se realizaron en una cortadora de disco de diamante marca *LECO*, modelo *VC-50*, como se ve en la figura 2.11.



Figura 2.11. Cortadora de disco de diamante

Luego de realizar los cortes necesarios para el estudio fractográfico, se procedió al montaje en resina termo estable de las muestras que así lo requiriesen, para ello fue utilizado el equipo marca *BUEHLER*, modelo *SIMPLIMET 3*, mostrado en la figura 2.12. Este equipo polimeriza dichas muestras bajo las siguientes condiciones: 4400 psi, 180 °C durante 8 minutos.



Figura 2.12. Equipo para Embutido

Para una obtención óptima de los datos en el estudio metalográfico, fue necesario realizar el pulido de las muestras de corte longitudinal, el cual se hizo mediante lijado con papeles esmeril de SiC, de granulometrías entre 600 y 1200 y acabado fino con paño y alúmina de 0.3 μm . Para esto se empleó la pulidora marca *BUEHLER*, modelo *ECOMET 5*, que aparece en la figura 2.13.



Figura 2.13. Pulidora BUEHLER ECOMET 5.

3.- ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1.- ENSAYOS DE DUREZA

En la **tabla 3.1**, se presentan los resultados del ensayo de dureza para el material base (AISI 4340 bonificado), y el material base después de la aplicación del recubrimiento, esto con la finalidad de determinar si dicha aplicación produce alguna modificación sobre la dureza original del sustrato. En estas tablas se reporta la carga aplicada, la Dureza Vickers y en GPa con sus respectivos promedios y desviaciones estándar, y el inverso de la diagonal promedio.

Carga [gr]	Material base en estado de entrega			Material base después de la aplicación del recubrimiento.		
	Dureza Vickers	Dureza [GPa]	1/D [mm ⁻¹]	Dureza Vickers	Dureza [GPa]	1/D [mm ⁻¹]
25	357,18	3,50	0,088	389,03	3,81	0,092
50	371,53	3,64	0,063	367,69	3,60	0,063
100	369,43	3,62	0,045	369,91	3,62	0,045
200	387,62	3,80	0,032	381,16	3,73	0,032
300	370,16	3,63	0,026	371,17	3,63	0,026
500	381,96	3,74	0,020	372,06	3,64	0,020
1000	375,59	3,68	0,014	369,21	3,61	0,014

Tabla 3.1. Resultados del ensayo de dureza del material base en estado de entrega (bonificado) y del material base después de la aplicación del recubrimiento.

En esta tabla se puede apreciar claramente que tanto el material base sin recubrir como el material base después de la aplicación del recubrimiento, presentan una homogeneidad en cuanto a la propiedad, esto se ha podido establecer ya que la dureza permanece constante con muy poca variación y muestra una baja desviación estándar para las distintas indentaciones realizadas correspondientes a cada carga.

Los valores de dureza reportados en la **tablas 3.1**, sugieren que no existe modificación en la propiedad, debido a que no se produce un cambio significativo entre los valores absolutos de dureza en ambas condiciones, por lo que se puede inferir que no hay influencia en la propiedad del substrato debido al proceso de deposición.

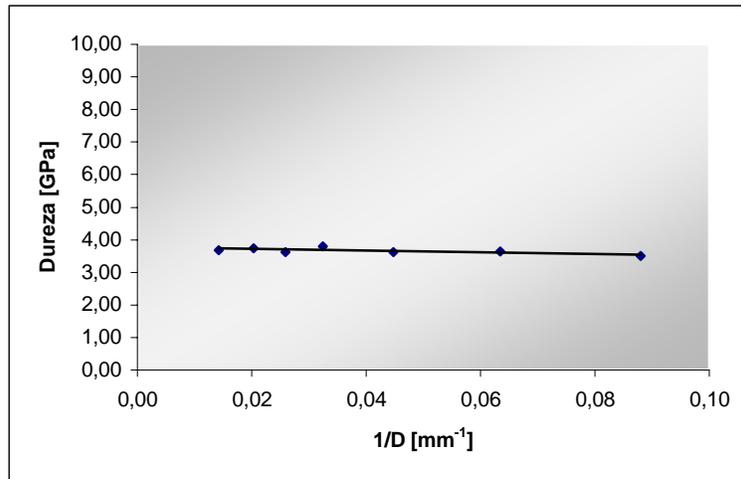


Figura 3.1. Curva Dureza vs. Inverso de la diagonal promedio del material base en estado de entrega (bonificado).

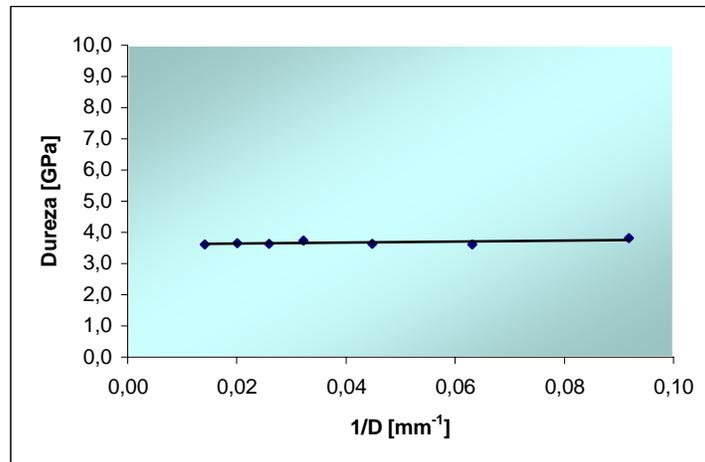


Figura 3.2. Curva Dureza vs. Inverso de la diagonal promedio del material base después de la aplicación del recubrimiento.

Las **figuras 3.1 y 3.2** presentan las curvas Dureza vs. Inverso de la diagonal promedio para el material base sin recubrir y el material base después de la aplicación del recubrimiento respectivamente. En éstas se aprecia la poca o ninguna dependencia de la dureza en función de la carga aplicada.

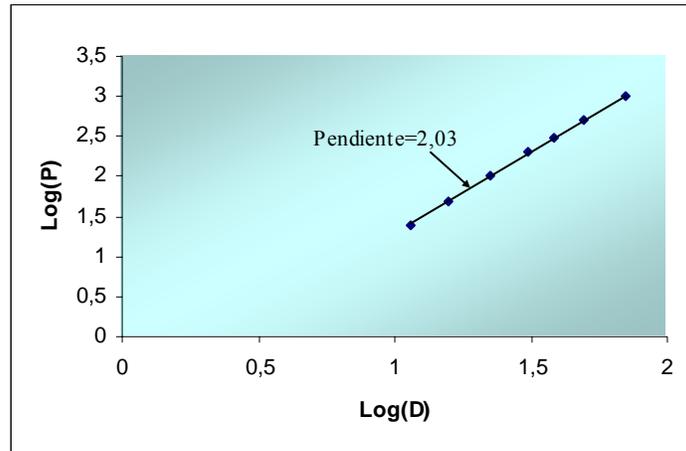


Figura 3.3. Curva Carga vs. Diagonal promedio del material base en estado de entrega (bonificado).

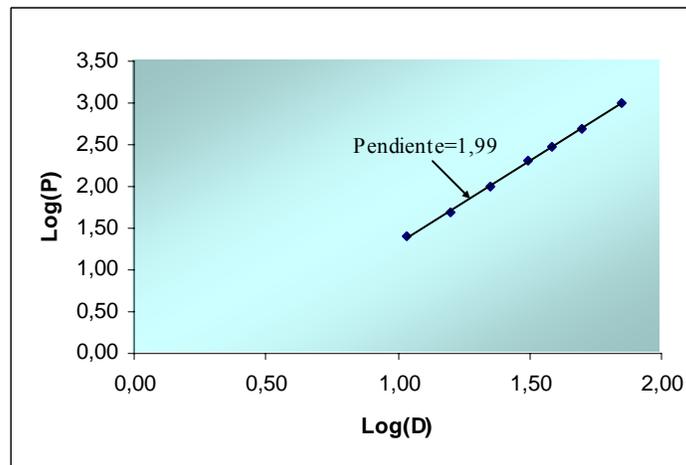


Figura 3.4. Curva Carga vs. Diagonal promedio del material base después de la aplicación del recubrimiento.

Por otra parte, las **figuras 3.3 y 3.4**, muestran la dependencia funcional que existe entre la carga aplicada y el valor de la diagonal promedio en escala doble logarítmica permitiéndose ésta ser representada por medio de la

expresión propuesta por Meyer ($P = K D^n$), encontrando que el valor de n' para el material base sin recubrir es igual a 2,03 y para el material base después de la aplicación del recubrimiento es igual a 1,99. Ya que este valor de n se puede relacionar directamente con el coeficiente de endurecimiento por deformación del material, una pendiente aproximadamente igual a 2, sugiere de acuerdo a este autor [9], que las propiedades intrínsecas del material base con y sin recubrimiento, se asemejan a las propiedades en estado de recocido.

Carga [gr]	RID	Dureza Vickers	Dureza [GPa]
25	0,646	563	5,51
50	0,923	551	5,39
100	1,341	522	5,11
200	1,943	498	4,88
300	2,507	449	4,40
500	3,370	414	4,05
1000	4,911	390	3,82

Tabla 3.2. Resultados del ensayo de dureza para el conjunto con Balinit Hardlube.

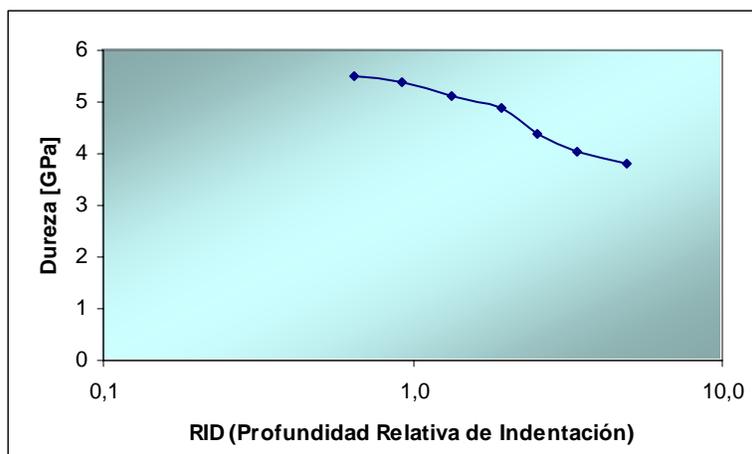


Figura 3.5. Curva dureza vs. Profundidad Relativa de Indentación del conjunto material base Balinit Hardlube.

Así mismo en la **tabla 3.2** y en la **figura 3.5**, se puede visualizar el comportamiento del aporte realizado por el recubrimiento Balinit Hardlube, a la propiedad de dureza del conjunto substrato recubrimiento. Se aprecia que dicho aporte es mayor para cargas bajas, ya que al aumentar el RID, el cual está relacionado directamente con la carga aplicada, disminuye la dureza, siendo comparable los valores de dureza a cargas altas (3,82 GPa para 1000 gr), a los valores promedio de dureza del acero (3,67 GPa), los que implica que ya a este nivel de carga, el recubrimiento no aporta al valor de la propiedad evaluada.

Carga [gr]	RID	Dureza Vickers	Dureza [GPa]
25	0,428	1282	12,56
50	0,697	965	9,46
100	1,322	538	5,27
200	1,957	491	4,81
300	2,464	465	4,56
500	3,300	432	4,23
1000	4,774	412	4,04

Tabla 3.3. Resultados del ensayo de dureza para el conjunto material base Balinit Futura.

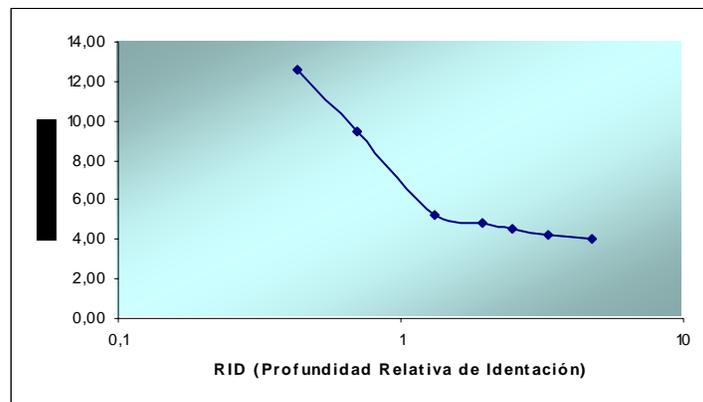


Figura 3.6. Curva dureza vs. RID del conjunto material base Balinit Futura.

El comportamiento del aporte realizado por el recubrimiento Balinit Futura, ver **tabla 3.3** y **figura 3.6**, es análogo al observado para el Balinit Hardlube, en donde para bajas cargas (25 a 100 gramos), la dureza del conjunto es mayor que la del material base para esas mismas cargas. Una diferencia que se observa entre estos dos comportamientos, es que el conjunto con Balinit Futura posee una dureza mayor para estas cargas que el conjunto con Balinit Hardlube. Esto es, para 25 gr el conjunto con Balinit Futura reportó un valor de dureza de 12,5 GPa, y el conjunto con Balinit Hardlube de 5,5 GPa, y para una carga de 50 gr el conjunto con Balinit Futura y el conjunto con Balinit Hardlube reportaron valores de 9,4 GPa y de 5,4 GPa respectivamente. Estos valores se traducen en aumentos de 230 % para el conjunto con Balinit Futura y en 44 % para el conjunto con Balinit Hardlube con una carga de 25 gr, con respecto a la dureza promedio del acero. A pesar de esto, no se puede concluir sobre el valor absoluto de dureza de la película como tal.

3.2.- ENSAYOS DE TRACCIÓN

A continuación en la **tabla 3.4**, se muestran los resultados obtenidos en los ensayos de tracción, y en la **figura 3.7** se presentan las curvas unificadas de esfuerzo real vs. Deformación real, del material base y de los conjuntos substrato recubrimiento Balinit Hardlube y Balinit Futura. Los valores reportados exponen un aporte de los recubrimientos a la propiedad, tanto de fluencia como en la resistencia a la tracción, notándose un aumento del 4,7 % en el esfuerzo de fluencia y 4,2 % en el esfuerzo real a carga máxima en el conjunto con Balinit Futura, y 4,8 % en el esfuerzo de fluencia y 5,4 % en el

esfuerzo real a carga máxima en el conjunto con Balinit Hardlube, con respecto al material base. Se deduce que este aumento es debido a la presencia de la película, ya que en el ensayo de dureza fue demostrado que las propiedades intrínsecas del material no fueron modificadas durante el proceso de deposición, y que tanto la película como el material base ejercen resistencia en dirección a la carga aplicada en una proporción regida al menos para el rango elástico por una Ley de Mezclas simple.

El aumento del valor del esfuerzo de fluencia de los conjuntos con respecto al material base, se debe a que el recubrimiento produce un incremento en la rigidez del conjunto. Por otra parte, el aumento del esfuerzo real a carga máxima de los conjuntos con respecto al material base, podría ser explicado en base a la teoría elemental de dislocaciones, que expone el endurecimiento por deformación como consecuencia de un incremento en la densidad de dislocaciones y en su movilidad en los sólidos, y en nuestro caso la película representa un obstáculo para la movilidad de las dislocaciones, evitando que éstas abandonen el sólido generando un escalón en su superficie libre.

	Material Base	Balinit Hardlube	Balinit Futura
Esfuerzo de Fluencia, σ_y [MPa]	962	1009	1007
Esfuerzo Real a Carga Máxima, σ_{uts} [MPa]	1102	1162	1148

Tabla 3.4. Resultados de los ensayos de tracción.

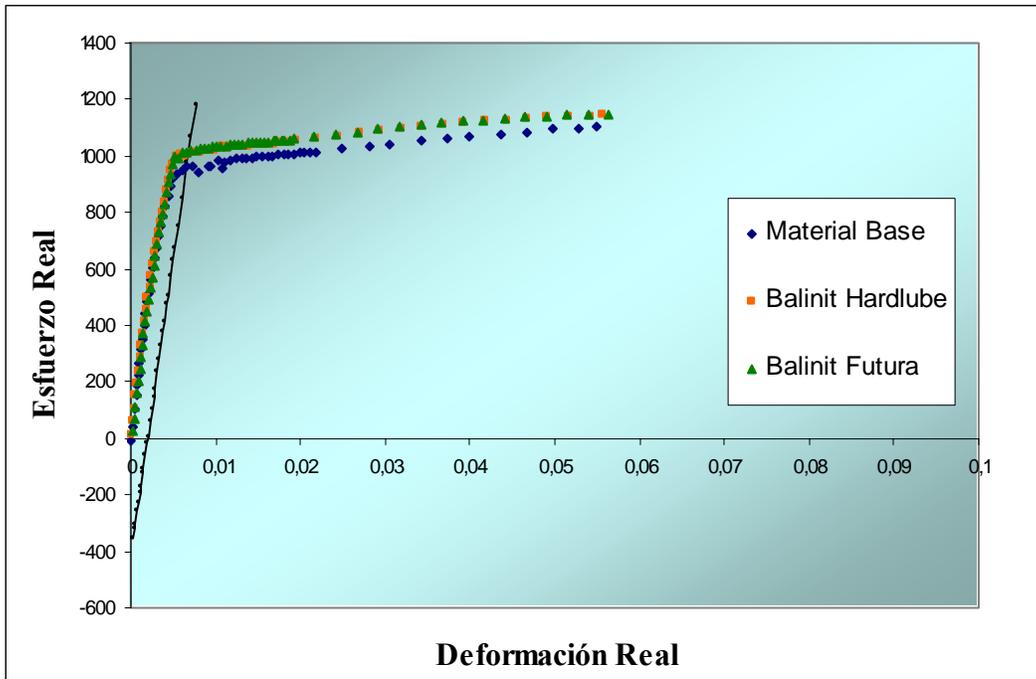


Figura 3.7. Curva Esfuerzo Real vs. Deformación Real unificada.

3.3.- ENSAYOS DE FATIGA.

A continuación en las **tablas 3.5, 3.8 y 3.11** se presentan los resultados obtenidos en los ensayos, necesarios para el cálculo del límite de resistencia a la fatiga para el conjunto acero AISI 4340 - Balinit Hardlube y el conjunto acero AISI 4340 - Balinit Futura.

En las **tablas 3.6 y 3.9** se disponen los resultados del comportamiento de los especímenes sometidos a fatiga, para la aplicación del método de la escalera, y de esta manera poder visualizar claramente si una probeta falló o no falló y a qué nivel de esfuerzo. En las **tablas 3.7 y 3.10** se muestran los coeficientes necesarios para la utilización de la ecuación (ecuación 1.4), que determina el límite medio de fatiga, tanto para el conjunto con Balinit Futura como para el conjunto con Balinit Hardlube.

Probeta	S_i [MPa]	N [ciclos]
1	575	358.900
2	570	216.500
3	565	5.000.000
4	570	5.000.000
5	575	1.497.800
6	570	222.200
7	565	5.000.000
8	570	5.000.000
9	575	166.800
10	570	888.700
11	565	520.100
12	560	5.000.000
13	565	5.000.000
14	570	4.707.800
15	565	244.200

Tabla 3.5. Resultados de los ensayos de fatiga para el conjunto con Balinit Futura.

S_i (MPa)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
575	x				x				x						
570		x		o		x		o		x				x	
565			o				o				x		o		x
560												o			
Falló = x			No Falló = o												

Tabla 3.6. Método de la escalera para el conjunto con Balinit Futura.

S_i [MPa]	i	p_i	$i \cdot p_i$	$i^2 \cdot p_i$
570	2	2	4	8
565	1	3	3	3
560	0	1	0	0
Σ		6	7	11
		N	A	B

Tabla 3.7. Datos para el cálculo del Límite de Fatiga para el conjunto con Balinit Futura.

Probeta	S_i [MPa]	Ciclos
1	575	436.800
2	570	3.080.700
3	565	581.600
4	560	619.900
5	555	5.000.000
6	560	46.100
7	555	639.200
8	550	5.000.000
9	555	5.000.000
10	560	21.870
11	555	5.000.000
12	560	160.700
13	555	2.987.800
14	550	483.200
15	545	105.200

Tabla 3.8. Resultados de los ensayos de fatiga para el conjunto con Balinit Hardlube.

S_i (MPa)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
575	x														
570		x													
565			x												
560				x		x				x		x			
555					o		x		o		o		x		
550								o						x	
545															x
Falló = x			No Falló = o												

Tabla 3.9. Método de la escalera para el conjunto con Balinit Hardlube.

S_i [MPa]	i	p_i	$i \cdot p_i$	$i^2 \cdot p_i$
555	1	3	3	3
550	0	1	0	0
Σ		4	3	3
		N	A	B

Tabla 3.10. Datos para el cálculo del Límite de Fatiga para el conjunto con Balinit Hardlube.

	Material Base	Balinit Hardlube	Balinit Futura
Límite de Fatiga [MPa]	501 _[14]	556,25	568,33
Desviación Estándar	-	1,7536	4,0599

Tabla 3.11. Resultados de Límite de Fatiga.

Los valores de límite de resistencia a la fatiga para ambos recubrimientos, muestran un incremento considerable con respecto al límite de resistencia a la fatiga del acero sin recubrir. Para el conjunto substrato recubrimiento con Balinit Futura se tiene un aumento de 13,47 % y para el Balinit Hardlube de 11,02 %, con respecto al material base. Este comportamiento podría ser atribuido a la presencia de esfuerzos residuales en compresión, generados en la superficie del material, derivados de la aplicación del recubrimiento por el proceso de deposición física en fase de vapor asistida por plasma, como lo expone la bibliografía_[8], que el incremento a la vida a la fatiga de especímenes recubiertos con componentes cerámicos (TiN y TiAlN), es debido a que los esfuerzos residuales en compresión favorecen el retraso de la iniciación de grieta, y estos pueden alcanzar valores entre 4 y 5 GPa.

Evaluando las ecuaciones de vida a la fatiga de la **figura 3.8** obtenidas de la bibliografía _[17], para un valor de ciclos de 1×10^6 para cada recta asociada a cada conjunto, se obtuvo una diferencia entre el conjunto con Balinit Futura y el material base de 11,78 %, y entre el conjunto con Balinit Hardlube y el material base de 10,58 %. Esto expone que no existe una amplia variación con respecto a las diferencias calculadas para el límite medio de fatiga. Como se aprecia en la figura, para bajo ciclaje con altos esfuerzos, la tendencia de las rectas de vida a la fatiga, muestra una disminución en esta diferencia, caso

contrario ocurre cuando las rectas de vida a la fatiga se aproximan a las rectas horizontales que expresan el valor del límite de resistencia a la fatiga.

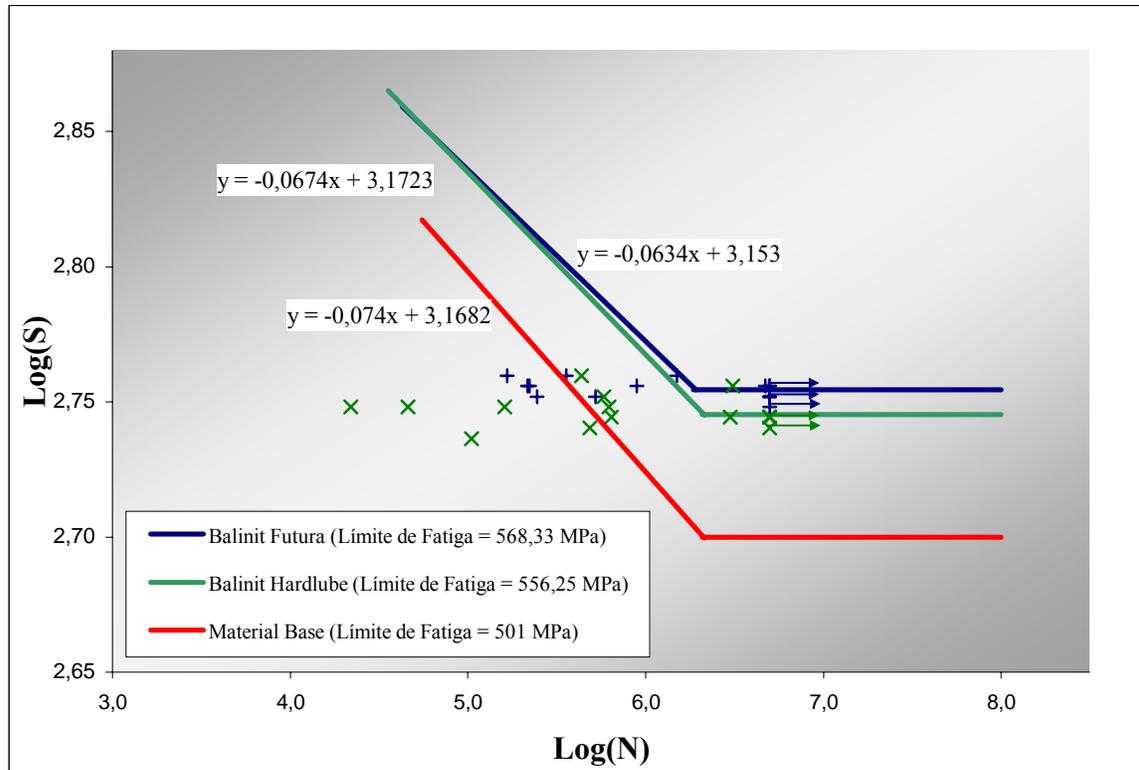


Figura 3.8. Curva de Wöhler unificada.

3.4.- ESTUDIO FRACTOGRÁFICO.

A continuación se muestran los resultados obtenidos de la evaluación fractográfica realizada con el Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) de las probetas fracturadas. En la **Fig. 3.9**, se presentan las superficies de fractura de las probetas recubiertas con Balinit Futura. En las mismas es posible identificar las distintas zonas características de la fractura por fatiga. Una zona lisa, correspondiente al crecimiento y avance de la grieta, y una zona rugosa caracterizada por la presencia de microhoyuelos, aspecto típico de la zona de falla por sobrecarga. También podemos observar algunas marcas radiales que indican el origen y la dirección de propagación de la grieta, así como el punto

de convergencia de éstas. Particularmente en la **Fig. 3.9 b**, se presentan múltiples puntos de inicios de grietas en la periferia de la superficie, lo cual se evidencia por la presencia de varios escalones de clivaje, como consecuencia de la coalescencia de dos frentes de crecimiento de grieta. Es importante destacar, que se observa un mayor número de sitios de inicio de grietas a medida que el esfuerzo aplicado es mayor, aunque la diferencia entre los niveles de esfuerzos no es muy significativa en cuanto a su magnitud.

En la **Fig. 3.10** se muestran las macrografías de las probetas recubiertas con Balinit Hardlube. En éstas, al igual que en las recubiertas con Balinit Futura, podemos diferenciar las zonas características de fractura por fatiga. Se puede apreciar la zona lisa de avance de la grieta, la zona rugosa de falla por sobrecarga y también, análogamente al estudio anterior, se pueden observar los múltiples inicios de grieta, caracterizados por la presencia de varios escalones de clivaje, debidos a la coalescencia del frente de dos grietas en propagación.

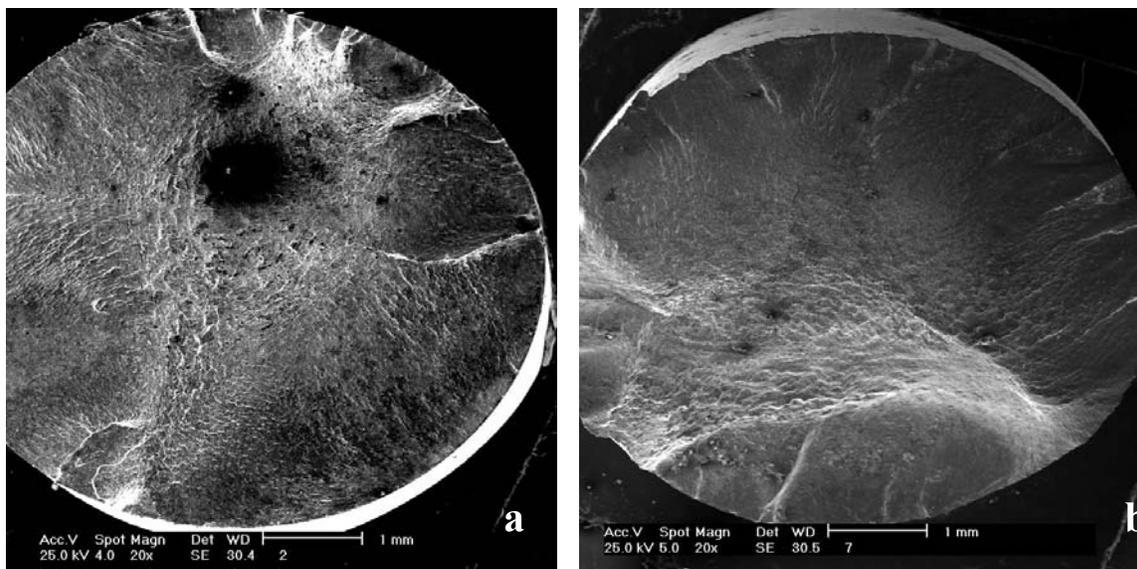


Figura 3.9. Macrografías del conjunto con Balinit Futura. **a)** Muestra ensayada a un nivel de esfuerzo de 575 MPa. **b)** Muestra ensayada a un nivel de esfuerzo de 560 MPa.

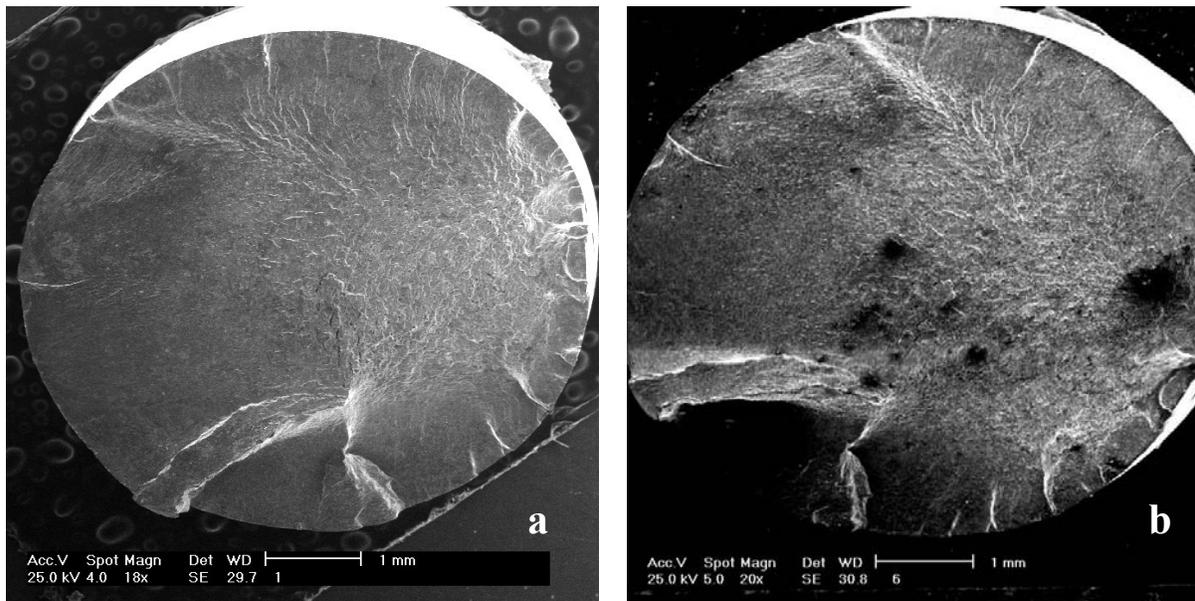


Figura 3.10. Macrografías del conjunto con Balinit Hardlube. **a)** Muestra ensayada a un nivel de esfuerzo de 575 MPa. **b)** Muestra ensayada a un nivel de esfuerzo de 555 MPa.

En la **Figura 3.11** se muestra una vista de la cara lateral de una probeta recubierta con Balinit Hardlube, observando una condición de agrietamiento del recubrimiento. En el detalle mostrado en la **Fig. 3.11 a** se aprecia la formación de una grieta en la superficie del recubrimiento paralela a la zona de fractura, la cual a su vez es interceptada por una grieta secundaria, generando en este punto una zona de alta deformación. Del detalle mostrado en siguiente figura (**Fig. 3.11 b**) se aprecia que el recubrimiento no puede acompañar al sustrato durante la deformación plástica, de manera que el recubrimiento se fractura y permanece adherido al material base.

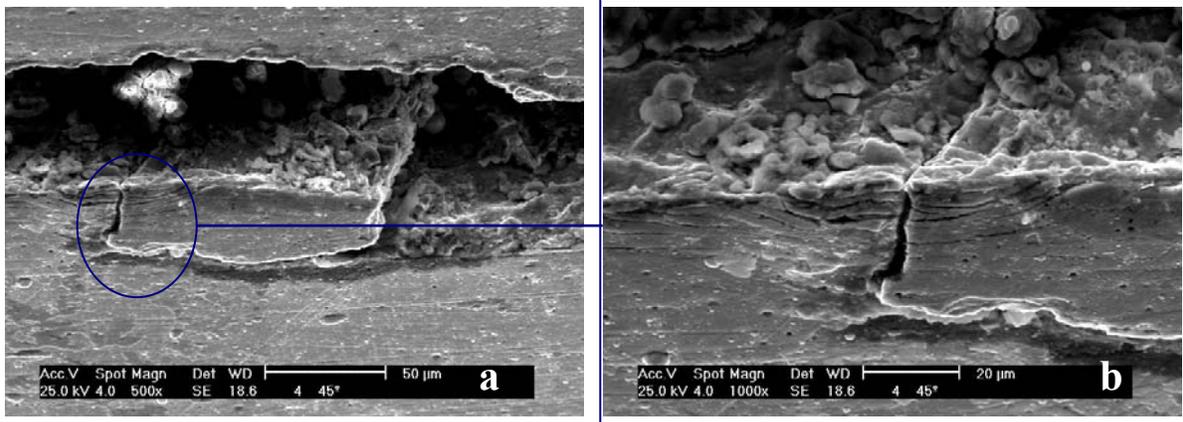


Figura 3.11. Micrografías del conjunto con Balinit Hardlube, vista a 45°. a) Grieta en la superficie del recubrimiento b) Detalle de la grieta.

La **Fig. 3.12** presenta la superficie del recubrimiento Balinit Futura. Una vista en detalle a magnificaciones considerables, revela la presencia de poros y nódulos, producidos posiblemente durante el proceso de deposición. Es importante destacar la relación que guardan todas estas grietas secundarias a nivel superficial con los poros pre-existentes. Si bien es cierto que no todos los poros son interceptados por una grieta, todas las grietas si se desplazan a través de estos poros, detalle a tomar en consideración si queremos establecer algún mecanismo de nucleación y propagación de las grietas durante el estudio.

Por otra parte, en la **Fig. 3.13** se muestra un perfil del recubrimiento donde se observa la intercara substrato – recubrimiento de una muestra recubierta con Balinit Hardlube, en la cual se encuentran bien diferenciadas las dos capas de la película que conforman el recubrimiento. La capa más externa es el carburo de tungsteno (WC/C) y la más interna es de Nitruro de Titanio al Aluminio (TiAlN). En la **Fig. 3.13 b** se muestra un detalle de la película en la cual se aprecia claramente que las grietas se originan en la intercara WC/C-TiAlN y se propaga a lo largo de dicha intercara así como

también en la dirección perpendicular a ésta, consumiendo la película de TiAlN y finalmente penetrar al substrato.

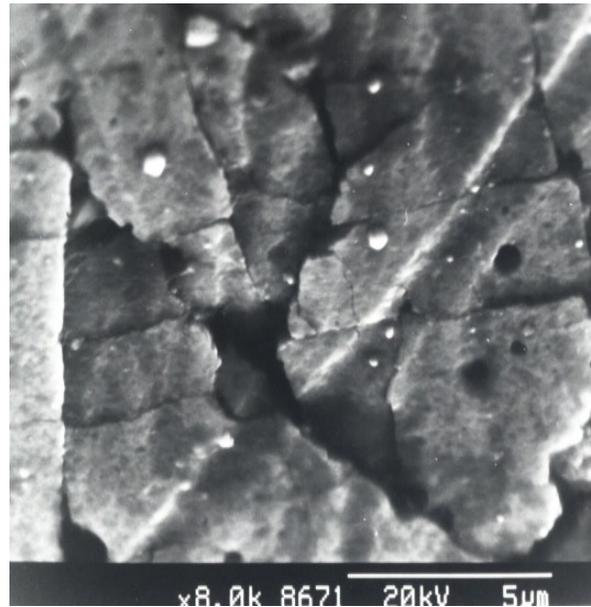


Figura 3.12. Micrografía del conjunto con Balinit Futura. Detalle de poros y grietas

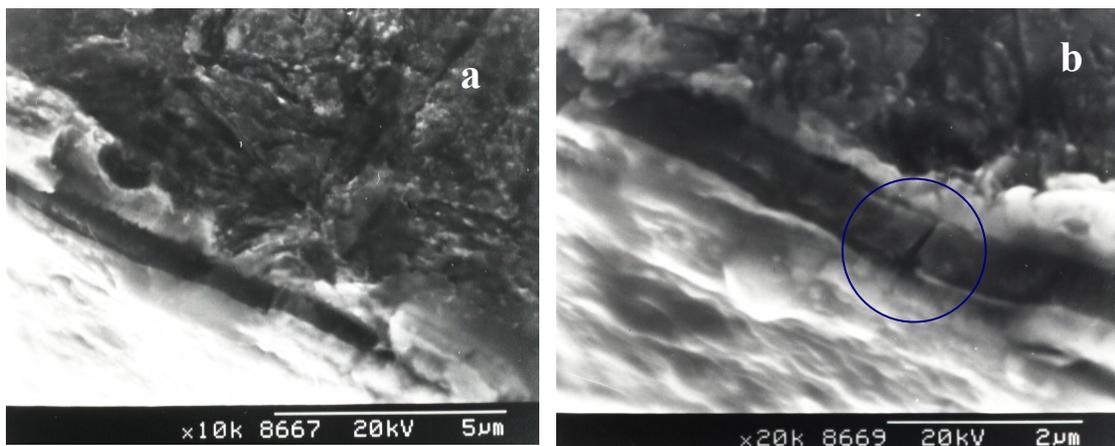


Figura 3.13. Micrografía del conjunto con Balinit Hardlube. **a)** Intercara substrato – recubrimiento. **b)** Detalle de una grieta nucleada en la intercara WC/C – TiAlN.

CONCLUSIONES

La permanencia de la muestra en el reactor durante el proceso de deposición de ambos recubrimientos, no afecta a las propiedades de dureza del material base. Esto sugiere que dicho comportamiento está asociado a la estabilidad microestructural del acero AISI 4340 en el intervalo de temperatura del proceso.

La dureza del material base presenta homogeneidad en el plano evaluado, siendo ésta extrapolable a todo su volumen.

El aporte de los recubrimientos a la propiedad de dureza compuesta para ambos conjuntos se aprecia de manera significativa en la aplicación de cargas bajas. Para cargas altas, no existe aporte apreciable en esta propiedad. El conjunto con Balinit Futura posee una dureza mayor para cargas bajas que el conjunto con Balinit Hardlube.

Tanto los valores de esfuerzo de fluencia (σ_y), así como de esfuerzo real a carga máxima (σ_{uts}), para ambos conjuntos sustrato – recubrimiento, aumentan con respecto al material base. Ambos recubrimientos producen un incremento en la rigidez del conjunto.

La presencia de los recubrimientos Balinit Hardlube y Balinit Futura incrementa el Límite de Resistencia a la Fatiga de un acero AISI 4340.

Las relaciones de los conjuntos sustrato – recubrimiento en el Límite de Resistencia a la Fatiga, con respecto al material base, se asemejan a las presentadas en vida a la fatiga para bajos esfuerzos y alto ciclaje.

Para el conjunto con Balinit Futura, las grietas de fatiga se originan en los poros pre-existentes, estas grietas luego de dejar al poro avanzan hacia el sustrato; mientras que para el conjunto con Balinit Hardlube las grietas de fatiga se originan en la intercara WC/C-TiAlN, desprendiendo la capa más externa (WC/C) y luego avanzando hacia el sustrato.

RECOMENDACIONES

Realizar un modelo basado en una ley de mezclas armónica para discutir o determinar a partir de los valores de dureza compuesta, la dureza absoluta del recubrimiento.

Realizar estudios que involucren el cálculo de los valores de los esfuerzos residuales producidos por la aplicación de este tipo de recubrimientos mediante la técnica de PAPVD, y la caracterización de éstos esfuerzos y sus efectos sobre las propiedades del sustrato.

Realizar mantenimiento preventivo a todos los equipos de laboratorio involucrados en este tipo de estudio, de manera de optimizar los resultados para así obtener confiabilidad en los mismos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1) ASM. "Fatigue and Fracture". Volumen 19. pp. 3, 27-41, 168-181.
- 2) ASM. "Fractography". Volumen 12. pp 14-22.
- 3) ASM. "Mechanical Testing". Volumen 8, pp 363-378.
- 4) ASM. Surface Engineering. "Ion Plating". Vol. 5 pp, 186-192, 538-553, 582-592.
- 5) ASTM Handbook, 1994, Malishev, Nikolaiev, Shuvalov, 1975.
- 6) BALZERS. "Catálogo".
- 7) CNEA, CAC, JICA. "Procesamiento de Materiales por Plasma". Cuarto Curso Latinoamericano. pp 1-18, 2001.
- 8) CHANG-MIN Suh, BYUNG-WON Hwang, KYUNG-RYUL Kim. "Effect of Ceramic Coating Thickness on Residual Stress and Fatigue Characteristic of 1Cr-1Mo-0.25V Steel". International Journal of Modern Physics B, Vol. 16. pp 181-188. World Scientific Publishing Company.
- 9) DIETER, George. "Mechanical Metallurgy". McGraw-Hill. Tokyo, 1986. pp 375-431.
- 10) FORREST, P.G.; "Fatiga de los Metales". Urmo ediciones. Londres, 1962. pp 72-152.
- 11) FORSYTH, P.J.E.; "The physical Basis of Metal Fatigue". American Elseiver Scientific Publishing Company. New York. pp 38-55.
- 12) GROOVER, Mikell. "Fundamentos de Manufactura Moderna". Prentice Hall. pp 828-831.
- 13) GURNEY, Timothy R. "Fatigue of Welded Structures". The Welding Institute. 2da edición. Cambridge, 1979.

- 14) L. HERNÁNDEZ, F. Oliveira, J. A. Berríos, C. Villalobos, A. Pertuz y E. S. Puchi Cabrera. “Comportamiento a la Fatiga de un Acero AISI 4340 Recubierto con Colmonoy 88, Mediante la Técnica de HVOF”. Libro de Resúmenes de las Jornadas de Investigación de la Facultad de Ingeniería-UCV, JIFI 2000, y Segundo Encuentro Académico Industrial de la Facultad de Ingeniería-UCV, Noviembre, 2000, p. 257.
- 15) SHIGLEY, Joseph E. “Diseño en Ingeniería Mecánica”. Mc Graw-Hill. Quinta edición. México, 2001. pp 302-344.
- 16) THORNTON /Y/ COLANGELO, 1987; Catalogo Ferrum.
- 17) VILLALOBOS G., Crisanto. “Influencia de Depósitos de Tipo Multicapa en el Comportamiento a La Fatiga al Aire sobre un Acero AISI 4340”. Jornadas de Investigación de la Facultad de Ingeniería-UCV, JIFI 2002.

Referencias Web

- 18) UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA:
http://www.utp.edu.co/~publio17/ac_aleados.htm
- 19) METALS SUPPLIERS ONLINE:
<http://www.suppliersonline.com/Research/Property/result.asp?FamilyID=1&MetalID=67&Chemical=1&Physical=1&Mechanical=1>
- 20) BALZERS:
www.balzers.com
- 21) TEER COATINGS:
<http://www.teercoatings.co.uk/index.php?page=dymonic>