

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

Estudio del Comportamiento a la Fatiga al Aire y Fatiga
Corrosión de una Aleación de Aluminio AA 7075-T6
Recubierta con una Película de ZrN Depositada por el
Método PVD
(Deposición Física en Fase de Vapor).

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela

Por los Bachilleres:
Lorenzo R. Ron Pedrique P.
Bernardo Naveira N.
Para optar por el Título de
Ingeniero Mecánico.

Caracas, 2006

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

Estudio del Comportamiento a la Fatiga al Aire y Fatiga
Corrosión de una Aleación de Aluminio AA 7075-T6
Recubierta con una Película de ZrN Depositada por el
Método PVD
(Deposición Física en Fase de Vapor).

Tutor: Prof. Eli Saul Puchi Cabrera

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela

Por los Bachilleres:
Lorenzo R. Ron Pedrique P.
Bernardo Naveira N.
Para optar por el Título de
Ingeniero Mecánico.

Caracas, 2006

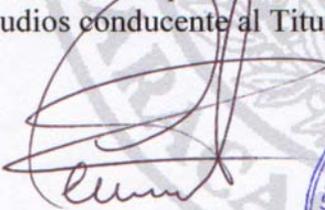
Caracas, 22 de febrero de 2.006

ACTA

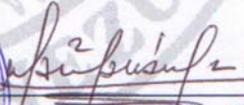
Los abajo firmantes, Miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por los bachilleres *Lorenzo Ron Pedrique* y *Bernardo Naveira*, titulado:

“ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO A LA FATIGA AL AIRE Y FATIGA-CORROSION DE UNA ALEACIÓN DE ALUMINIO 7075-T6 RECUBIERTA CON UNA PELÍCULA DE ZrN DEPOSITADA POR PVD (DEPOSICIÓN FÍSICA EN FASE DE VAPOR)”.

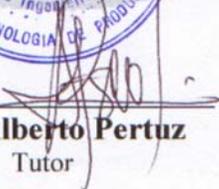
Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el Plan de Estudios conducente al Título de Ingeniero Mecánico.



Prof. Crisanto Villalobos
Jurado



Prof. Manuel Martínez
Jurado



Prof. Alberto Pertuz
Tutor



UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍA DE PRODUCCIÓN

Los suscritos Miembros del Jurado Examinador designado por el consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela, para evaluar el Trabajo Especial de Grado, presentado por los bachilleres LORENZO R. RON PEDRIQUE P. (14.350.558) Y BERNARDO NAVEIRA N. (13.736.674), para optar al título de Ingenieros Mecánicos.

Decidimos conferirle al trabajo Especial de Grado titulado:

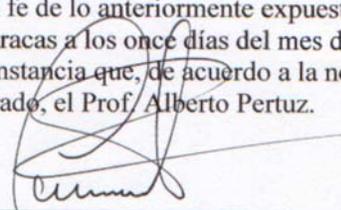
“Estudio del Comportamiento a la Fatiga al Aire y Fatiga Corrosión de una Aleación de Aluminio AA 7075-T6 Recubierta con una Película de ZrN Depositada por el Método PVD (Deposición Física en Fase de Vapor)”

la

MENCION HONORÍFICA

En reconocimiento al esfuerzo realizado y como estímulo a la actividad creativa demostrada en el transcurso de la elaboración del referido Trabajo, el cual constituye un aporte importante.

En fe de lo anteriormente expuesto se levanta la presente Acta en la ciudad de Caracas a los once días del mes de febrero del año dos mil seis, dejándose constancia que, de acuerdo a la normativa vigente, actuó como coordinador del jurado, el Prof. Alberto Pertuz.

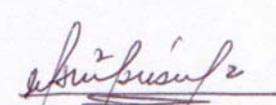

Prof. Crisanto J. Villalobos G.

Jurado




Prof. Alberto Pertuz

Profesor Tutor Suplente


Prof. Manuel Martínez

Jurado

DEDICATORIA

A mis abuelos Raúl Peña Hurtado y Josefina Torres, por el cariño y apoyo que desde que tengo memoria no han dejado de brindarme. El mundo sería un mejor lugar si existiesen mas personas como ustedes...

Lorenzo Ron Pedrique Peña.

DEDICATORIA

A mi familia en especial a mis padres,
por todo y porque sin ellos nunca hubiese llegado a este día.

Bernardo Naveira Núñez.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por acompañarnos en todo momento y haber querido que esto sea posible.

A mi Mami, por el apoyo sin límite que me ha ofrecido siempre y por enseñarme que nada importa más en la vida que sentirse satisfecho con el trabajo realizado. T.Q.M

A mi Abuela bella, por todo el amor y tantas comidas que con increíble dedicación me ofreció a lo largo de toda la carrera y porque sin importar lo difícil de cualquier situación siempre me ayudó a resolverla con una sonrisa.

A mi Vida, Carmen Cecilia Sánchez, por el cariño, amor, alegría y mucho más, que nunca en todos estos años ha dejado de brindarme. Te Amo.

A mi Abuelo, sin el cual ni de broma esto hubiera sido posible, por ser la razón de mi motivación y porque nunca dejó de creer en mi.

A mi Papá, por el cariño y apoyo brindado a lo largo de la carrera. Y por enseñarme la importancia de la perfección en cualquier trabajo realizado.

A mis Hermanos y Hermanas, por ser las personas más panas e increíbles que he conocido. Espero que les sirva de motivación. Los quiero más que nada en el mundo.

A Rafe y a May, porque con su cariño, consejos e inteligentes puntos de vista me han hecho ver una nueva perspectiva de la vida.

A Bernardo, Force, Julio, Jose M, Boris, Geffrey, David, Nei, Fernando, Pollo, Fufu, Louis, Goyo, Chino, Will, Mini, Cindy, Antonio, Mary, Ronnie y muchos más que me han enseñado que la amistad verdadera no tiene comparación en la vida.

A Crisanto, por ser el ejemplo de vocación y dedicación que todos deberíamos seguir, por la gran ayuda prestada en la realización de este trabajo y por demostrar que es posible llevar de la mano la enseñanza y la amistad. Gracias por no dejarnos morir. Gracias por la oportunidad.

A los muchachos del laboratorio por toda la ayuda prestada.

Al profesor Puchi por la oportunidad.

Al FONACIT por el financiamiento concedido.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por darme la dicha de tener la mejor familia del universo.

A mis abuelos, que Dios los tenga en su gloria.

A mis PADRES, por ser la fuerza y la inteligencia que me impulsaron a alcanzar todos mis logros y son referencia obligada en las decisiones más importantes de mi vida; por su apoyo, paciencia, ayuda, bendición, fortaleza, cuidados y protección incondicional, son las personas más importantes en mi vida.

A mis Hermanos, por ser como son y estar siempre conmigo sin importar la situación enseñándome el valor que tiene la amistad.

A mi Princesa Melina, por alegrarme la existencia y ser el amor de mi vida. No existen palabras para expresar cuanto TE AMO.

A mi compañero de tesis y Amigo Lorenzo, por su excelente desempeño durante la tesis y ser una de las mejores personas que conozco.

A Crisanto, por su dedicación y vocación, por su actitud positiva y acertados consejos a la hora de cualquier duda en el desarrollo de este trabajo.

A Rolando, a Wilfredo y demás compañeros y profesores de la universidad, que de alguna u otra manera me apoyaron ante las adversidades y mostrarme que existen diferentes maneras de solucionar un mismo problema.

Al FONACIT por el financiamiento concedido.

A todos, Gracias.

RON PEDRIQUE P. LORENZO R. /y/ NAVEIRA N. BERNARDO

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO A LA FATIGA AL AIRE Y FATIGA CORROSIÓN DE UNA ALEACIÓN DE ALUMINIO AA 7075-T6 RECUBIERTA CON UNA PELÍCULA DE ZrN DEPOSITADA POR EL MÉTODO PVD (DEPOSICIÓN FÍSICA EN FASE DE VAPOR).

Tutor: **Prof. Eli Saul Puchi Cabrera**

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

Escuela de Ingeniería Mecánica. 2006.

Palabras claves: Comportamiento a la Fatiga, 7075 T6, PAPVD, ZrN.

RESUMEN

Se evaluó el comportamiento a la fatiga y corrosión-fatiga de la aleación de aluminio 7075-T6 con un recubrimiento de ZrN, obtenido mediante deposición física en estado de vapor (PVD), por medio de un sistema de bombardeo iónico por magnetrón desbalanceado de campo cerrado (CFUMS). El espesor del recubrimiento fue de 1.6 μm . La dureza absoluta de este recubrimiento ha sido estimada mediante un modelo teórico que separara la contribución del mismo, resultando aproximadamente 21 GPa. Al comparar los resultados obtenidos de ensayos de tracción del material recubierto con datos previos del material sin recubrir, se aprecia una disminución aproximada del 26.4% en la resistencia a la tracción (σ_{uts}) luego de la deposición. Así mismo, se obtuvieron reducciones en la vida a la fatiga entre un 98% para 269 MPa y un 160% para 377 MPa, mientras que para los ensayos de corrosión-fatiga varió en un 11% para 219 MPa y un 82% para 323 MPa. Tales reducciones han sido atribuidas a una alteración de las propiedades del sustrato, como consecuencia de una elevada temperatura durante el proceso de deposición. 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 las grietas, se observó que para las probetas ensayadas al aire las grietas se nuclean indistintamente en la superficie del recubrimiento o la intercara con el sustrato, mientras que en los ensayos en medio corrosivo las grietas observadas nucleaban sobre la superficie del recubrimiento, se atribuye este comportamiento al efecto del medio corrosivo que influye sobre el recubrimiento corroyéndolo, despegándolo o creando picaduras que actúan como concentradores de esfuerzo que facilitan la nucleación de grietas a partir de la superficie externa.

ÍNDICE GENERAL

I. Fundamento Teórico

1.1. Aleación Comercial de Aluminio 7075-T6

1.1.1. Propiedades

1.1.2. Fatiga en Aleaciones de Aluminio

1.1.3. Corrosión Fatiga en Aleaciones de Aluminio

1.1.4. Aplicaciones

1.2. Fatiga de Metales

1.2.1. Fallas producidas por fatiga

1.3. Resistencia y Vida a la Fatiga

1.3.1. Curva de Wöhler

1.3.2. Esfuerzos Cíclicos

1.4. Tratamientos Superficiales y Recubrimientos

1.4.1. Deposición Física en Estado de Vapor (PVD)

1.4.2. Bombardeo Iónico o “Sputtering”

1.4.3. Bombardeo Iónico por Magnetron

1.5. Influencia de la Superficie en el Comportamiento a la Fatiga

1.5.1. Efecto de la Rugosidad Superficial

1.5.2. Efecto de los Esfuerzos Residuales

1.6. Influencia de los Recubrimientos PVD de ZrN en el Comportamiento a la Fatiga de Aleaciones Metálicas

II. Desarrollo Experimental

2.1. Esquema del Proceso

2.2. Elaboración de Probetas Para Ensayos De Tracción, Ensayos De Fatiga Y Corrosión-Fatiga

2.2.1. Adquisición Del Material Base

2.2.2. Dimensiones De Las Probetas

2.2.3. Fabricación de las Probetas

2.2.4. Preparación Superficial de Probetas para Ensayos Fatiga y Corrosión-Fatiga

2.3. Deposición del Recubrimiento

2.4. Estimación de Dureza Absoluta del Recubrimiento

2.5. Ensayos de Tracción

2.6. Ensayos de Fatiga y Corrosión-Fatiga

2.7. Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)

2.7.1. Estudio Fractográfico

III. Resultados Y Discusión

3.1. Dureza Absoluta y Rugosidad del Recubrimiento

3.2. Ensayos de Tracción (Curvas σ - ϵ)

3.3. Ensayos de Fatiga y Corrosión-Fatiga

3.4. Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)

3.4.1. Estudio Fractográfico

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Designación de aleaciones de aluminio según “*Aluminum Association*”.

Tabla 1.2 Composición química de la aleación de aluminio 7075.

Tabla 1.3 Propiedades mecánicas promedio de la aleación 7075-T6.

Tabla 2.1 Propiedades mecánicas de la aleación de aluminio 7075-T6.

Tabla 3.1 Propiedades de tracción obtenidas para el sustrato (7075-T6).

Tabla 3.2 Propiedades de tracción obtenidas para el material recubierto (7075-T6 + ZrN).

Tabla 3.3 Resultados de los ensayos de fatiga del sustrato (7075-T6).

Tabla 3.4 Resultados de los ensayos de fatiga del material recubierto (7075-T6 + ZrN) ensayado al aire.

Tabla 3.5 Resultados de los ensayos de corrosión-fatiga del sustrato (7075-T6).

Tabla 3.6 Resultados de los ensayos de corrosión-fatiga del material recubierto.

Tabla 3.7 Parámetros y ecuaciones de BASQUIN correspondientes a los ensayos de fatiga y corrosión-fatiga del sustrato y del material recubierto.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Avión patrullero Lockheed P2V “Neptune” (el XP2V-7)

Figura 1.2 Representación esquemática del tratamiento térmico T6

Figura 1.3 Avión Convair. El fuselaje así como su estructura interna son principalmente de 7075-T6

Figura 1.4 Miembros estructurales fabricados de 7075-T6 para un avión Lockheed

Figura 1.5 Cohete espacial Saturno V, en numerosas partes de su construcción se empleó 7075-T6

Figura 1.6 Helicóptero MD900 Explorer. Su tren de aterrizaje es fabricado de 7075-T6

Figura 1.7 Coronas y Rotor fabricados en AA 7075-T6

Figura 1.8 Cuadro de Bicicleta y Culata de M.C.I de AA 7075-T6

Figura 1.9 Partes de suspensión (Brazos “A”) de AA 7075-T6

Figura 1.10 Curva de Wöhler o Curva de S-N

Figura 1.11 *Curva S-N doble logarítmica*

Figura 1.12 *Ciclo de Inversión Completa*

Figura 1.13 *Ciclo de Tensión Repetida*

Figura 1.14 *Ciclo de Tensión Irregular o Aleatoria*

Figura 1.15 Herramientas y componentes recubiertos con ZrN

Figura 1.16 Esquema básico de un Magnetron Plano

Figura 1.17 Plasma confinado al campo magnético

Figura 1.18 Comportamiento a la fatiga de un acero AISI 316L sin y con recubrimiento de ZrN_y . (a, \circ) Substrato 316L. (b, \square) Substrato + $ZrN_{0,50}$. (c, \diamond) Substrato + $ZrN_{0,60}$. (d, Δ) Substrato + $ZrN_{0,70}$

Figura 2.1 Flujograma del Desarrollo Experimental

Figura 2.2 Barras de aleación de Aluminio

Figura 2.3 Dimensiones de las probetas cilíndricas para ensayos de tracción

Figura 2.4 Dimensiones de probetas cilíndricas para ensayos de fatiga y corrosión-fatiga

Figura 2.5 Probeta fabricada para ensayos de tracción

Figura 2.6 Probeta fabricada para Ensayos de Fatiga y Corrosión-Fatiga

Figura 2.7 Torno Myford ML7-R

Figura 2.8 Perfilómetro Zygo

Figura 2.9 Reactor de bombardeo iónico por magnetrón desbalanceado de campo cerrado

Figura 2.10 Probeta para evaluación de dureza del recubrimiento de ZrN

Figura 2.11 Identador Vickers y huella dejada por el mismo

Figura 2.12 Equipo para medición de microdureza LECO 862-100-100

Figura 2.13 Sistema analizador de imágenes LECO IA-3001

Figura 2.14 Máquina de Ensayo Universal Instron 8502

Figura 2.15 Máquina de fatiga por flexión rotativa Fatigue Dynamics RBF-200

Figura 2.16 Montaje de probeta para ensayo de fatiga en la máquina Fatigue

Dynamics RBF-200

Figura 2.17 Cámara salina para ensayos de corrosión-fatiga en la máquina Fatigue

Dynamics RBF-200

Figura 2.18 Cortadora de precisión con disco de diamante LECO VC-50

Figura 2.19 Equipo de limpieza por ultrasonido BUEHLER ULTRAMET II

Figura 2.20 Secador de probetas BUEHLER TORRAMET

Figura 2.21 Equipo para embutido de probetas BUEHLER SIMPLIMET 3.

Figura 2.22 Pulidora para preparación metalográfica BUEHLER ECOMET 5

Figura 2.23 Equipo de desbaste fino por vibración BUEHLER VIBROMET 2

Figura 2.24 Muestras preparadas para la evaluación fractográfica mediante MEB

Figura 2.25 Microscopio Electrónico de Barrido Philips XL 30

Figura 3.1 Gráfica de estimación de dureza del conjunto sustrato recubrimiento.

Figura 3.2 Resultados del perfilómetro Zygo

Figura 3.3 Curvas de esfuerzo real (σ) vs. deformación real (ε) de la aleación de aluminio 7075-T6 (sustrato). [Irausquín, 2003]

Figura 3.4 Curvas de esfuerzo real (σ) vs. deformación real (ε) de la aleación de aluminio 7075-T6 recubierta con ZrN

Figura 3.5 Comparación de las curvas σ - ε del sustrato y del material recubierto

Figura 3.6 Curva $\log S$ - $\log N_f$ de resistencia a la fatiga del sustrato (7075-T6) ensayado al aire

Figura 3.7 Curva $\log S$ - $\log N_f$ de resistencia a la fatiga del material recubierto (7075-

T6 + ZrN) ensayado al aire

Figura 3.8 Curva $\log S$ - $\log N_f$ de resistencia a la fatiga del sustrato (7075-T6) ensayado en una solución de cloruro de sodio (NaCl) al 3%

Figura 3.9 Curva $\log S$ - $\log N_f$ de resistencia a la fatiga del material recubierto (7075-T6 + ZrN) ensayado en una solución de cloruro de sodio (NaCl) al 3%

Figura 3.10 Comparación de las curvas $\log S$ - $\log N_f$ de resistencia a la fatiga y a la corrosión-fatiga obtenidas para el sustrato y el material recubierto

Figura 3.11 Reducción de vida a la fatiga al aire y en un medio corrosivo del material recubierto con respecto al sustrato

Figura 3.12 Probeta 1: Fatiga al Aire, $S=377$ MPa

Figura 3.13 Probeta 2: Fatiga al Aire, $S=169$ MPa

Figura 3.14 Probeta 3: Fatiga Corrosión, $S=323$ MPa

Figura 3.15 Probeta 4: Fatiga Corrosión, $S=169$ MPa

INTRODUCCIÓN

En la actualidad el concepto de recubrimiento ha pasado a ser de vital importancia para mejorar el rendimiento y la durabilidad de elementos de máquinas y otras aplicaciones; a partir de aquí un sin número de tecnologías capaces de alterar substancialmente las propiedades superficiales de los materiales a través de técnicas de modificación de superficie han sido desarrolladas. En tal sentido, todos estos desarrollos implican el aumento en la resistencia al desgaste, estabilidad química superficial lo cual se traduce en un incremento en la resistencia a la corrosión y aumento de la dureza, por solo mencionar algunas de las propiedades de carácter superficial que se ven incrementadas significativamente. 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. El propósito fundamental que se persigue con la realización de este proyecto es investigar el comportamiento a la fatiga al aire y bajo ambiente corrosivo de la Aleación comercial de aluminio AA 7075-T6 recubierta con una Película de ZrN Depositada el Método PVD (Deposición Física en Fase de Vapor).

En este trabajo se estudiará el comportamiento a la fatiga del conjunto recubrimiento-substrato con la finalidad de determinar la vida en servicio de los

elementos o componentes de máquinas variando tanto las condiciones de amplitud de esfuerzo alternante, como del medio donde se realiza el ensayo. Así mismo, se investigará más detalladamente el mecanismo de fractura del conjunto substrato-recubrimiento.

Como objetivos de esta investigación se ha propuesto lo siguiente:

Objetivo General

Determinar el comportamiento a la fatiga al aire y bajo ambiente corrosivo de la aleación de aluminio 7075 – T6 recubierta con una Película de ZrN Aplicada por el Método PVD.

Objetivos Específicos

- Evaluar las propiedades mecánicas estáticas de la aleación en condición T6, con la finalidad de diseñar los ensayos de fatiga posteriores, así como también determinar la dureza compuesta del conjunto substrato-recubrimiento.
- Evaluar el comportamiento a fatiga en flexión rotativa de las probetas recubiertas.
- Construir de las curvas de Wöhler y obtener los parámetros de la ecuación de Basquín.

- Llevar a cabo un análisis fractográfico de las muestras ensayadas en fatiga, a fin de establecer los mecanismos de propagación de la grieta en el conjunto substrato-recubrimiento.

Alcance

Evaluar el comportamiento a la fatiga tanto al aire como en una solución de cloruro de sodio de una aleación de aluminio 7075 T6 recubierta con una película de Nitruro de Zirconio obtenida por deposición física en fase vapor (PVD) empleando un sistema de bombardeo iónico mediante un magnetrón desbalanceado de campo cerrado y comparar su comportamiento con el de una aleación sin recubrimiento alguno.

I. FUNDAMENTO TEÓRICO

1.1. Aleación Comercial de Aluminio 7075-T6

1.1.1. Propiedades

La Asociación del Aluminio estadounidense (*Aluminum Association*), emplea un sistema de nomenclaturas para aleaciones fundidas y forjadas, este sistema agrupa las aleaciones en familias para mayor simplicidad. Para aleaciones forjadas se emplea un sistema de numeración de cuatro dígitos como se aprecia en la tabla 1.1.

Sistema de Aleación (principales aleantes)	Serie
Aluminio 99.0% (min.)	1xxx
Aluminio-Cobre	2xxx
Aluminio-Manganeso	3xxx
Aluminio-Silicio	4xxx
Aluminio-Magnesio	5xxx
Aluminio-Magnesio-Silicio	6xxx
Aluminio-Zinc	7xxx
Aluminio-Otros Elementos	8xxx
Inutilizada	9xxx

Tabla 1.1 Designación de aleaciones de aluminio según “*Aluminum Association*”.

El primer valor indica el tipo de aleación, ésta dependerá del elemento principal aleante de la serie, mientras que el segundo indica cualquier variación de la aleación original o límites de impureza; el cero se utiliza para la aleación original y los enteros del 1 al 9 indican las modificaciones de la misma.

Las principales características que aportan los elementos aleantes son las siguientes:

- **Zinc.** Bajo la condición de forja presenta un leve aumento en las cualidades mecánicas del aluminio y en combinación con otros elementos se consigue la más alta combinación de propiedades tensiles en las aleaciones de forja.
- **Magnesio.** El magnesio incrementa en gran medida la resistencia del aluminio y genera un aumento notable en los valores de ductilidad. Las aleaciones aluminio-magnesio poseen en general buena resistencia y alta soldabilidad.
- **Zinc–Magnesio.** La adición de magnesio a las aleaciones Al-Zn produce un aumento en la resistencia, especialmente cuando el contenido de Zn se encuentra entre 3 y 7,5%. El magnesio y el zinc forman la fase $MgZn_2$, la cual produce un pequeño aumento en la respuesta al tratamiento térmico en comparación con el presentado en las aleaciones Al-Zn. El incremento en la concentración de la fase $MgZn_2$ aumenta la resistencia a la fluencia y la resistencia tensil.

- **Cobre.** Tanto en condición de colada como de forja responde a tratamientos térmicos, generando un incremento en la resistencia y dureza, y a su vez una disminución en la elongación.
- **Zinc–Magnesio–Cobre.** La adición de cobre a los sistemas aluminio-zinc-magnesio, además de pequeñas cantidades de cromo y manganeso (elementos presentes en la 7075), generan la mayor resistencia de las aleaciones comerciales en base aluminio disponibles. En estos sistemas de aleación, el Zn y el Mg controlan el proceso de envejecimiento. El efecto del cobre es incrementar la velocidad de envejecimiento y la sensibilidad al temple en los tratamientos térmicos. En general, el cobre reduce la resistencia a la corrosión de las aleaciones aluminio-zinc-magnesio, pero incrementa la resistencia a la corrosión bajo tensión.
- **Hierro.** El hierro es la impureza más común encontrada en el aluminio. Éste presenta una alta solubilidad en el aluminio fundido y es, por lo tanto fácilmente disuelto en todas las etapas de producción. El hierro reduce el tamaño de grano en los productos de forja.
- **Silicio.** En las aleaciones de forja, el silicio es utilizado a niveles superiores al 1,5%, para producir la fase Mg_2Si en las aleaciones de la serie 6xxx.

- **Manganeso.** El manganeso incrementa la resistencia tanto en solución sólida, como en la forma de una fina fase intermetálica precipitada. Este elemento no genera efectos adversos en la resistencia a la corrosión. Como elemento de adición, es utilizado para incrementar la resistencia y el control de la estructura del grano. Los precipitados de manganeso incrementan la sensibilidad al temple de las aleaciones tratables térmicamente.
- **Cromo.** El cromo es utilizado para controlar la estructura del grano, prevenir el crecimiento de grano en las aleaciones Al-Mg, y para prevenir la recristalización en las aleaciones Al-Mg-Si y Al-Mg-Zn durante el trabajo en caliente o tratamiento térmico. La estructura fibrosa que éste genera, reduce la susceptibilidad a la corrosión bajo tensión y/o incrementa la tenacidad.
- **Titanio.** El titanio es utilizado principalmente como un refinador de grano en las aleaciones de aluminio de colada. Su efecto en la reducción del tamaño de grano es mejorado si el boro está presente en el producto fundido.

Un número o letra adicional agregado a la serie anterior indica el tipo de tratamiento térmico al que está sometida la aleación.

F: Condición de fabricado

O: Recocido

W: Tratamiento térmico de solución aplicado a aleaciones para envejecimiento natural

T: Tratado térmicamente para producir una condición estable.

La aleación 7075-T6 ha sido ampliamente utilizada desde su introducción en 1943, esto debido a su considerable resistencia a la tracción y su reducido peso, dicha aleación es de gran utilidad en la industria aeronáutica y aeroespacial, específicamente en componentes estructurales como barras, láminas, tubos, etc. Su aplicación y su extensión a otras áreas de la industria suele estar limitada por la baja resistencia a la fatiga y por la susceptibilidad que tiene a la corrosión, características típicas de la serie 7xxx.

La Armada Estadounidense construyó el patrullero Lockheed P2V “Neptune” en 1943, la primera aeronave diseñada con la aleación 7075-T6 (ver figura 1.1). A partir de entonces, una gran cantidad de aplicaciones han sido desarrolladas en cada segmento de las industrias aérea, misilística y espacial.



Figura 1.1 Avión patrullero Lockheed P2V “Neptune” (el XP2V-7).

La aleación de aluminio 7075-T6 posee como principales elementos de aleación al Zn, Mg y Cu. La composición química de la aleación de aluminio 7075, se presenta en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2 Composición química de la aleación de aluminio 7075.

Elemento	Zn	Mg	Cu	Cr	Si	Fe	Mn	Ti	Otros Total	Al
% en Peso Mínimo	5,10	2,10	1,20	0,18	.....	.....	.....	.....	.....	Remanente
% en Peso Máximo	6,10	2,90	2,00	0,28	0,40	0,50	0,30	0,20	0,15	Remanente

Como las siglas lo indican, la aleación en cuestión pertenece a la serie 7xxx la cual se encuentra en el grupo de las tratables térmicamente. El tratamiento térmico T6, consiste, primero en realizar la solubilización del material y luego envejecerla artificialmente. Este procedimiento es aplicado a aquellos productos que no se trabajarán en frío o en los cuales el aplanado o enderezado no se aplica a ciertas especificaciones. El material es calentado a 460°C aproximadamente durante una hora, para luego ser templado en agua y envejecido.

La temperatura de envejecimiento está entre 118° y 124 °C, en un tiempo que puede variar desde 24 hasta 28 horas. [ASM, Vol. 2, 1996]

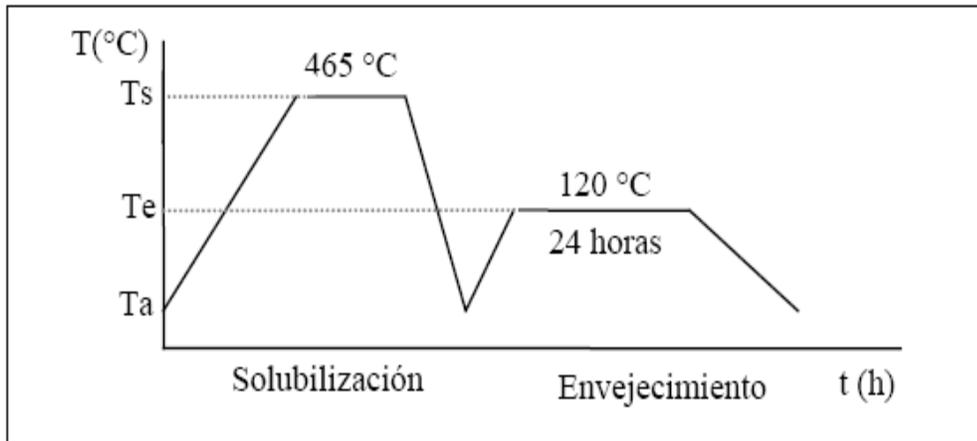


Figura 1.2 Representación esquemática del tratamiento térmico T6.

En la Tabla 1.3 se pueden apreciar las propiedades mecánicas de la aleación 7075-T6, tomando en cuenta que los valores reportados son promedios de distintas formas, tamaños y métodos de manufactura.

Tabla 1.3 Propiedades mecánicas promedio de la aleación 7075-T6.

Límite de Fluencia (MPa)	Resistencia a la Tracción (MPa)	% Reducción de Área
547	648	32

La solubilidad sólida del aluminio varía dependiendo del elemento aleante y de la temperatura. Si la temperatura decrece, el límite de solubilidad también decrece, comportamiento que provee un incremento sustancial en la dureza y resistencia de las aleaciones de aluminio por tratamiento térmico de solubilización y posteriores

operaciones de envejecimiento por precipitación. [ASM, Vol. 2, 1996]

1.1.2. Fatiga en Aleaciones de Aluminio

La fatiga es la responsable de aproximadamente el 90% de las fallas que se producen en los componentes y elementos de máquina [DIETER, 1986]. Muchos de los componentes y estructuras, durante el servicio, están sometidos a cargas y deformaciones variables, las cuales generan el deterioro progresivo del material hasta producirse su falla o fractura repentina. Las fallas por fatiga se generan a niveles de esfuerzo menores a los requeridos para producir la falla del componente en condiciones estáticas, y sin cambios ni indicios visibles de flujo plástico que permitan detectar el estado de deterioro (agrietamiento) del metal. Es común encontrar grietas de fatiga que nuclean a partir de discontinuidades superficiales. Esto es debido a que cualquier cambio en la sección del material, tales como, entallas, hendiduras, chaveteros o bien cambios en el diámetro de la pieza pueden actuar como acumuladores de tensiones y propiciar así la nucleación de las grietas por fatiga. [FORREST, 1972]

1.1.3. Corrosión Fatiga en Aleaciones de Aluminio

Las aleaciones de aluminio así como muchos aceros, presentan una resistencia a la corrosión fatiga relativamente baja, la cual está cerca de la mitad de la resistencia a la fatiga al aire. La corrosión localizada de la superficie de aluminio origina discontinuidades tales como picaduras o corrosión intergranular que actúan como

concentradores de esfuerzo, los cuales disminuyen en gran magnitud la vida a fatiga. No es posible asumir que aquellas aleaciones o tratamientos térmicos que ofrezcan una buena resistencia a la corrosión bajo tensión, muestren una buena resistencia a la corrosión fatiga. Sin embargo, se conoce el efecto benéfico del cobre frente a la corrosión bajo tensión en las aleaciones de la serie 7xxx. Incrementos en el contenido de cobre en estas aleaciones, aumentan la resistencia a la corrosión fatiga. [HATCH, 1993]

1.1.4. Aplicaciones

La aleación de aluminio 7075-T6 tiene múltiples aplicaciones, su principal uso es en piezas sometidas a altos niveles de esfuerzos de corte, tal es el caso de piezas estructurales y láminas en estructuras aeronáuticas como las utilizadas para recubrir la parte superior de las alas (ver figura 1.3).



Figura 1.3 Avión Convair. El fuselaje así como su estructura interna son principalmente de 7075-T6.

Las vigas que sujetan las alas al resto del fuselaje o cuerpo de un avión, así como miembros estructurales que dan forma y rigidez, tales como largueros, larguerillos, mamparos de presión y costillas entre otros (figura 1.4), son usualmente construidas con 7075-T6.



Figura 1.4 Miembros estructurales fabricados de 7075-T6 para un avión Lockheed.

Partes no presurizadas de muchos misiles balísticos y de cohetes espaciales impulsados por combustibles líquidos y oxidantes emplean grandes cantidades de 7075-T6. Como ejemplo, en la figura 1.5 se puede apreciar el cohete espacial *Saturno V*, empleado para el transporte de las naves Apolo (primeras en llegar a la Luna).



Figura 1.5 Cohete espacial Saturno V, en numerosas partes de su construcción se empleó 7075-T6.

Las hélices de gran tamaño para motores de aeronaves así como los esquís de los trenes de aterrizaje de algunos helicópteros son construidos con la aleación 7075-T6. Un ejemplo de esta aplicación se puede apreciar en el Helicóptero **MD900** “**Explorer**” que aparece en la figura 1.6.



Figura 1.6 Helicóptero MD900 Explorer. Su tren de aterrizaje es fabricado de 7075-T6.

En años recientes dada la buena relación peso-resistencia del 7075-T6 y dada la tendencia de integración de materiales aeronáuticos a aplicaciones civiles son muy numerosas las partes mecánicas donde se puede encontrar este material (figuras 1.7, 1.8, 1.9).



Figura 1.7 Coronas y Rotor fabricados en AA 7075-T6.

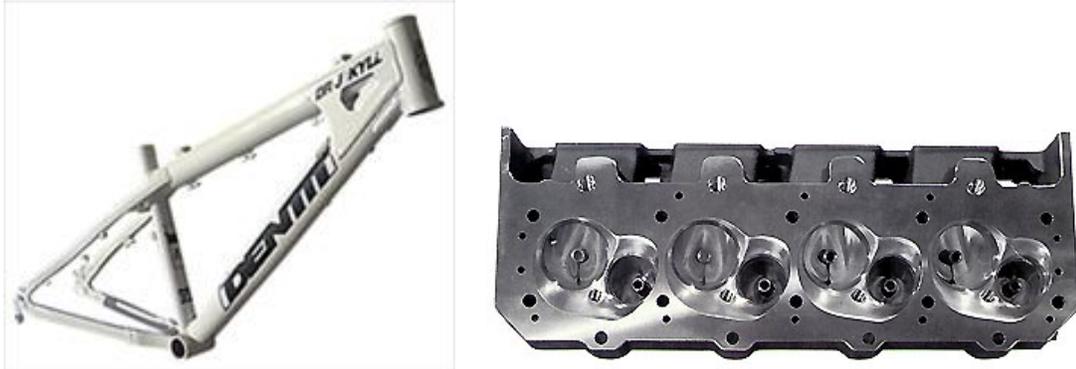


Figura 1.8 Cuadro de Bicicleta y Culata de M.C.I de AA 7075-T6.



Figura 1.9 Partes de suspensión (Brazos “A”) de AA 7075-T6.

1.2. Fatiga de Metales

La falla de los materiales metálicos debido a la fatiga tiene lugar por las cargas aplicadas en forma variable y repetida, que producen esfuerzos de igual forma llamados esfuerzos cíclicos. Sin embargo, se ha descubierto que en muchos de estos casos los esfuerzos máximos reales son inferiores a la resistencia última del material y muchas veces aún menores que la resistencia de fluencia. Dichos esfuerzos cíclicos

pueden ocurrir como resultado de rotación, flexión o vibraciones.

Para que exista o se produzca una falla por fatiga deben estar presentes tres condiciones:

- Una tensión de valor elevado.
- Una variación o fluctuación suficientemente intensa de la tensión aplicada.
- Un número suficiente de ciclos.

Existen otro tipo de variables que afectan la vida a la fatiga como los concentradores de esfuerzo, temperatura, corrosión, microestructura, tensiones residuales y tensiones combinadas.

En el caso de una región libre de defectos o de buen acabado superficial las grietas se inician debido a diminutos concentradores de esfuerzos ocasionados por deformación plástica localizada en bandas específicas de deslizamiento. Después de varios ciclos repetidos, se desarrolla una pequeña grieta en las intersecciones de estas bandas de deformación localizada con la superficie de la muestra.

La presencia de defectos internos también acorta el tiempo necesario para la iniciación de las grietas. Algunos de estos defectos pueden ser inclusiones no metálicas y en algunos casos poros de gases atrapados en la aleación.

1.2.1. Fallas producidas por fatiga

Las fallas por fatiga usualmente ocurren en tres etapas:

Primero se inicia una grieta minúscula, en la mayoría de los casos a partir de la superficie o en alguna zona de tensión elevada. Alrededor de la región donde se origina la grieta, la superficie comúnmente, muestra un aspecto liso y aterciopelado, esta zona es la que refleja el crecimiento de la grieta con relativa lentitud, la superficie en esta área presenta marcas usualmente llamadas marcas de playa

A continuación la grieta se propaga gradualmente a medida que la carga sigue variando alternadamente. A veces puede distinguirse una segunda zona menos lisa en la cual la propagación de la grieta se ha efectuado con mayor velocidad, quizás en varios lugares a la vez, de modo que la superficie de fractura es irregular.

Finalmente, cuando la sección transversal restante del material resulta demasiado pequeña para soportar la carga aplicada, ésta falla súbitamente por fractura. Esto ocurre en una tercera zona en donde se produce la fractura final cuando se reduce la sección y el metal no puede soportar la aplicación última de la carga. Esta zona puede tener un aspecto cristalino indicando que la fractura final fue frágil o un aspecto fibroso indicando una fractura final dúctil.

1.3. 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. [FORREST, 1962]

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 es el número de ciclos de esfuerzo o deformación requeridos para causar su falla [FORREST, 1962]. 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 a la fatiga, haciendo más difícil el análisis de éste.

1.3.1. Curva de Wöhler

La forma más recomendada para representar ordenadamente todos los datos obtenidos en los ensayos de fatiga, obteniendo una rápida visualización de los resultados y principales propiedades del material, es mediante las curvas de Wöhler o curvas S-N (Figura 1.10). Esta representa la duración de la probeta, expresada en número de ciclos hasta la ruptura (N), para la máxima tensión aplicada.

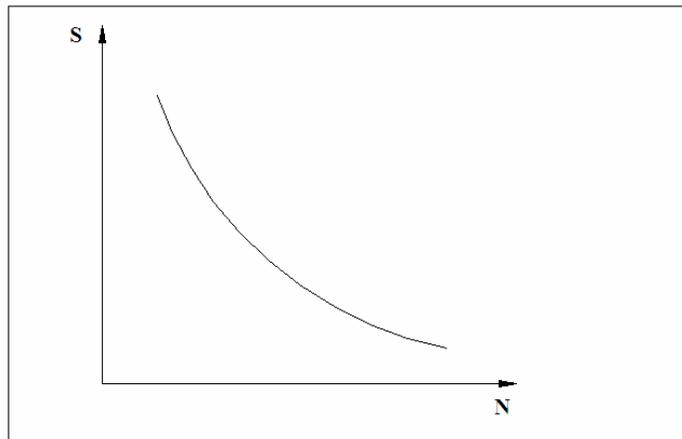


Figura 1.10 Curva de Wöhler o Curva de S-N.

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 1.11), la cual es expresada mediante la ecuación sugerida por Basquin. [SHIGLEY, 2001]

Ecuación de Basquin:

$$S_a = S'_f(2N)^b \quad (1)$$

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:

$$S_a = S_f(N)^b \quad (2)$$

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.

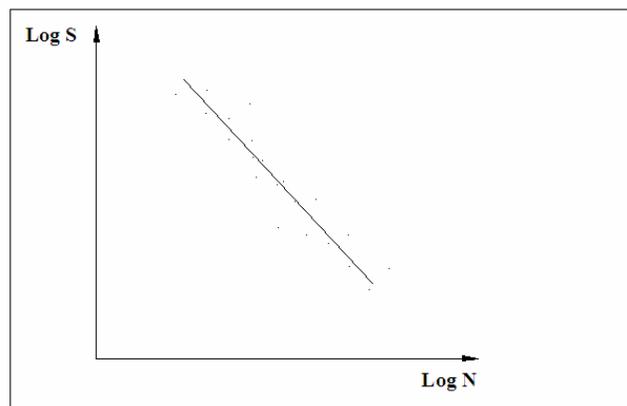


Figura 1.11 Curva S-N doble logarítmica.

1.3.2. Esfuerzos Cíclicos

Existen tres tipos principales de esfuerzos fluctuantes de tensión capaces de producir fallas por fatiga. [SHIGLEY, 2001], 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, la magnitud del esfuerzo máximo ($S_{\max} = S_a$), es igual a la del esfuerzo mínimo ($S_{\min} = S_a$).

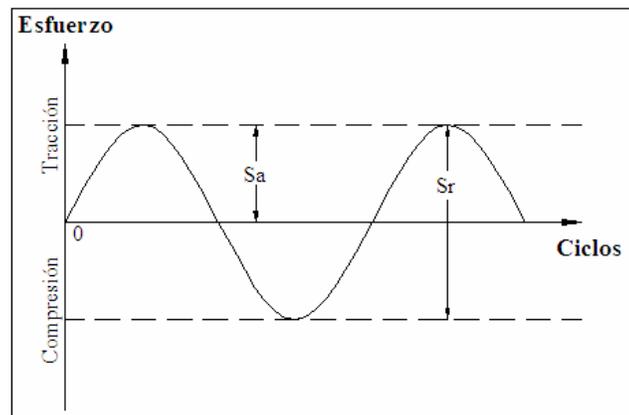


Figura 1.12 Ciclo de Inversión Completa.

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

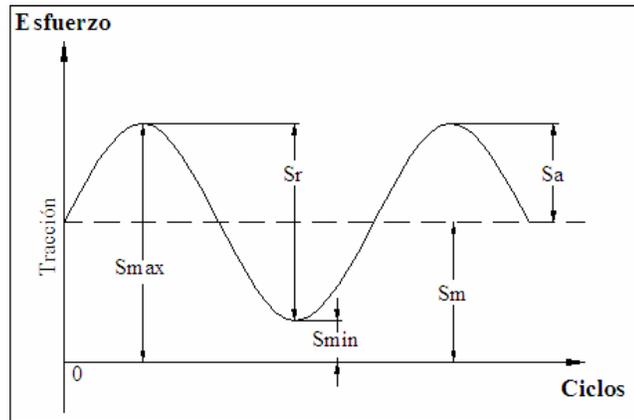


Figura 1.13 Ciclo de Tensión Repetida.

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.

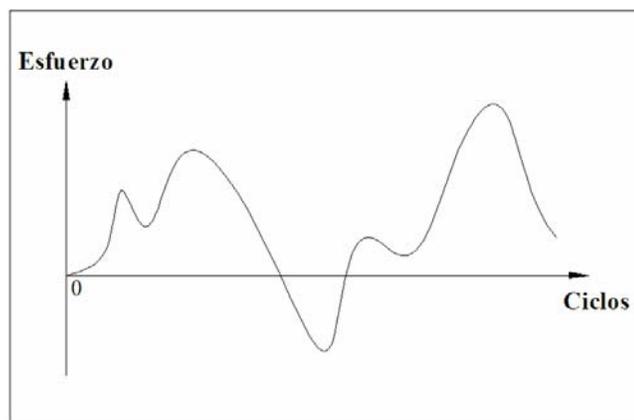


Figura 1.14 Ciclo de Tensión Irregular o Aleatoria.

Estos ciclos de esfuerzos están constituidos por dos componentes: un esfuerzo

medio o estacionario (S_m), y otro alterno o variable (S_a).

1.4. Tratamientos Superficiales y Recubrimientos

Los tratamientos superficiales consisten en la aplicación de recursos técnicos, para obtener materiales compuestos con propiedades que sus constituyentes de manera independiente no podrían alcanzar. Los recursos utilizados consisten fundamentalmente en la aplicación de recubrimientos sobre diversos materiales con la finalidad de producir cambios sobre su superficie.

La deposición es una de las técnicas de recubrimiento más empleadas, esto se debe a su capacidad de colocar espesores muy finos y controlados, así como la posibilidad de optimizar propiedades como la adherencia. Las técnicas de deposición se clasifican principalmente en dos grandes grupos:

- Deposición Química en Estado de Vapor (CVD: *Chemical Vapour Deposition*)
- Deposición Física en Estado de Vapor (PVD: *Physical Vapour Deposition*)

En la deposición por CVD la superficie del sustrato interactúa con una mezcla de gases a una alta temperatura, mientras que los procesos por PVD consisten en la evaporación o ionización, dentro de una cámara de vacío, del recubrimiento desde su estado sólido.

1.4.1. Deposición Física en Estado de Vapor (PVD)

Esta técnica se basa en el empleo de medios físicos en cámaras de alto vacío (10^{-6} mbar) utilizadas para evaporar el material usado como recubrimiento.

Los beneficios principales que aporta esta técnica son: el rango de temperaturas de aplicación relativamente bajas (en casos específicos inferiores a 100 °C) y la capacidad de obtener capas de hasta 1 μm de espesor.

El Nitruro de Titanio (TiN), el TiC y el TiCN son los recubrimientos por PVD más extendidos a nivel mundial. Hay sin embargo muchos otros recubrimientos duros comerciales, como el Nitruro de Cromo (CrN), utilizado en aplicaciones bajo desgaste-corrosión, el Carburo de Tungsteno (WC), la Alúmina (Al_2O_3) y el Nitruro de Zirconio (ZrN) (figura 1.15) entre otros.



Figura 1.15 Herramientas y componentes recubiertos con ZrN.

1.4.2. Bombardeo Iónico o “Sputtering”

La necesidad de encontrar materiales capaces de trabajar en condiciones cada vez más extremas y agresivas (desgaste, corrosión, fatiga) ha hecho que desde comienzos de la década de los 80 se hayan desarrollado toda una serie de técnicas de modificación superficial encaminadas a mejorar las propiedades superficiales con materiales cuyas propiedades son diferentes a las del material base o imposibles de obtener por métodos tradicionales. Entre estas técnicas se destaca el bombardeo iónico, el cual consiste en la aceleración y proyección de iones contra una superficie, gracias a la energía cinética del ión, éste penetra en la red cristalina produciendo una alteración superficial en el comportamiento mecánico y químico, así como también en las propiedades eléctricas, ópticas e incluso magnéticas.

Desde el punto de vista químico, las superficies modificadas pueden desarrollar una serie de mecanismos protectores por modificación en las propiedades de adherencia de los óxidos formados o por formación de capas pasivas que prolongan la vida en servicio de los materiales metálicos tanto frente a la corrosión electroquímica como a la originada por altas temperaturas.

Un creciente número de tratamientos avanzados están basados en el bombardeo iónico. Los iones no son otra cosa que átomos cargados eléctricamente, normalmente mediante la carencia de uno de sus electrones. Esto es necesario para poder acelerarlos y localizarlos mediante campos eléctricos y magnéticos.

Dependiendo de la energía con la que estos átomos llegan a una superficie se pueden dar tres procesos diferentes: Si la energía es muy baja (Voltaje para la aceleración igual a 10 Voltios) los átomos se depositan en la superficie, creándose un recubrimiento. Si el voltaje para la aceleración es mayor, (500 Voltios) predomina un proceso de pulverización de la superficie conocido como Sputtering, el cual puede ser muy útil para limpieza superficial y/o para evaporar materiales para recubrimientos. Finalmente, a energías mucho mayores (100.000 Voltios), los átomos penetran dentro de la superficie incrustándose, haciendo una implantación iónica. Por ejemplo, los iones de Nitrógeno acelerados con 100.000 Voltios se mueven en el vacío a una velocidad de 1.170 Km/s y al chocar contra una superficie de Acero se incrustan alcanzando profundidades de hasta 0,2 micras. Este es el proceso que conocemos como implantación iónica.

1.4.3. Bombardeo Iónico por Magnetron

El bombardeo iónico por magnetron es una técnica poderosa y flexible que puede ser utilizada para recubrir virtualmente cualquier tipo de pieza con un rango amplio de materiales. Antes de iniciar el procedimiento de bombardeo iónico se requiere crear una presión de vacío (10^{-6} mbar) en este punto se introduce un flujo controlado de gas inerte tal como argón o nitrógeno, esto aumenta la presión de succión al valor necesario para hacer funcionar a los magnetrones.

Esta técnica consiste en la colocación de una placa del material a ser depositado, usualmente llamado “target”, detrás de la cual son colocados imanes con polaridad alterna, aplicándoseles un voltaje negativo de aproximadamente -300 V, esto produce un ataque de los iones del gas inerte sobre la superficie del target desprendiendo moléculas del mismo que serán adheridas a la superficie a recubrir.

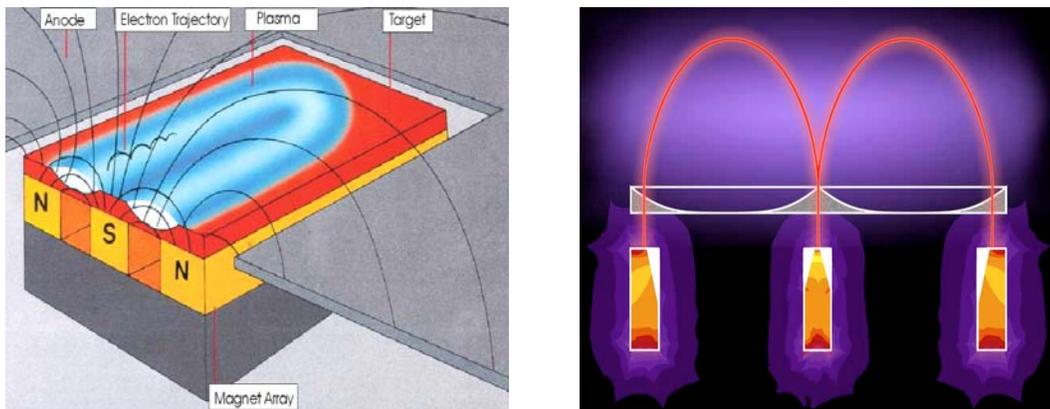


Figura 1.16 Esquema básico de un Magnetron Plano.



Figura 1.17 Plasma confinado al campo magnético.

1.5. Influencia de la Superficie en el Comportamiento a la Fatiga

La resistencia a la fatiga de los materiales se encuentra altamente vinculada con las condiciones superficiales. Esto se debe a que en la superficie se concentran los máximos esfuerzos tensiles aplicados sobre el material. La resistencia a la fatiga de un metal depende principalmente de factores como la rugosidad o irregularidades superficiales y el estado de esfuerzos residuales.

1.5.1. Efecto de la Rugosidad Superficial

La rugosidad superficial influye directamente sobre el comportamiento a la fatiga de un material. La vida a la fatiga suele incrementarse a medida que mejora la calidad de pulido de la superficie. Esto debido a que la reducción de la rugosidad superficial, o pulido, minimiza los concentradores de esfuerzo, que actúan como sitios preferenciales para la nucleación de grietas.

1.5.2. Efecto de los Esfuerzos Residuales

Los esfuerzos o tensiones residuales 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.

El sistema de esfuerzos residuales existentes en un cuerpo debe estar en

equilibrio estático, por lo que la fuerza total que actúa sobre cualquier plano que atraviesa el cuerpo y el momento total de las fuerzas en cualquier plano deben ser nulos.

1.6. Influencia de los Recubrimientos PVD de ZrN en el Comportamiento a la Fatiga de Aleaciones Metálicas

En cuanto al recubrimiento, existen propiedades intrínsecas a él que lo caracterizan. Entre estas propiedades se encuentran la dureza, adherencia y espesor, que en conjunto definen algunos de los aspectos más importantes del comportamiento mecánico del recubrimiento, una vez aplicado en el sustrato. A su vez estas propiedades determinan ciertos factores importantes que guardan relación con el comportamiento mecánico del conjunto sustrato-recubrimiento. Una vez que se ha realizado el recubrimiento del sustrato es común que se torne difícil y a veces imposible, separar el comportamiento de ambos, dificultando también la medición de las propiedades discutidas.

BERRÍOS *et al.* [1998] concluyen que en el estudio del comportamiento a la fatiga en materiales tratados superficialmente, el sitio de nucleación de la grieta por fatiga es el de mayor importancia para deducir el comportamiento del mismo. Por otro lado, PUCHI *et al.* [1996] y BERRÍOS *et al.* [2001] citan que la grieta por fatiga se inicia en la superficie libre de recubrimiento.

BERRÍOS *et al.* [2002], en las jornadas de investigación JIFI, expusieron la influencia de los recubrimientos de $ZrN_{0,50}$, $ZrN_{0,60}$ y $ZrN_{0,70}$ (ZrN_y) depositados en un acero AISI 316L sobre el comportamiento a la fatiga-corrosión, y determinaron el sitio de nucleación de la grieta por fatiga en especímenes preparados longitudinalmente.

La síntesis de estos recubrimientos fue llevada a cabo por deposición física en fase vapor mediante la técnica de bombardeo iónico (“magnetron sputtering”). Previo a la deposición de los recubrimientos, los especímenes utilizados como sustrato fueron limpiados y desengrasados al voltaje de polarización de 1000 V, corriente de 0,5 A y presión parcial de Ar $1,97 \times 10^{-6}$ atm. La deposición de los recubrimientos fue conducida al voltaje de polarización de -50 V y corriente de 10 A. Mediante ensayos abrasivos de calota esférica se determinó que los recubrimientos de ZrN_y tienen espesores de 1.3, 2.1 y 2.6 μm , respectivamente. Utilizando un microdurómetro con indentador Vickers con cargas aplicadas de 5 g durante 15 s, se encontró que la superficie de los recubrimientos de ZrN_y tienen valores de 1110, 1882 y 3041 HVN, respectivamente. A partir de ensayos de tracción se determinó que el sustrato sin y con recubrimientos de ZrN_y tienen esfuerzos de fluencia de 489 ± 4 , 515 ± 9 , 525 ± 3 y 515 ± 6 MPa, respectivamente, lo cual indica que los recubrimientos tienen mayores propiedades mecánicas que el sustrato. Mediante la técnica de difracción de rayos X se determinó que en el recubrimiento de $ZrN_{0,50}$ y $ZrN_{0,70}$ se desarrollan esfuerzos residuales de -2205 ± 946 y -1502 ± 773 MPa,

respectivamente. Los ensayos de fatiga fueron realizados bajo condiciones de flexión rotativa, el medio corrosivo fue una solución acuosa al 3 % en peso de NaCl. Las curvas de resistencia a la fatiga para cada material fueron obtenidas por regresión lineal, a partir de 24 probetas. En la Figura 1.18 se presentan las curvas de comportamiento a la fatiga del sustrato sin y con recubrimientos de ZrN_y , en la cual se presentan incrementos en la vida a la fatiga entre 101 y 473 %. Se concluye, en base a la evidencia fractográfica que las grietas por fatiga-corrosión nuclean en la superficie libre de los recubrimientos, y que el incremento en el comportamiento a la fatiga se atribuye a las propiedades intrínsecas de estos recubrimientos con respecto al sustrato.

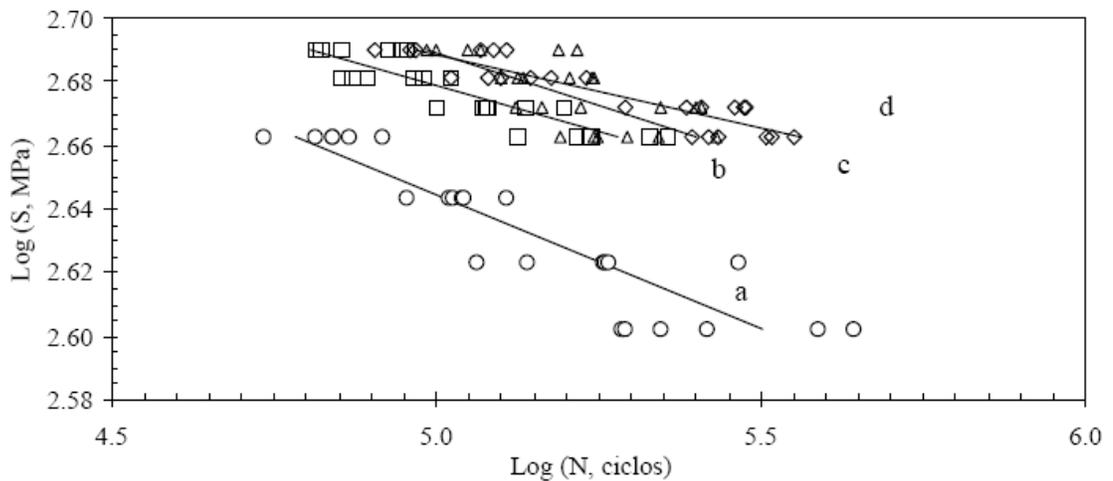


Figura 1.18 Comportamiento a la fatiga de un acero AISI 316L sin y con recubrimiento de ZrN_y . (a, \circ) Sustrato 316L. (b, \square) Sustrato + $ZrN_{0,50}$. (c, \diamond) Sustrato + $ZrN_{0,60}$. (d, Δ) Sustrato + $ZrN_{0,70}$.

En un estudio realizado por BERRÍOS *et al.* [2004]. Se da conocer que las características de fatiga de un acero inoxidable 316L recubierto con tres diversas películas subestequiométricas de ZrN_x , depositadas por PVD; comparadas con las del sustrato sin recubrimiento. Se encontró una excelente adherencia de tales películas al sustrato, junto con unos elevados esfuerzos residuales compresivos, ocasionando una mejora significativa del comportamiento de la fatiga del acero.

Luego de los ensayos de fatiga rotativa realizados se evidenció un aumento en la vida a la fatiga del orden de 406-1192% para cargas entre 435-480 MPa. Por otro lado el análisis fractográfico realizado en las superficies de la fractura indica que el proceso de la fractura a bajo esfuerzo alternante es dominado por la propagación de una sola grieta, mientras que para esfuerzos elevados se puede observar el crecimiento de dos grietas. De los ensayos de fatiga y del análisis fractográfico se puede concluir que el proceso de la fractura de las muestras recubiertas durante el ensayo es dominado por la nucleación de grietas en la superficie del recubrimiento y la propagación de las mismas a través de su espesor, hasta que se alcanza el sustrato.

II. DESARROLLO EXPERIMENTAL

2.1. Esquema del Proceso

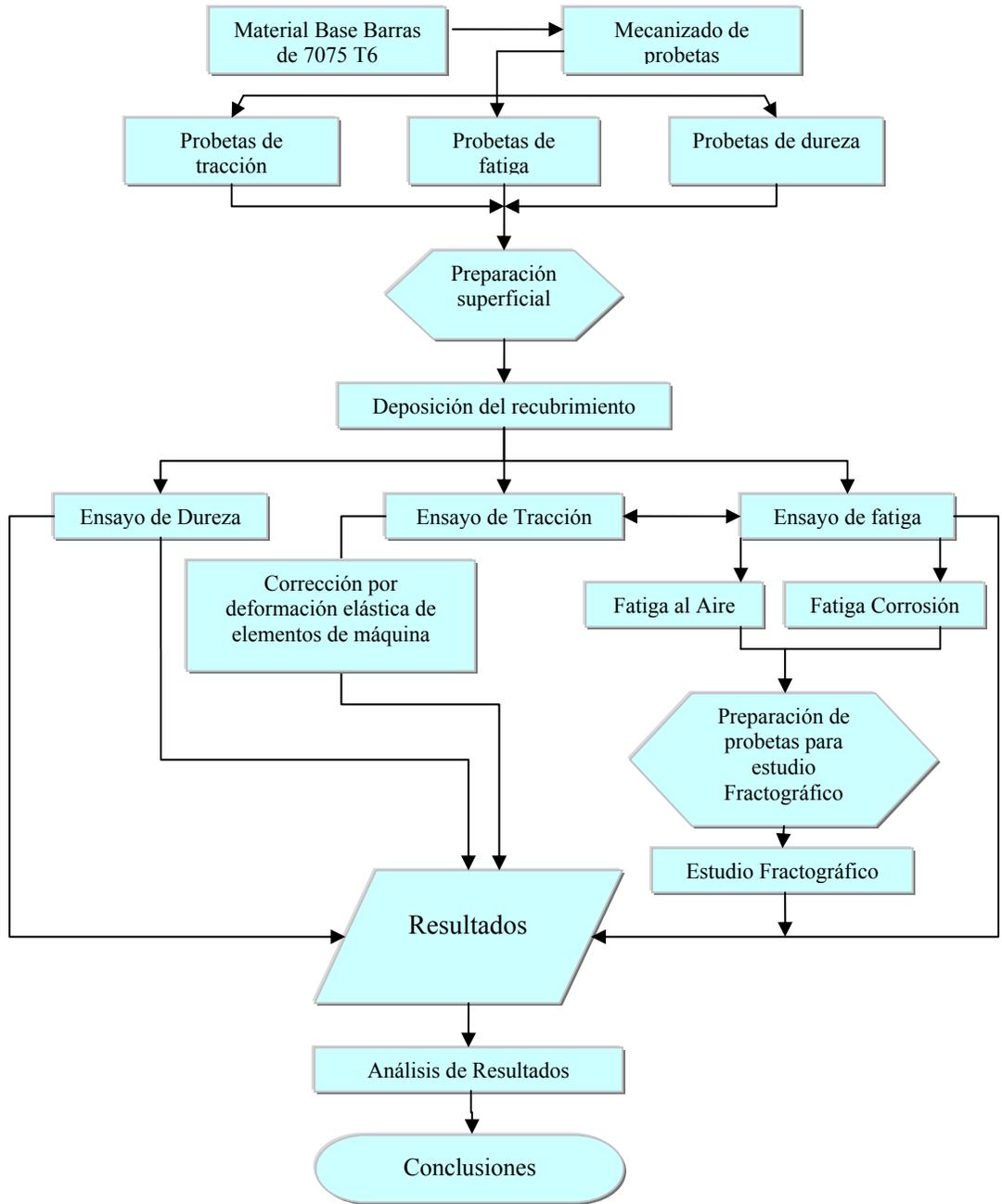


Figura 2.1 Flujograma del Desarrollo Experimental.

2.2. Elaboración de Probetas para Ensayos de Tracción, Ensayos de Fatiga y Corrosión-Fatiga

2.2.1. Adquisición del Material Base

El material base fue provisto por la empresa *Castle Metals Ltd.*, ubicada en los Estados Unidos, en forma de barras de aleación de aluminio 7075-T6 con sección transversal circular de 0.5 pulg. de diámetro y una longitud aproximada de 1.83 m, similares a las mostradas en la figura 2.2.



Figura 2.2 Barras de aleación de Aluminio.

Dicho material presenta la composición química indicada en la tabla 1.2 (Capítulo I) y las propiedades mecánicas indicadas en la tabla 2.1.

Tabla 1.2 Composición química de la aleación de aluminio 7075.

Elemento	Zn	Mg	Cu	Cr	Si	Fe	Mn	Ti	Otros Total	Al
% en Peso Mínimo	5,10	2,10	1,20	0,18	.....	.....	.....	.....	.....	Remanente
% en Peso Máximo	6,10	2,90	2,00	0,28	0,40	0,50	0,30	0,20	0,15	Remanente

Tabla 2.1 Propiedades mecánicas de la aleación de aluminio 7075-T6.

σ_y (MPa)	σ_{uts} (MPa)	Elongación (%)	BHN (500 kg, 10 mm)
503	572	11	150

2.2.2. Dimensiones de las Probetas

Basándose en las normas ASTM E8 y ASTM B557, se elaboraron las probetas cilíndricas para los ensayos de tracción con las dimensiones que se ilustran en la figura 2.3.

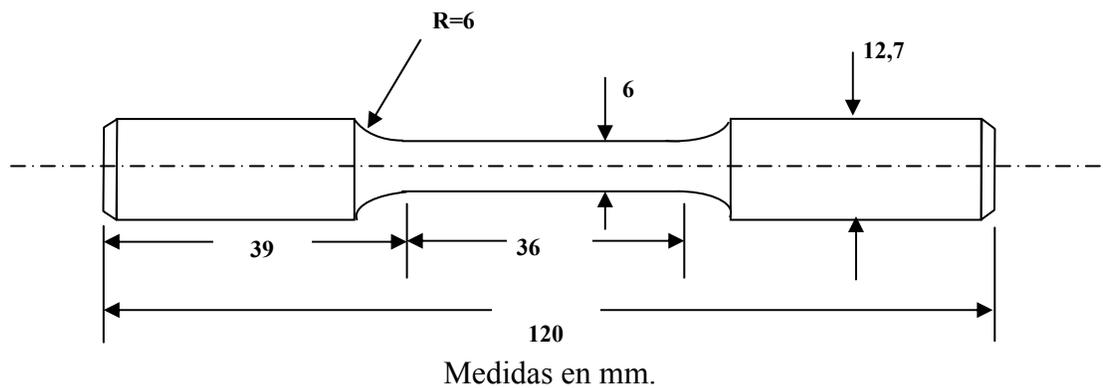


Figura 2.3 Dimensiones de las probetas cilíndricas para ensayos de tracción.

Conforme a lo establecido por la norma ASTM E606, se tomaron las dimensiones mostradas en la figura 2.4 para la elaboración de probetas cilíndricas a ser ensayadas por fatiga y corrosión-fatiga.

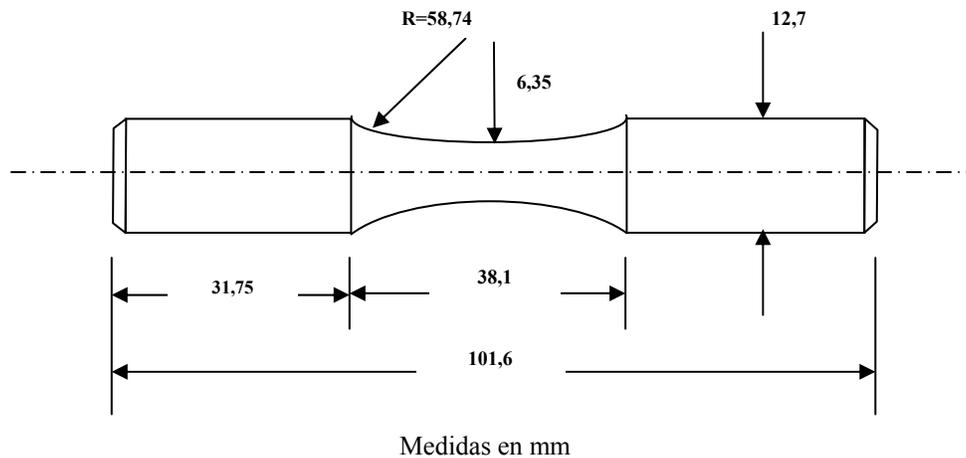


Figura 2.4 Dimensiones de probetas cilíndricas para ensayos de fatiga y corrosión-fatiga.

2.2.3. Fabricación de las Probetas

Las probetas fueron mecanizadas a partir de las barras de 7075-T6 originales en un torno de control numérico en el taller de precisión J.V. C.A. ubicado en la zona industrial de Turumo, Edo. Miranda, según las dimensiones establecidas para cada tipo de muestra.

Con las dimensiones indicadas en la figura 2.3 se elaboraron tres (3) probetas cilíndricas de aleación de aluminio 7075-T6 para los ensayos de tracción, estas sirvieron para ensayar el material recubierto y trazar su curva σ - ϵ , a fin de determinar el cambio en las propiedades mecánicas obtenidas a tracción como consecuencia del

proceso de deposición. En la figura 2.5 se puede apreciar una de las probetas de tracción fabricadas.



Figura 2.5 Probeta fabricada para ensayos de tracción.

Se procedió a la elaboración de cuarenta y ocho (48) probetas para ensayos de fatiga al aire y fatiga en ambiente corrosivo en condición de flexión rotativa, éstas probetas fueron empleadas en partes iguales (24 y 24) esto tomando en cuenta que la norma ASTM E739 establece como recomendable el ensayo de veinticuatro probetas, distribuidas en cuatro niveles de esfuerzo. La figura 2.6 muestra una de las probetas fabricadas para los ensayo de fatiga.



Figura 2.6 Probeta fabricada para Ensayos de Fatiga y Corrosión-Fatiga.

2.2.4. Preparación Superficial de Probetas para Ensayos de Fatiga y Corrosión-Fatiga

Se hizo necesario efectuar un pulido de las probetas de fatiga dado que luego de ser fabricadas estas presentan entallas generadas por el maquinado, las cuales actúan como concentradores de esfuerzo que propician la nucleación de grietas por fatiga. Cada una de las probetas fabricadas fue lijada con papel esmeril de SiC, de granulometrías entre 600 y 2000, en dirección paralela al eje longitudinal de la probeta. Durante este pulido intermedio se empleó un torno marca *Myford*, modelo *ML7-R* (ver figura 2.7). Posteriormente, empleando el mismo torno se efectuó un pulido fino utilizando un paño de fieltro impregnado con una solución de alúmina de $0.3\ \mu\text{m}$ usada como agente abrasivo.

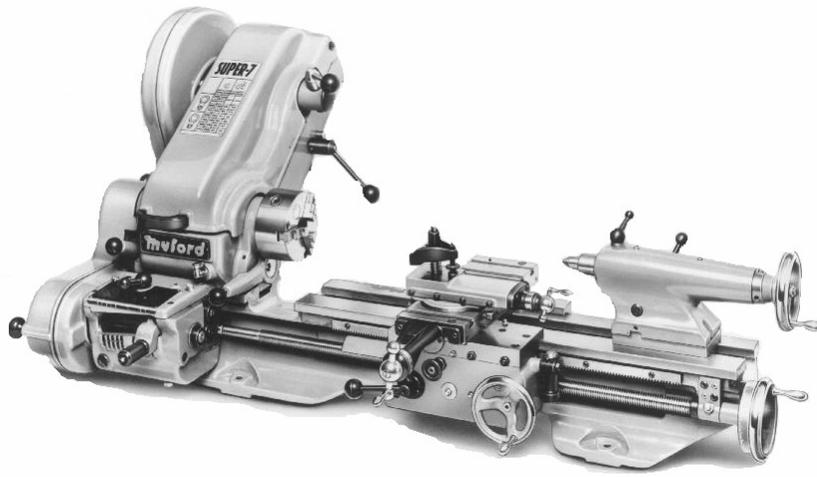


Figura 2.7 Torno Myford ML7-R.

Mediante el pulido de las probetas de fatiga se logró reducir el valor de la rugosidad promedio (Ra) en la superficie de su sección calibrada.

Estos valores de rugosidad fueron medidos con un microscopio de interferometría óptica, o perfilómetro, marca **Zygo** (figura 2.8). La medición se efectuó en tres (3) puntos diferentes sobre la superficie de la sección calibrada de cuatro (4) probetas.



Figura 2.8 Perfilómetro Zygo.

2.3. Deposición del Recubrimiento

La deposición del recubrimiento de ZrN fue efectuada mediante un proceso de bombardeo iónico por magnetrón desbalanceado de campo cerrado (*closed field unbalanced magnetron sputtering*) por la empresa *Teer Coatings Ltd.*, de Hartlebury-Worcestershire, en Inglaterra.

El proceso de deposición se realiza colocando las probetas en el interior de un reactor como el mostrado en la figura 2.9.



Figura 2.9 Reactor de bombardeo iónico por magnetrón desbalanceado de campo cerrado.

El reactor está compuesto por una cámara equipada con las bombas necesarias para producir un vacío de $\sim 10^{-8}$ atm, con un sujetador de muestras de tipo giratorio, con un sistema de magnetrones y sus respectivos blancos (*targets*).

Una vez que las probetas se encuentran dentro del reactor, bombas de vacío se encargan de disminuir la presión en la cámara. Comúnmente toma alrededor de treinta minutos alcanzar el vacío suficiente para iniciar la deposición. A partir de este punto se introduce cuidadosamente un flujo controlado de argón, con las bombas aún funcionando. A medida que el argón ingresa comienza a ionizarse utilizando una baja

energía de los magnetrones, cuando esto ocurre el bombardeo iónico es tan bajo que sólo ocurre una limpieza de las muestras. Luego de esta limpieza iónica se incrementa la energía de los magnetrones para iniciar el bombardeo iónico. El bombardeo es aprovechado para depositar una película de zirconio puro de aproximadamente 0.2 μm de espesor, como capa intermedia para mejorar la adhesión del recubrimiento. Para completar la deposición se introduce nitrógeno en la cámara a fin de que reaccione con el zirconio y se produzca ZrN en la superficie de las probetas.

Con el procedimiento descrito, se llevó a cabo la deposición del recubrimiento de ZrN sobre probetas de tracción, de fatiga y corrosión-fatiga, como las mostradas en las figuras 2.5 y 2.6, respectivamente. También se efectuó la deposición sobre un tercer tipo de probetas (figura 2.10), que permitieron evaluar la dureza del recubrimiento. El material de dichas probetas es acero Bohler Especial KNL (C%1.55, Si%0.30, Mn%0.30, Cr%11.50, Mo%0.70, V%1.00) acero con excelente tenacidad usualmente utilizado en herramientas. El uso de este acero se debe a que se busca disminuir que la ductilidad del aluminio tenga influencia sobre la dureza del recubrimiento dado su delgado espesor.



Figura 2.10 Probeta para evaluación de dureza del recubrimiento de ZrN.

Por tener un envejecido a 120 °C, la aleación de aluminio 7075-T6 es susceptible a cambios en su microestructura ante cualquier aumento de temperatura que supere tal valor durante el bombardeo iónico. Estos cambios afectan directamente las propiedades mecánicas del material y, por ende, las de cualquier otro compuesto donde se utilice el mismo como sustrato. Los procesos de deposición física en estado de vapor (PVD) típicamente se realizan a temperaturas superiores a los 120 °C, aunque en algunos casos se ha logrado obtener tasas de deposición aceptables a temperaturas inferiores a los 100 °C. La empresa encargada de la deposición del recubrimiento de ZrN, ofreció hacerlo a una temperatura inferior a la de envejecido del sustrato.

2.4. Estimación de Dureza Absoluta del Recubrimiento

Dado que el espesor del recubrimiento de ZrN es menor de 3 μ m, su dureza

absoluta no puede ser determinada directamente ya que las mediciones efectuadas con cualquier ensayo conocido estarán influenciadas por la dureza del sustrato. Para tener en cuenta estos efectos resulta conveniente aplicar pequeñas cargas de indentación y aplicar algún modelo teórico que permita separar la contribución del sustrato.

Para estimar la dureza absoluta del recubrimiento de ZrN se han efectuado pruebas de microdureza con un indentador Vickers (figura 2.11), con el cual se producen impresiones de forma piramidal, la huella permite apreciar las dos diagonales (d_1, d_2) de su base cuadrada con ayuda del analizador de imágenes y de un programa computacional se midieron las diagonales, d_1 y d_2 de cada huella, en micras, la diagonal promedio d permitió el cálculo de la dureza Vickers (H_V), mediante la fórmula:

$$H_V = 1.8544 \frac{P}{d^2}, \quad (3)$$

donde P es la carga aplicada en kgf y la diagonal d está en milímetros, con estos datos se empleó el modelo teórico propuesto por PUCHI [2002]. Dicho modelo ha sido seleccionado en razón de su virtud de describir satisfactoriamente la variación de la dureza para diferentes sistemas recubiertos.

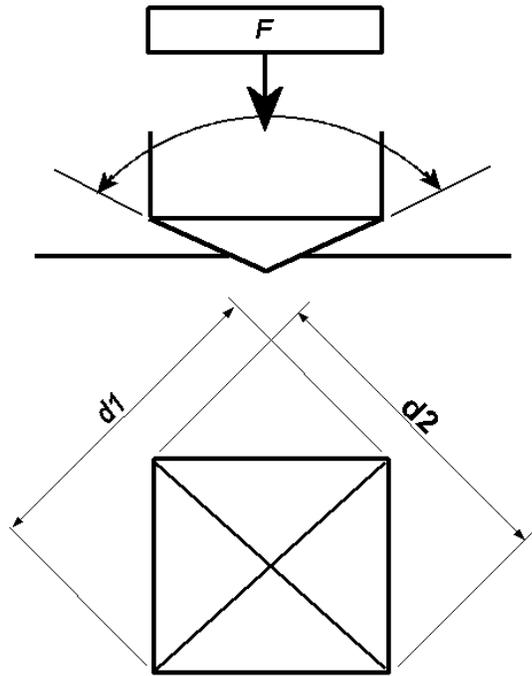


Figura 2.11 Identador Vickers y huella dejada por el mismo.

Las pruebas o ensayos de microdureza se realizaron utilizando un equipo marca **LECO**, modelo **862-100-100**, mostrado en la figura 2.12, acoplado al sistema analizador de imágenes marca **LECO**, modelo **IA-3001** (ver figura 2.13).



Figura 2.12 Equipo para medición de microdureza LECO 862-100-100.



Figura 2.13 Sistema analizador de imágenes LECO IA-3001.

2.5. Ensayos de Tracción

Con la finalidad de determinar las propiedades mecánicas estáticas de la aleación de aluminio 7075-T6 recubierta con ZrN, se realizaron ensayos de tracción conforme a la norma ASTM B557. Dichos ensayos fueron realizados en una máquina de ensayo universal *Instron 8502*, mostrada en la figura 2.14.

El equipo es controlado mediante un programa que permite efectuar numerosos registros por minuto durante un determinado ensayo. Cada registro incluye una medición de desplazamiento, correspondiente al alargamiento instantáneo de la probeta ensayada (ΔL_i), y una medición de la carga aplicada (F_i). Con esta información se determinan los valores de deformación real (ε_i) y esfuerzo real (σ_i), respectivamente, que se emplean para el trazado de las curvas σ - ε .



Figura 2.14 Máquina de Ensayo Universal Instron 8502.

Antes de realizar las consideraciones referentes a los datos obtenidos del ensayo de tracción se debe tener en cuenta, aplicar a los datos de elongación una corrección por 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, extensiones, etc.), es mínima pero no por esto es despreciable. Para considerar este efecto se utiliza la siguiente expresión:

$$(\Delta L_i)_{corr} = \Delta L_i - \Delta F_i \left(\frac{1}{K_{exp}} - \frac{1}{K_{prob}} \right) \quad (4)$$

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:

$$K_{exp} = \frac{\sum F_i}{\sum \Delta L_i}$$

$$K_{prob} = \frac{A_0 E}{L_0}$$

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

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

Esfuerzo real:

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

Deformación ingenieril

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

Deformación real:

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

A partir de los datos obtenidos en este procedimiento, conoceremos el Esfuerzo de Fluencia, con este valor se establecerán los niveles de carga a los que se realizarán los ensayos de fatiga, tanto al aire como en ambiente corrosivo.

En la medición se despreció el módulo elástico (E) del recubrimiento, dado que en trabajos investigativos previos [Irausquín, 2003] se determinó que, dado el reducido espesor del recubrimiento ($\sim 3 \mu\text{m}$), los valores de esfuerzo de fluencia obtenidos en este tipo de ensayos son similares a los valores conseguidos tomando en cuenta el módulo elástico del sustrato. La información obtenida de los ensayos

además de conducir al trazado de las curvas σ - ε , permitió determinar el esfuerzo real de fluencia a 0.2% de la deformación total (σ_y), el esfuerzo real a carga máxima (σ_u) y el porcentaje de elongación.

2.6. Ensayos de Fatiga y Corrosión-Fatiga

Para este tipo de ensayos se utilizó una máquina de flexión rotativa marca *Fatigue Dynamics*, modelo **RBF-200** (ver figura 2.15).

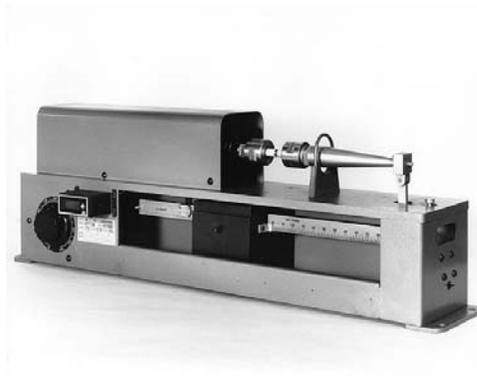


Figura 2.15 Máquina de fatiga por flexión rotativa Fatigue Dynamics RBF-200.

Esta máquina ha sido diseñada para la aplicación de carga cíclica en voladizo, con una velocidad de giro en el intervalo de 500 a 6000 RPM. Posee un contador digital para la medición del número de ciclos a fractura y un interruptor de contacto que la apaga automáticamente cuando falla la probeta.

La carga en voladizo en la máquina de ensayo, origina un momento flector (M_f), que produce un esfuerzo normal (S) sobre la sección transversal de la probeta, este valor puede ser calculado de la siguiente manera:

$$S = (M_f * r) / I \quad (5)$$

en donde r es el menor radio de la sección transversal de la probeta, I es el momento polar de inercia, que para una barra de sección circular con diámetro D , se obtiene mediante la expresión:

$$I = (\pi * D^4) / 64 \quad (6)$$

Considerando que $r = D / 2$, se puede determinar que:

$$M_f = (S * \pi * D^3) / 32 \quad (7)$$

Dado que el momento en la máquina esta expresado en lbf * pulg, fue necesario emplear un factor de corrección (0.00087) para poder ingresar los valores esfuerzo (S) en MPa y diámetro (D) en mm tal como se muestra en la ecuación (7), obteniéndose:

$$M_f = 0.00087 * S * D^3 \quad (8)$$

M_f → lbf * pulg
 S → MPa
 D → mm

Luego se hace el montaje de la probeta, sujetándola con las mordazas a un eje

de salida del motor y a un eje cónico (ver figura 2.16). Se ajusta la velocidad de giro y se coloca el contador en cero (0). Luego se desplaza la pesa para aplicar el momento flector (M_f) calculado y se libera el interruptor de contacto que apaga la máquina cuando ocurre la falla.

Accionando el interruptor principal se inicia el ensayo. Una vez que ocurre la falla, se mide el número de ciclos a fractura (N_f).

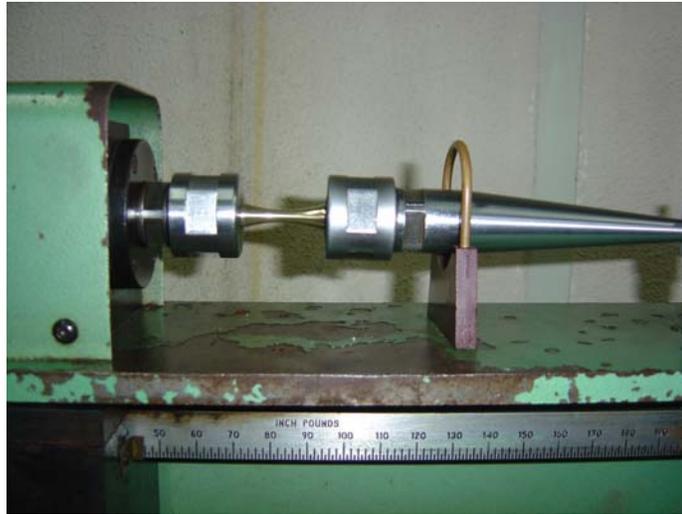


Figura 2.16 Montaje de probeta para ensayo de fatiga en la máquina Fatigue Dynamics RBF-200.

Se ensayaron al aire cuarenta y ocho (48) probetas de aleación de aluminio 7075-T6 + ZrN, distribuidas en cuatro niveles de esfuerzo distintos, entre el 40% y el 80% del esfuerzo de fluencia (σ_y) medido para el material base. De las 48 probetas se destinaron veinticuatro para ser ensayadas en fatiga al aire y haciendo uso de un accesorio de la máquina de fatiga se ensayaron las otras veinticuatro (24) probetas en

presencia de un medio corrosivo. El número de probetas ensayadas en cada caso se estableció según la norma ASTM E739.

El medio corrosivo empleado fue una solución de cloruro de sodio (NaCl) al 3%. El accesorio utilizado fue una cámara salina, fabricada de acrílico, que cubre la sección calibrada de las probetas, sin impedir su rotación, y suministra la solución corrosiva mediante goteo sobre las mismas. La figura 2.17 permite apreciar tal accesorio.



Figura 2.17 Cámara salina para ensayos de corrosión-fatiga en la máquina Fatigue Dynamics RBF-200.

Durante todos los ensayos se utilizó una frecuencia de 50 Hz, por lo que la velocidad de giro fue de 3000 RPM.

De acuerdo a la norma ASTM E468, con los datos obtenidos en los ensayos

de fatiga y corrosión-fatiga del material recubierto, se trazaron las curvas logarítmicas de amplitud de esfuerzo (S) versus ciclos a la fractura (N_f), o curvas $\log S$ - $\log N_f$. Sometiendo estas curvas a un análisis de regresión lineal por el método de mínimos cuadrados, se pudieron obtener los parámetros de las correspondientes ecuaciones de BASQUIN, conforme a lo establecido en la norma ASTM E739. Tales parámetros permitieron describir el comportamiento a la fatiga, tanto al aire como en un medio corrosivo, del material recubierto, mediante una expresión paramétrica que relaciona el número de ciclos a la fractura (N_f) con el esfuerzo alternante (S) aplicado al material:

$$S = S_f (N_f)^{-b} \quad (9)$$

Donde S_f está relacionado con el coeficiente de resistencia a la fatiga del material y b representa el exponente de dicha resistencia a la fatiga.

2.7. Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)

2.7.1. Estudio Fractográfico

El estudio fractográfico mediante MEB (Microscopía Electrónica de Barrido) busca determinar principalmente el origen y condición de la fractura de las probetas, para lo cual fue necesario hacer evaluaciones sobre el plano de fractura y perpendicularmente al mismo.

Para la observación se seleccionaron cuatro probetas del material recubierto: dos para los niveles de esfuerzo más alto y más bajo de los ensayos de fatiga y dos para los niveles de esfuerzo más alto y más bajo de los ensayos de corrosión-fatiga. Una vez seleccionadas las probetas, se procedió a cortar dos pequeños trozos de cada una, correspondientes al plano de fractura y a un corte perpendicular al mismo. Para obtener una muestra del plano de fractura se efectuó un corte perpendicular a la sección calibrada de la probeta, a una distancia de aproximadamente 5 mm desde la fractura, en cuanto al corte perpendicular al plano de fractura, primero se identificó al menos un punto de inicio de grieta sobre el referido plano. Luego se efectuó un corte longitudinal a una distancia de aproximadamente 1 mm a cada lado desde un determinado inicio de grieta, sobre el trozo de probeta que contenía tal inicio de grieta se realizó un corte perpendicular a su sección calibrada, a una distancia aproximada de 6 mm desde la fractura. Todos los cortes se efectuaron con disco de diamante, empleando una cortadora de precisión marca *LECO*, modelo *VC-50*, como la que aparece en la figura 2.18.



Figura 2.18 Cortadora de precisión con disco de diamante LECO VC-50.

Después de haber cortado las muestras se procedió a limpiar las mismas con un equipo de limpieza por ultrasonido marca **BUEHLER**, modelo **ULTRAMET II** (ver figura 2.19).

Para hacer esto, se colocaron por quince (15) segundos las muestras en un recipiente de vidrio con alcohol para evitar alteraciones en el recubrimiento. Posteriormente se secaron las muestras con un equipo marca **BUEHLER**, modelo **TORRAMET**, que se puede observar en la figura 2.20.



Figura 2.19 Equipo de limpieza

Por ultrasonido BUEHLER ULTRAMET II.



Figura 2.20 Secador de probetas

BUEHLER TORRAMET.

Las muestras con un corte perpendicular al plano de fractura debían ser pulidas, justamente en la cara donde había sido efectuado dicho corte, con el propósito de poder examinar el conjunto formado por el sustrato y el recubrimiento de ZrN, especialmente la superficie de éste último y la intercara entre ambos. Para facilitar la manipulación para el proceso de pulido, las muestras fueron embutidas utilizando un equipo marca **BUEHLER**, modelo **SIMPLIMET 2** (figura 2.21), en el cual se calentó la Baquelita durante nueve minutos a ciento ochenta grados Celsius y a una presión de cuatro mil cuatrocientos psi.



Figura 2.21 Equipo para embutido de probetas BUEHLER SIMPLIMET 2.

El pulido se hizo mediante lijado con papel esmeril de SiC, de granulometrías entre 600 y 1200 y acabado fino con paño y alúmina de $0.3\ \mu\text{m}$. Para esto se empleó la pulidora marca **BUEHLER**, modelo **ECOMET 5**, que aparece en la figura 2.22.



Figura 2.22 Pulidora para preparación metalográfica BUEHLER ECOMET 5.

Un último desbaste fino por vibración se hizo con un equipo marca **BUEHLER**, modelo **VIBROMET 2** (figura 2.23) utilizando una solución abrasiva de sílica coloidal diluida en agua destilada y un paño suave de MasterTex durante treinta minutos aproximadamente.



Figura 2.23 Equipo de desbaste fino por vibración BUEHLER VIBROMET 2.



Figura 2.24 Muestras preparadas para la evaluación fractográfica mediante MEB.

Las cuatro probetas fueron montadas sobre pequeños soportes metálicos para

su observación en un microscopio electrónico de barrido marca *Philips*, modelo *XL 30*, perteneciente al Instituto Universitario de Tecnología, como el de la figura 2.25.



Figura 2.25 Microscopio Electrónico de Barrido Philips XL 30.

Se realizó una sesión de MEB para examinar todas las muestras. Durante la cual se tomaron fotografías de las superficies de fractura, de la intercara substrato-recubrimiento y otros detalles de interés. Algunas de estas fotografías fueron tomadas utilizando Electrones Primarios o Back Scattered Electron (BSE) para poder determinar por diferencias de contrastes los distintos materiales que componen las muestras dependiendo de su peso atómico. Las micrografías que muestran el relieve topográfico de la zona de fractura fueron captadas usando Electrones Secundarios o Secondary Electron (SE) y por último se utilizó Energía de Dispersión de Rayos X o Energy Dispersive x-ray Spectrometer (EDS) para determinar la composición química tanto del recubrimiento como del substrato.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Dureza Absoluta y Rugosidad del Recubrimiento

Luego de la aplicación del modelo de estimación de dureza propuesto por Puchi 2002, el cual determina la dureza del recubrimiento a partir de la dureza del conjunto sustrato + recubrimiento, se obtiene que la dureza absoluta del recubrimiento es de 21 GPa.

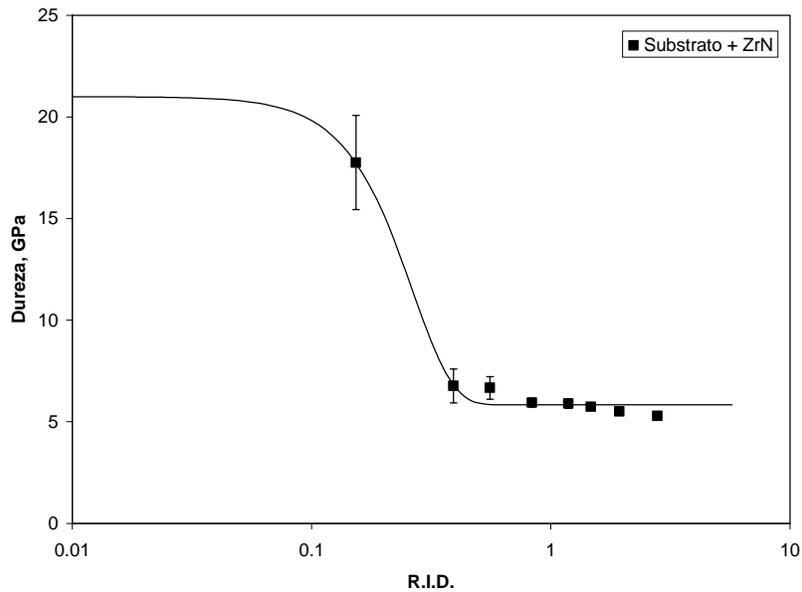


Figura 3.1 Gráfica de estimación de dureza del conjunto sustrato recubrimiento.

Mediante el pulido de las probetas de fatiga se logró reducir el valor de la rugosidad promedio (Ra) en la superficie de su sección calibrada, aproximadamente de $0.4 \mu\text{m}$ en la condición posterior a la fabricación a $0.06 \mu\text{m}$ posterior al pulido.

La preparación superficial de las probetas fue satisfactoria, puesto que ninguno de las mediciones de rugosidad promedio (Ra) superó el valor de $0.20 \mu\text{m}$, el cual es el valor tope establecido por la norma ASTM E606.

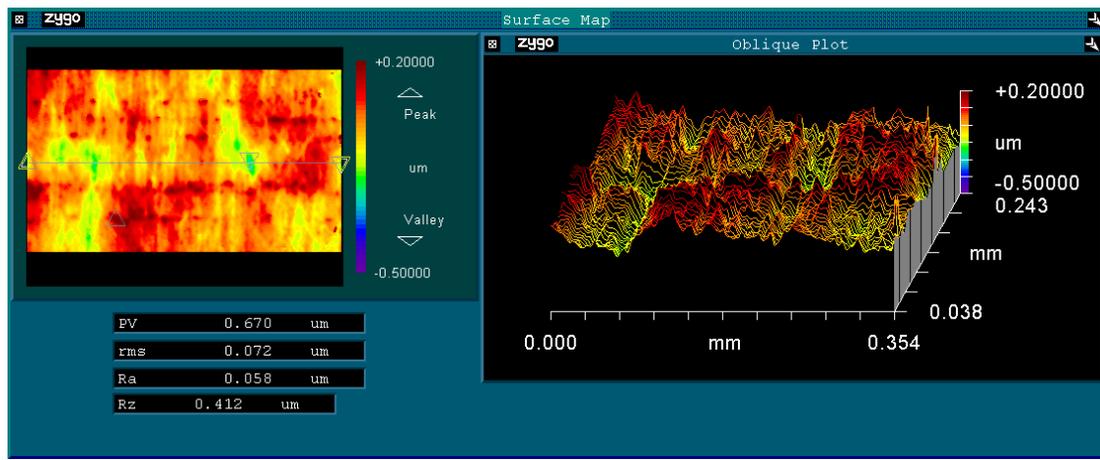


Figura 3.2 Resultados del perfilómetro Zygo

3.2. Ensayos de Tracción (Curvas σ - ϵ)

En la figura 3.3 se muestran las curvas σ - ϵ obtenidas para el material base en un trabajo investigativo previo [Irausquín, 2003], mientras que en la figura 3.4 se muestran las curvas para el material recubierto. Las propiedades estáticas o de tracción obtenidas para cada probeta del substrato y del material recubierto así como el promedio en cada una de estas condiciones con su desviación estándar se pueden apreciar en las tablas 3.1 y 3.2.

Tabla 3.1 Propiedades de tracción obtenidas para el sustrato (7075-T6).

Probeta Número	σ_y (MPa)	σ_{uts} (MPa)	% de Reducción de Área
1	545	651	32
2	556	652	32
3	541	640	32
Promedio	547	648	32
Desviación Estándar	7,0	7,0	0.12

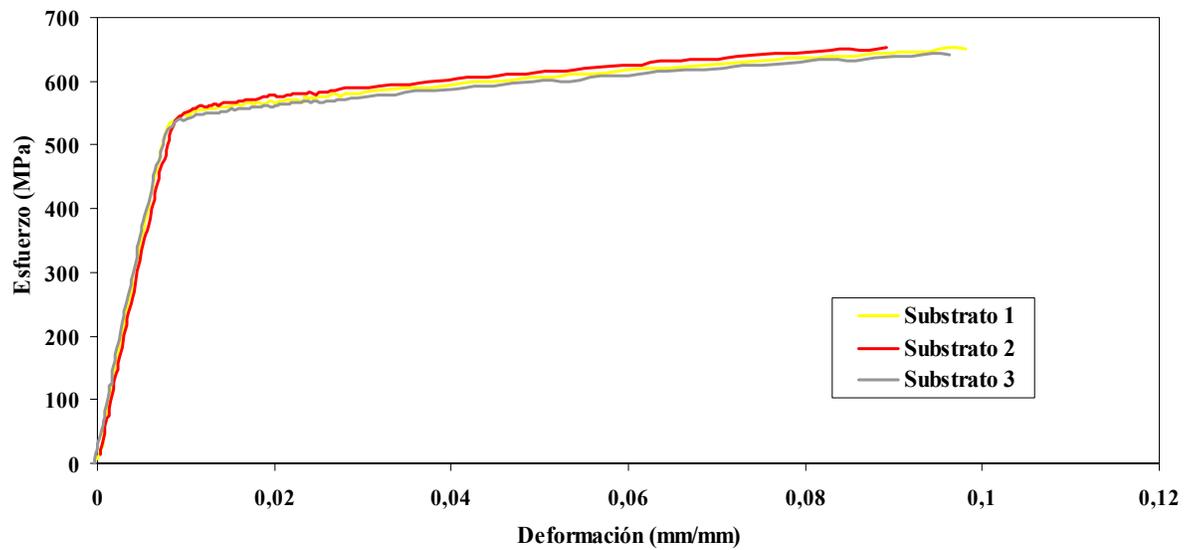


Figura 3.3 Curvas de esfuerzo real (σ) vs deformación real (ϵ) de la aleación de aluminio 7075-T6 (sustrato). [Irausquín, 2003]

Tabla 3.2 Propiedades de tracción obtenidas para el material recubierto (7075-T6 + ZrN).

Probeta Número	σ_y (MPa)	σ_{uts} (MPa)	% de Reducción de Área
1	311	457	42,62
2	361	503	43,37
3	308	471	45,01
Promedio	327	477	44
Desviación Estándar	29,8	23,6	1,2

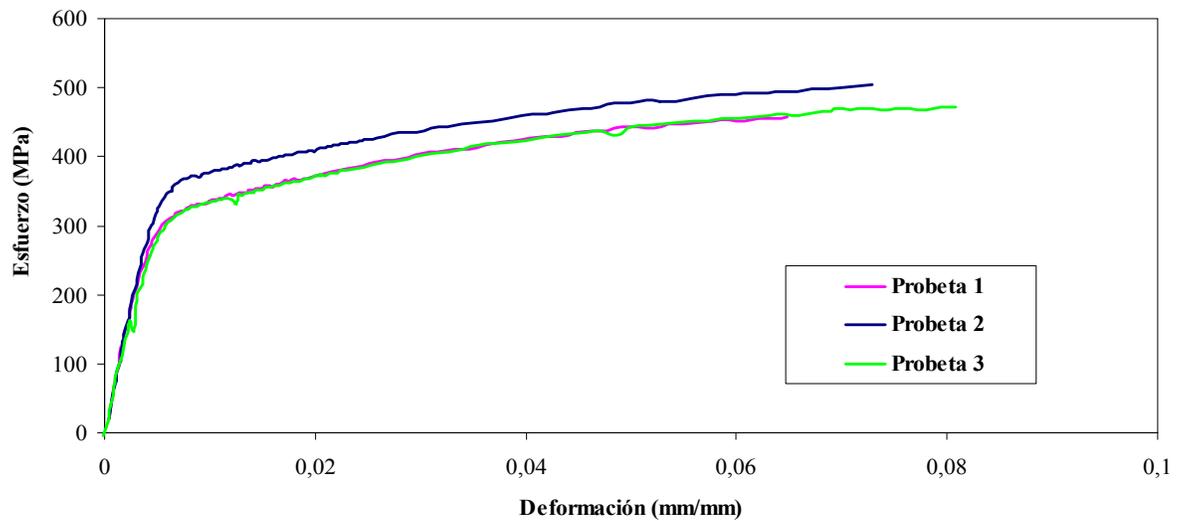


Figura 3.4 Curvas de esfuerzo real (σ) vs. deformación real (ϵ) de la aleación de aluminio 7075-T6 recubierta con ZrN.

Observando las dos tablas anteriores es posible notar que el esfuerzo real de fluencia a 0.2% de la deformación total (σ_y) y la resistencia a la tracción (σ_u) del

material recubierto con ZrN son inferiores que en el sustrato.

La disminución en las propiedades de tracción señaladas puede apreciarse mediante una gráfica comparativa de las curvas σ - ϵ promedio del sustrato y del material recubierto, tal como la mostrada en la figura 3.5.

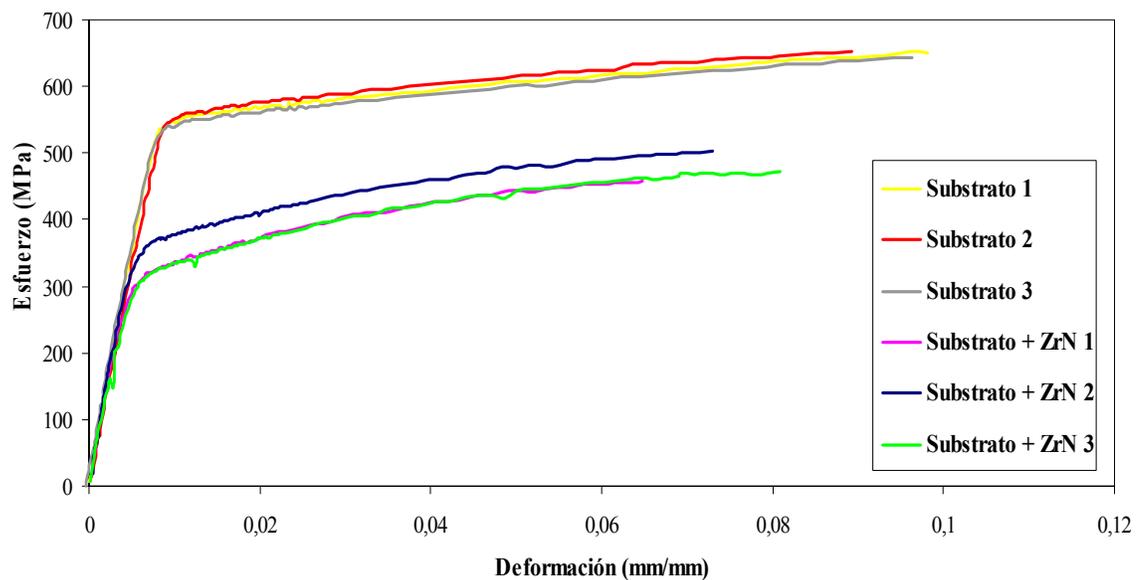


Figura 3.5 Comparación de las curvas σ - ϵ del sustrato y del material recubierto.

La figura 3.5 indica claramente una reducción de las zonas tanto elástica como plástica para el material recubierto, esto supone un anticipo en la fractura. Además, se puede notar con facilidad la similitud que tienen las pendientes de las seis curvas en la zona elástica del material, lo que puede interpretarse como un predominio de las

propiedades del sustrato en el comportamiento mecánico del conjunto, mientras que la gran diferencia en las pendientes de la zona plástica se podría atribuir a una disminución en las propiedades del material recubierto con respecto a las del sustrato (ver tabla 3.1 y 3.2). Tal disminución, ligeramente inferior al 60% para la resistencia a la tracción (σ_u), no puede ser atribuida al recubrimiento de ZrN puesto que el mismo no influye sobre las propiedades intrínsecas del sustrato; de manera que, aunque sus propiedades sean inferiores, el conjunto debe tener al menos las mismas propiedades que el sustrato. Aunado a esto, el recubrimiento de ZrN tiene una mayor dureza absoluta que el sustrato, lo que puede ser indicativo de propiedades mecánicas superiores.

Por estas razones y teniendo en consideración la gran influencia del sustrato en las propiedades a tracción del material recubierto, se puede intuir un cambio en las propiedades del mismo (del sustrato) durante la deposición del recubrimiento. Este cambio puede haber ocurrido en caso de haberse superado durante dicho proceso la temperatura de envejecimiento de la aleación de aluminio 7075-T6, que específicamente es de 120 °C. Esto se puede confirmar observando los valores de porcentaje de reducción de área en donde el material recubierto posee valores mucho mayores que los del sustrato sin recubrir, lo que nos habla de una ganancia en ductilidad a expensas de resistencia a la tracción.

3.3. Ensayos de Fatiga y Corrosión-Fatiga

Los resultados de las mediciones efectuadas durante los ensayos de fatiga y corrosión-fatiga del sustrato y del material recubierto se muestran en las tablas desde la 3.3 a la 3.6. Estas tablas indican el esfuerzo alternante (S) aplicado a cada probeta y el número de ciclos a la fractura (N_f). Adicionalmente, para cada nivel de esfuerzo aplicado en fatiga y corrosión-fatiga se incluyen el promedio de N_f y su desviación estándar. Aplicando logaritmo de base 10 a los datos de las tablas 3.3 a la 3.6 se han trazado las curvas $\log S$ - $\log N_f$ correspondientes a los ensayos de fatiga y corrosión-fatiga del sustrato y del material recubierto. Las figuras 3.6 y 3.7 muestran las curvas obtenidas para los ensayos realizados al aire, mientras que las figuras 3.8 y 3.9 muestran aquellas obtenidas para ensayos en NaCl al 3% (corrosión-fatiga).

Tabla 3.3 Resultados de los ensayos de fatiga del sustrato (7075-T6).

Nº de Probeta	Esfuerzo (MPa)	Ciclos a falla (Nf)	Nº de Probeta	Esfuerzo (MPa)	Ciclos a falla (Nf)
1	269	93000	1	323	55500
2		182900	2		25900
3		72100	3		69600
4		128400	4		41200
5		144200	5		107200
6		88600	6		59900
Promedio		118200	Promedio		59883
Desviación estándar		41479	Desviación estándar		27772

Nº de Probeta	Esfuerzo (MPa)	Ciclos a falla (Nf)	Nº de Probeta	Esfuerzo (MPa)	Ciclos a falla (Nf)
1	377	17400	1	430	9000
2		21500	2		6400
3		25300	3		8000
4		23800	4		4400
5		21800	5		9200
6		12900	6		8700
Promedio		20450	Promedio		7617
Desviación estándar		4560	Desviación estándar		1874

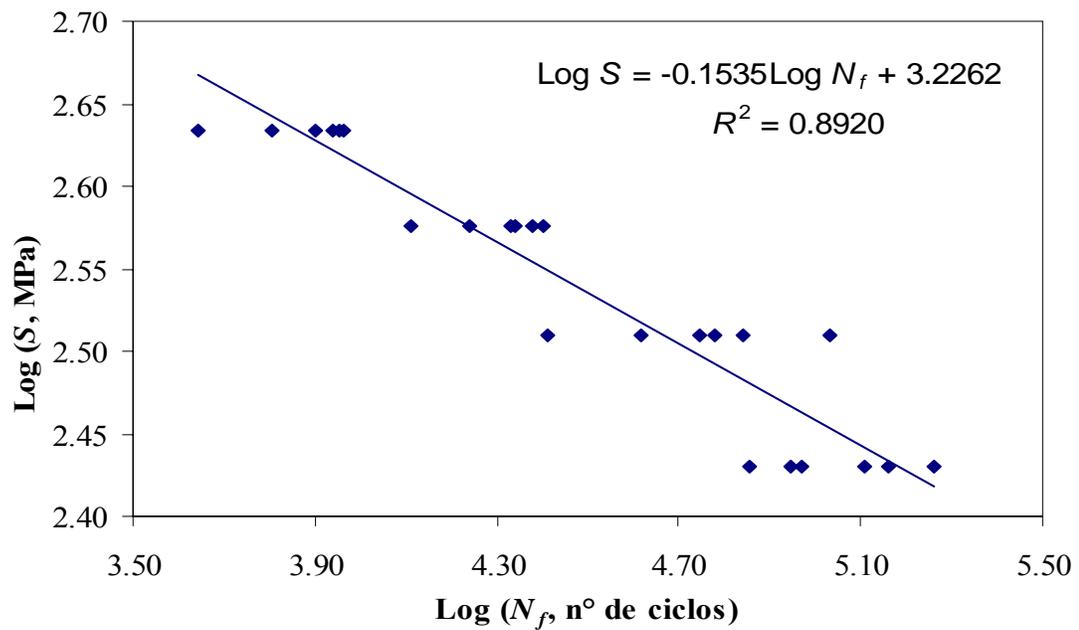


Figura 3.6 Curva $\log S$ - $\log N_f$ de resistencia a la fatiga del sustrato (7075-T6) ensayado al aire.

Tabla 3.4 Resultados de los ensayos de fatiga del material recubierto

(7075-T6 + ZrN) ensayado al aire.

N° de Probeta	Esfuerzo (MPa)	Ciclos a falla (Nf)	N° de Probeta	Esfuerzo (MPa)	Ciclos a falla (Nf)
1	169	196.400	1	219	95.000
2		180.100	2		40.900
3		378.000	3		61.400
4			4		105.400
5			5		119.700
6			6		37.800
Promedio		251.500	Promedio		76.700
Desviación estándar		109.855	Desviación estándar		34.746
N° de Probeta	Esfuerzo (MPa)	Ciclos a falla (Nf)	N° de Probeta	Esfuerzo (MPa)	Ciclos a falla (Nf)
1	269	73.300	1	323	9.600
2		32.300	2		9.900
3		42.800	3		7.900
4		41.300	4		18.500
5		75.600	5		7.800
6		34.300	6		16.300
Promedio		49.933	Promedio		11.667
Desviación estándar		19.419	Desviación estándar		4.576
N° de Probeta	Esfuerzo (MPa)	Ciclos a falla (Nf)			
1	377	5.000			
2		2.900			
3		2.870			
4		7.200			
5		6.500			
6		3.500			
Promedio		4.662			
Desviación estándar		1.876			

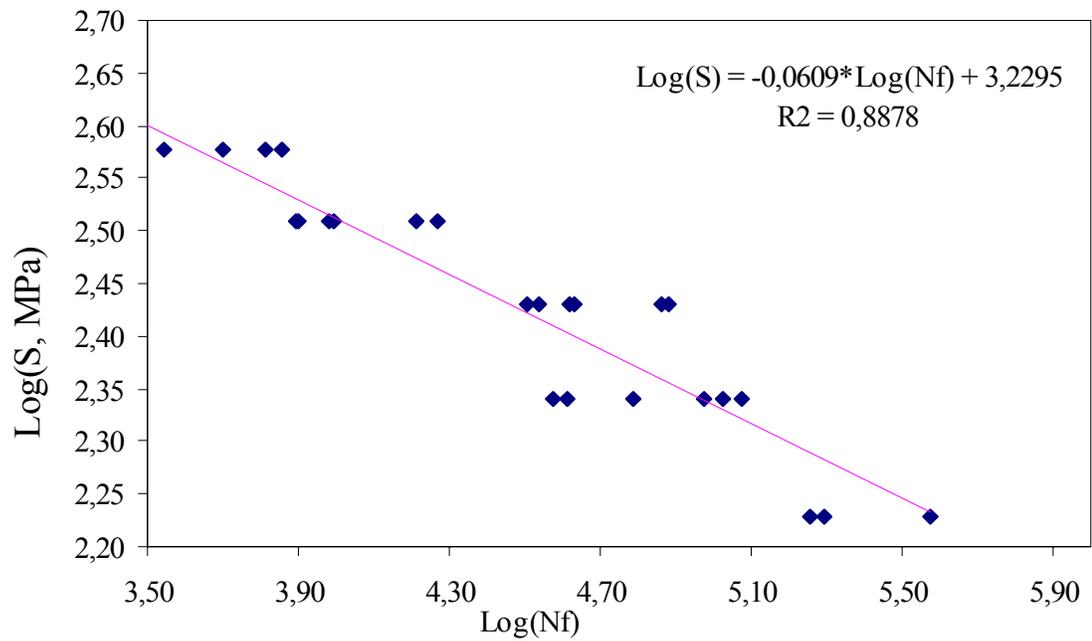


Figura 3.7 Curva $\log S\text{-}\log N_f$, de resistencia a la fatiga del material recubierto (7075-T6 + ZrN) ensayado al aire.

Tabla 3.5 Resultados de los ensayos de corrosión-fatiga del sustrato (7075-T6).

Nº de Probeta	Esfuerzo (MPa)	Ciclos a falla (Nf)	Nº de Probeta	Esfuerzo (MPa)	Ciclos a falla (Nf)
1	219	77200	1	269	38500
2		72500	2		52200
3		67400	3		34500
4		70700	4		33000
5		80900	5		31300
6		54000	6		35100
Promedio		70450	Promedio		37433
Desviación estándar		9369	Desviación estándar		7623

Nº de Probeta	Esfuerzo (MPa)	Ciclos a falla (Nf)	Nº de Probeta	Esfuerzo (MPa)	Ciclos a falla (Nf)
1	323	16200	1	377	11600
2		16300	2		8400
3		16900	3		9800
4		19300	4		9900
5		14800	5		8400
6		16100	6		9000
Promedio		16600	Promedio		9517
Desviación estándar		1491	Desviación estándar		1211

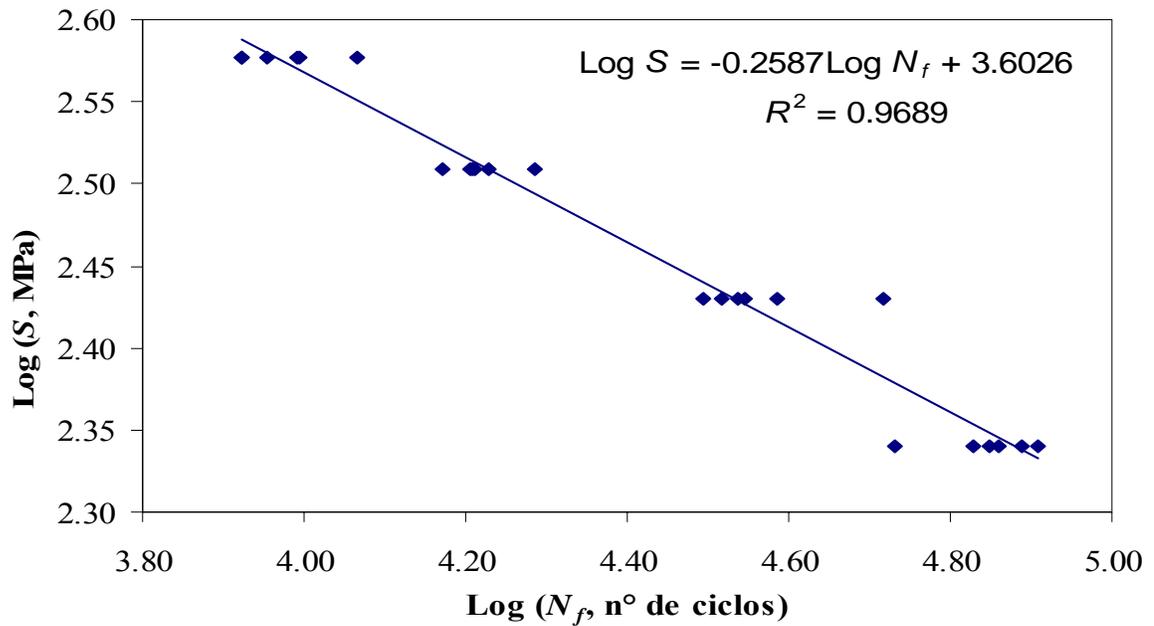


Figura 3.8 Curva $\log S$ - $\log N_f$ de resistencia a la fatiga del sustrato (7075-T6)

ensayado en una solución de cloruro de sodio (NaCl) al 3%.

Tabla 3.6 Resultados de los ensayos de corrosión-fatiga del material recubierto.

N° de Probeta	Esfuerzo (MPa)	Ciclos a falla (Nf)	N° de Probeta	Esfuerzo (MPa)	Ciclos a falla (Nf)
1	169	230.700	1	219	49.500
2		104.600	2		40.600
3		290.000	3		44.400
4		179.900	4		65.000
5		210.000	5		84.100
6		156.000	6		56.600
Promedio		195.200	Promedio		56.700
Desviación estándar		63.946	Desviación estándar		16.012
N° de Probeta	Esfuerzo (MPa)	Ciclos a falla (Nf)	N° de Probeta	Esfuerzo (MPa)	Ciclos a falla (Nf)
1	269	38.800	1	323	8.800
2		21.500	2		9.500
3		35.800	3		12.500
4		20.100	4		13.100
5		25.400	5		8.600
6		37.500	6		8.100
Promedio		29.850	Promedio		10.100
Desviación estándar		8.469	Desviación estándar		2.148

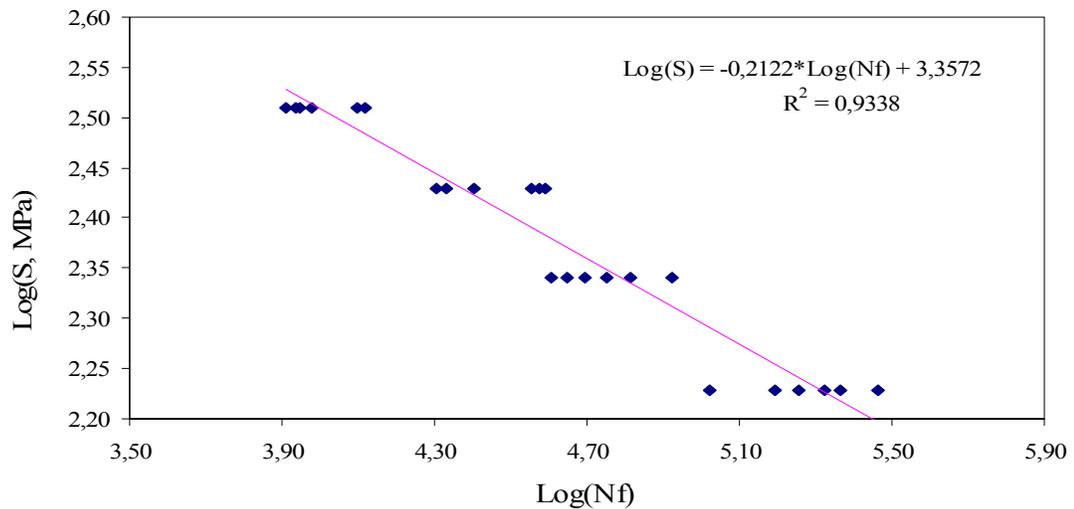


Figura 3.9 Curva $\log S\text{-}\log N_f$, de resistencia a la fatiga del material recubierto (7075-T6 + ZrN) ensayado en una solución de cloruro de sodio (NaCl) al 3%.

Desde la figura 3.6 hasta la 3.9 se trazó una línea de tendencia que describe el comportamiento a la fatiga al aire y fatiga corrosión, esto se realiza con la finalidad de determinar los parámetros de las ecuaciones de BASQUIN correspondientes. Cada figura incluye la ecuación de la referida línea de tendencia y el cuadrado del coeficiente de correlación (R^2) entre ésta y los datos experimentales graficados.

Se puede notar en las figuras anteriores que a medida que los esfuerzos son menores aumenta la desviación estándar entre los resultados, esto se debe a que para altos niveles de esfuerzo el parámetro que gobierna el modo de falla es el esfuerzo y a medida que los esfuerzos disminuyen y por consiguiente aumenta el número de ciclos, el factor que determina la fractura es la probabilidad de nucleación de grietas en la superficie; dada la dificultad de conseguir valores de ciclaje similares para nucleación y posterior fractura, la desviación estándar a bajos niveles de esfuerzo es mucho mayor.

Al comparar los valores de desviación estándar a bajos niveles de esfuerzo entre el substrato recubierto al aire y el substrato recubierto en ambiente corrosivo, se pudo observar que éste último posee una menor desviación estándar, esto corrobora la teoría de que a bajo nivel de esfuerzo el factor determinante de la falla es la probabilidad de nucleación de grieta; y en presencia de ambiente corrosivo las picaduras que este produce sobre el recubrimiento sirven como concentradores de esfuerzo, aumentando la probabilidad de nucleación y por tanto disminuyendo la

desviación estándar.

Mediante regresión lineal de las ecuaciones que aparecen en las figuras 3.6 a la 3.9, se obtienen los parámetros A y b mostrados en la tabla 3.7, involucrados en las correspondientes ecuaciones de BASQUIN. En esta misma tabla se muestra además la forma que tienen dichas ecuaciones.

Tabla 3.7 Parámetros y ecuaciones de BASQUIN correspondientes a los ensayos de fatiga y corrosión-fatiga del sustrato y del material recubierto.

Condición de Material	Medio de Ensayo	A (MPa)	b	Ecuación de Basquin
Substrato (7075-T6)	Aire	1683,4	0,15	$S=1683,4 N_f^{-0,15}$
Material Recubierto (7075-T6+ZrN)	Aire	3229,5	0,18	$S=3229,5 N_f^{-0,18}$
Substrato (7075-T6)	3% NaCl	4005,4	0,26	$S=4005,4 N_f^{-0,26}$
Material Recubierto (7075-T6+ZrN)	3% NaCl	3357,2	0,21	$S=3357,2 N_f^{-0,21}$

Para facilitar la descripción del comportamiento a la fatiga y corrosión-fatiga mediante los parámetros señalados en la tabla anterior, en la figura 3.10 se puede apreciar una gráfica comparativa de las curvas $\log S$ - $\log N_f$ obtenidas para el sustrato y el material recubierto.

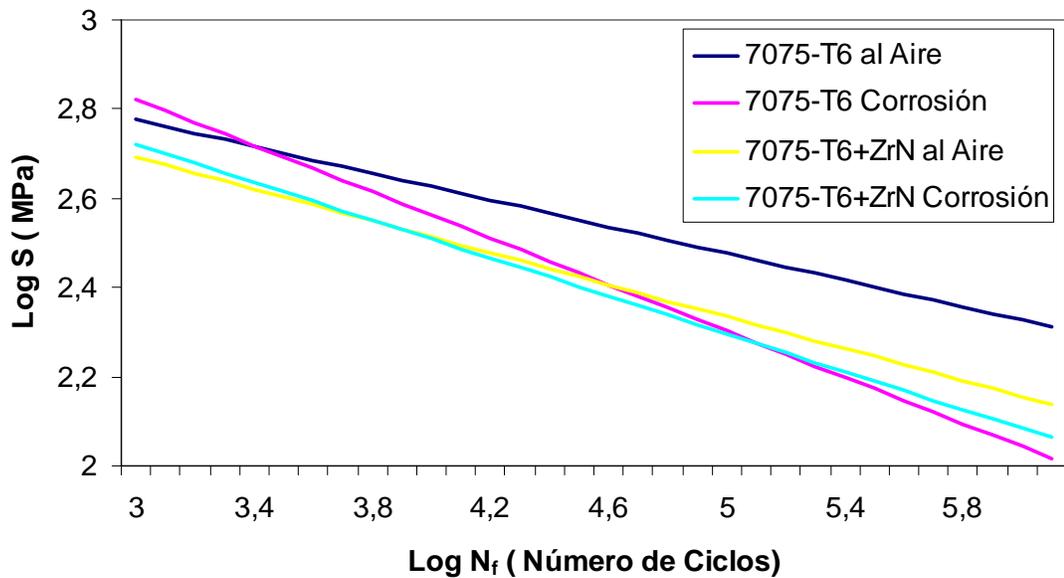


Figura 3.10 Comparación de las curvas $\log S$ - $\log N_f$ de resistencia a la fatiga y a la corrosión-fatiga obtenidas para el sustrato y el material recubierto.

Al observar la figura anterior se pueden notar las diferencias entre curvas de fatiga y corrosión-fatiga del sustrato con y sin recubrimiento para niveles de esfuerzo comunes. Se aprecia claramente una reducción en la vida a la fatiga del sustrato cuando es ensayado bajo NaCl al 3%, mientras que el comportamiento es bastante similar cuando se trata del material recubierto.

Al comparar los valores de b obtenidos a partir de las ecuaciones de BASQUIN para las muestras ensayadas al aire podemos notar que para el material recubierto el valor de b es mayor, lo que supone una menor sensibilidad a la falla por fatiga como

consecuencia de variaciones en el esfuerzo alternante aplicado.

En cuanto a las curvas del material recubierto (7075-T6 + ZrN) la figura 3.11 permite apreciar reducciones en la vida a la fatiga al aire y en el medio corrosivo. Para estimar las reducciones en la vida a la fatiga se utilizan las ecuaciones (10) y (11), que sirven para estimar la variación de las propiedades del material recubierto con relación a las del substrato. Así se tiene:

$$\text{Reducción (\%)} = \frac{N_{f_{\text{Material Recubierto}}} - N_{f_{\text{Substrato}}}}{N_{f_{\text{Substrato}}}} * 100\%, \quad (10)$$

donde N_f , tanto para el substrato como para el material recubierto, se obtiene despejando de la ecuación de BASQUIN, quedando de la forma

$$N_f = (A/S)^{1/b} \quad (11)$$

Sustituyendo las constantes A y b para cada condición de material y los valores de S y N_f medidos experimentalmente en los ensayos de fatiga y corrosión-fatiga, se obtienen los porcentajes de reducción en la vida a la fatiga para ambos medios a varios niveles de esfuerzo aplicados en común.

Una gráfica de estos porcentajes de reducción se puede apreciar en la figura 3.11. En esta se puede notar que para los ensayos de fatiga al aire, la reducción varió en un 98% para 269 MPa y un 160% para 377 MPa, mientras que para los ensayos de corrosión-fatiga varió en un 11% para 219 MPa y un 82% para 323 MPa.

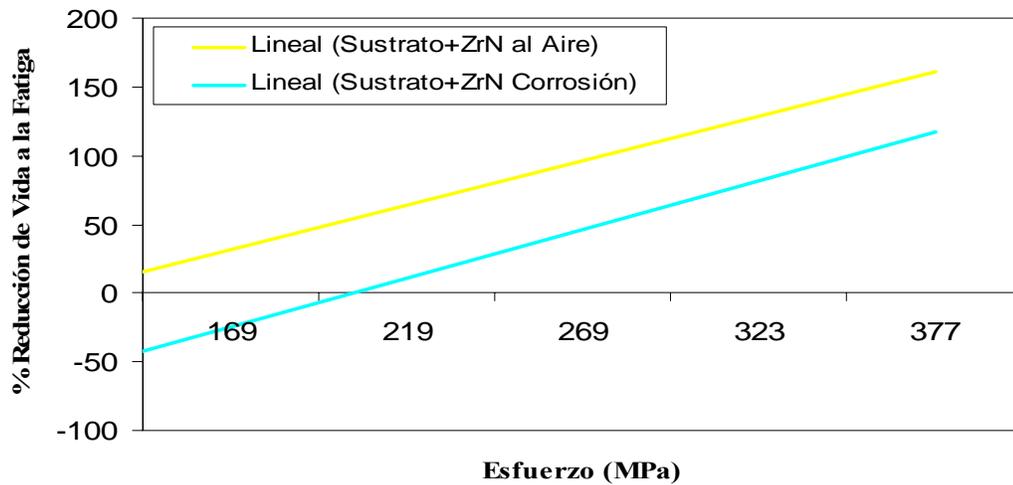


Figura 3.11 Reducción de vida a la fatiga al aire y en un medio corrosivo del material recubierto con respecto al sustrato.

A pesar de que para el sustrato en los ensayos en medio corrosivo existe un considerable aumento del parámetro b de la ecuación de BASQUIN con respecto a los ensayos al aire, para las muestras recubiertas dicho parámetro es bastante similar tanto al aire como en corrosión, esto es un indicio de que a pesar de la disminución en la vida a la fatiga de las muestras recubiertas, el recubrimiento ofrece cierta protección al sustrato bajo ambiente corrosivo, lo que además sugiere que la sensibilidad a la falla por fatiga sea bastante similar tanto para los ensayos al aire como en medio corrosivo para el material recubierto. Se podría inferir que de no haberse perdido las propiedades mecánicas del sustrato en las muestras recubiertas, el comportamiento bajo ambiente corrosivo sería favorable al compararlo con el del sustrato.

3.4. Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)

3.4.1. Estudio Fractográfico

A continuación se presenta el análisis de las superficies de fractura realizado por medio de un Microscopio Electrónico de Barrido (MEB). El estudio fue llevado a cabo a las zonas correspondientes a las propias superficies de fractura y a cortes longitudinales perpendiculares a dicha superficie. Se emplearon ocho muestras de las probetas fracturadas, cuatro correspondientes a los cortes longitudinales y cuatro a los cortes transversales de las muestras recubiertas, todas escogidas en los niveles de esfuerzo más alto y más bajo cercanos a la tendencia de las curvas de Wöhler.

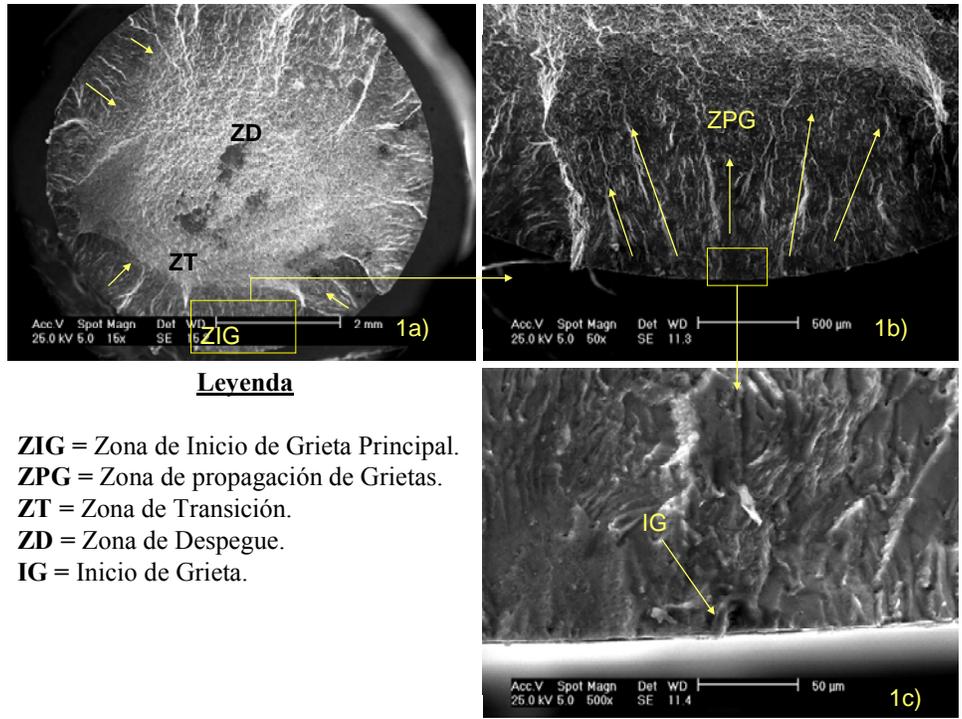
Al estudiar la muestra 1, la cual corresponde al ensayo de fatiga al aire al nivel de esfuerzo más alto (377 MPa), se puede apreciar en la Figura 1.a, la existencia de multiplicidad de inicios de grieta así como pequeñas zonas de propagación a lo largo del perímetro externo de la probeta, lo que trae como consecuencia múltiples frentes de crecimiento de grieta, que si bien ninguno en particular es responsable de la fractura, en conjunto estos abarcan mayoritariamente la superficie fracturada. En el estudio se observa también la región de transición y la amplia zona de despegue, evidencia típica del alto esfuerzo utilizado en el ensayo. Observando la zona de crecimiento de grieta principal ubicada en la parte inferior de la muestra se puede apreciar (Figura 1.b) el modo de propagación de grieta, el cual tiene un avance del

tipo transgranular. De acuerdo a la literatura especializada [Piñeiro, 2005] para aleaciones endurecibles por precipitación se esperaría en las primeras etapas de avance de grieta un avance del tipo intergranular debido a la presencia de las zonas libres de precipitado entorno de los límites de grano, el hecho de no encontrar este comportamiento pudiera sugerir que durante el proceso de estadía de las probetas en el reactor se puede haber eliminado la condición T6, por ende, se elimina la zona libre de precipitado y entonces la grieta avanza indistintamente entre o a través de los granos y por esto se presenta un avance del tipo transgranular. En la figura 1.c se puede ver con más claridad el punto de nucleación y la grieta principal.

Al estudiar el comportamiento del conjunto substrato+ZrN (Figura 1.d) podemos observar en los detalles 1.e y 1.f que existen numerosas grietas paralelas al plano de fractura y que su nucleación se produjo en la capa externa del recubrimiento o en la intercara con el substrato indistintamente.

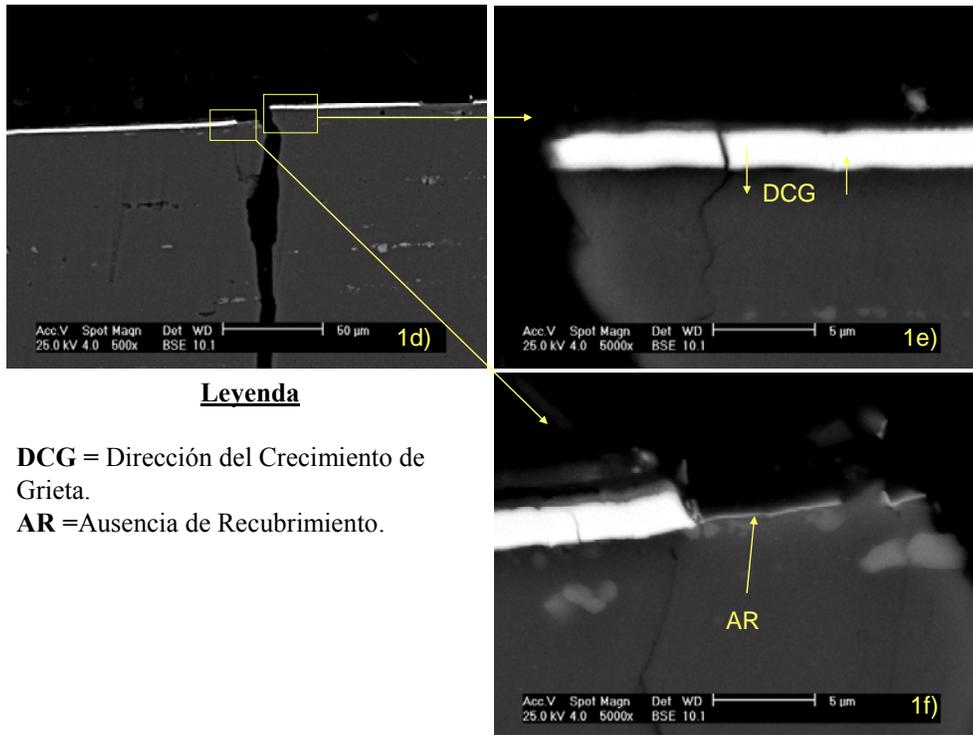
Para la muestra 2 correspondiente al nivel de esfuerzo más bajo ensayado al aire (169 MPa) también se pueden observar múltiples inicios de grietas, pero a diferencia de la muestra anterior, en la cual la zona de propagación no se extendía considerablemente en la superficie de fractura, la zona de propagación de esta muestra si lo hace, por consiguiente la zona de despegue es de menor tamaño. Al realizar un acercamiento sobre la zona de inicio de grieta (Figura 2.b y 2.c) se puede observar el lugar de nucleación y la propagación de las grietas transgranulares.

En las figuras 2.d y 2.e se percibe la existencia de un poro como consecuencia del desprendimiento de un nódulo originado durante el proceso de deposición y que dada su susceptibilidad al bombardeo iónico continuo que caracteriza a esta técnica de deposición el mismo se desprendió originando un agujero que actúa como concentrador de esfuerzos, justo al lado (figura 2.f) se puede apreciar con claridad una grieta nucleando en la intercara del substrato con el recubrimiento y dirigiéndose al exterior, comportamiento que por lo visto caracteriza los ensayos al aire, este comportamiento se puede atribuir a que si se supone un perfil de esfuerzos residuales homogéneos y se desprecia cualquier discontinuidad geométrica, el perfil de esfuerzo natural será casi idéntico entre la intercara y la cara externa del recubrimiento dado el delgado espesor del mismo ($\sim 1.6 \mu\text{m}$), tomando como cierto que la grieta se origina en el mayor acumulador de esfuerzos, éstas se nuclearán indistintamente en la intercara o en la superficie externa.



Leyenda

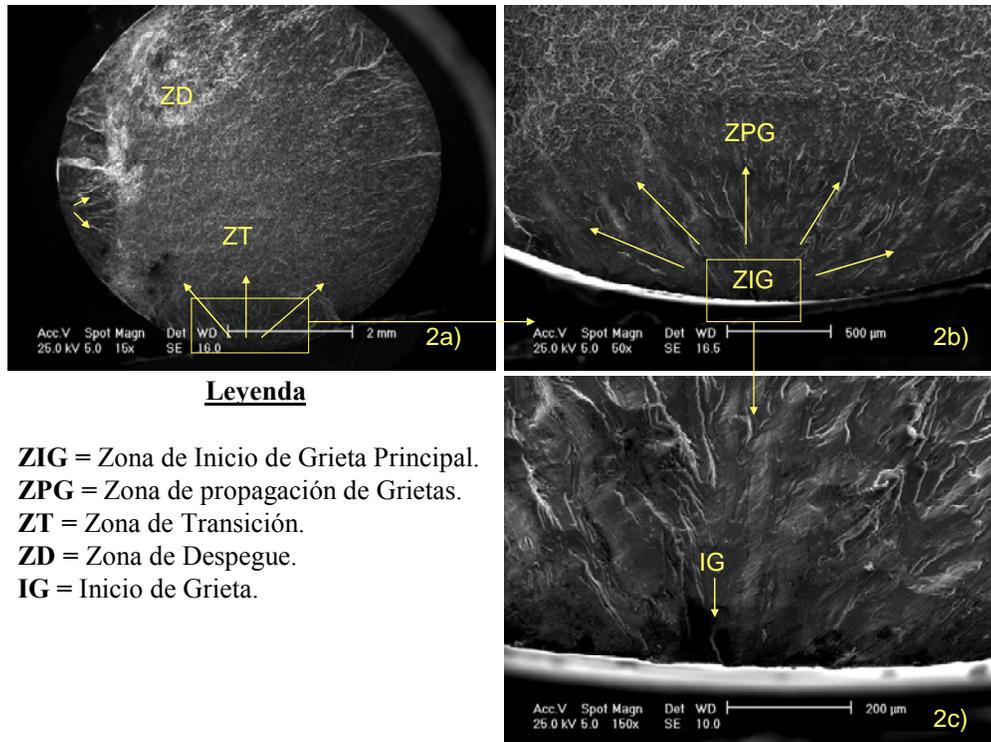
ZIG = Zona de Inicio de Grieta Principal.
ZPG = Zona de propagación de Grietas.
ZT = Zona de Transición.
ZD = Zona de Despegue.
IG = Inicio de Grieta.



Leyenda

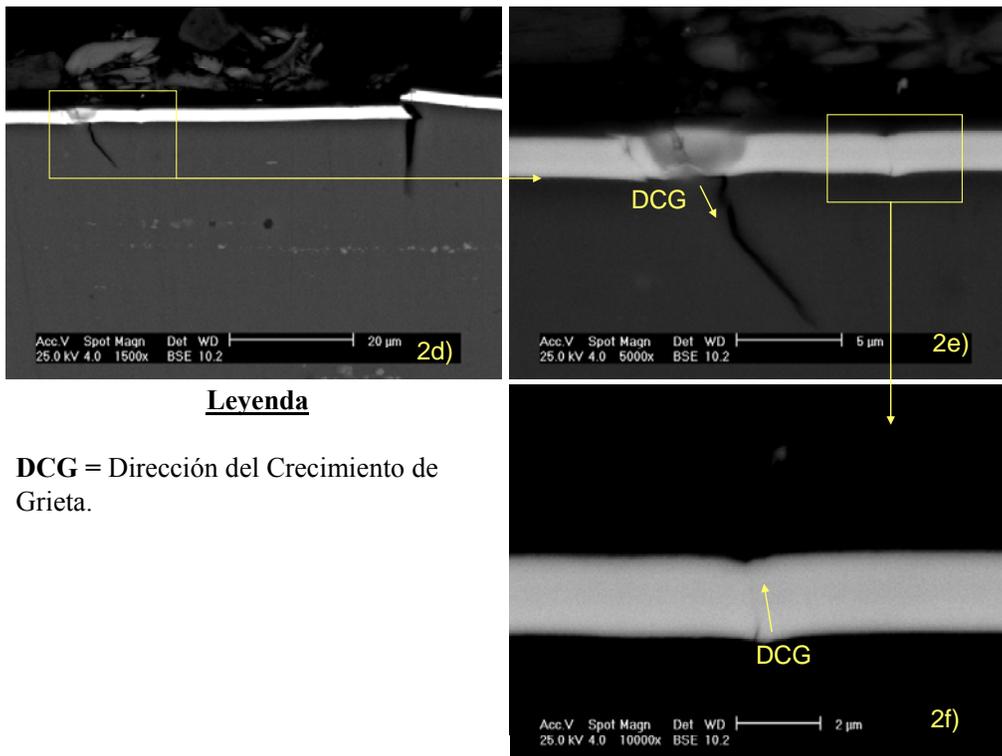
DCG = Dirección del Crecimiento de Grieta.
AR = Ausencia de Recubrimiento.

Figura 3.12 Probeta 1: Fatiga al Aire, $S=377$ MPa (Esfuerzo más alto).



Leyenda

ZIG = Zona de Inicio de Grieta Principal.
ZPG = Zona de propagación de Grietas.
ZT = Zona de Transición.
ZD = Zona de Despegue.
IG = Inicio de Grieta.



Leyenda

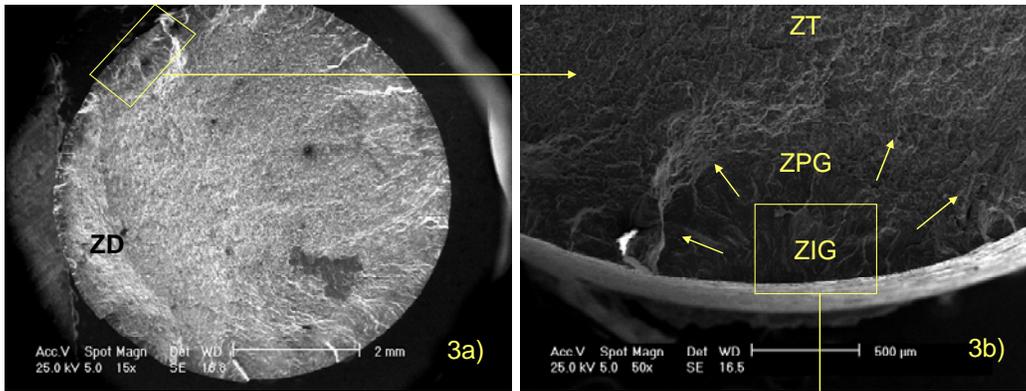
DCG = Dirección del Crecimiento de Grieta.

Figura 3.13 Probeta 2: Fatiga al Aire, S=169 MPa (Esfuerzo más bajo)

Realizando el estudio fractográfico de las muestras ensayadas en medio corrosivo se puede ver que para la muestra 3 correspondiente al nivel de esfuerzo más alto (323 MPa), prevalece la existencia de multiplicidad de inicios de grieta, también se puede apreciar que el comportamiento de la fractura es similar al de la probeta 1 ensayada al aire, es decir, no muy amplias zonas de propagación pero con una gran zona de despegue, características de ensayos con un alto nivel de esfuerzo y pocos ciclos a falla, contrario a este comportamiento es el de la probeta 4 correspondiente a la muestra ensayada al menor esfuerzo bajo ambiente corrosivo, cuyo comportamiento se asemeja al de la muestra 2 ensayada al aire a similar nivel de esfuerzo. Estudiando con detalle la zona de inicio de la grieta principal las figuras 3.b y 4.b muestran con claridad tanto la zona de propagación de grieta como la dirección de las mismas, también se evidencia que el modo de propagación de ambas es del tipo transgranular al igual que en las muestras anteriores.

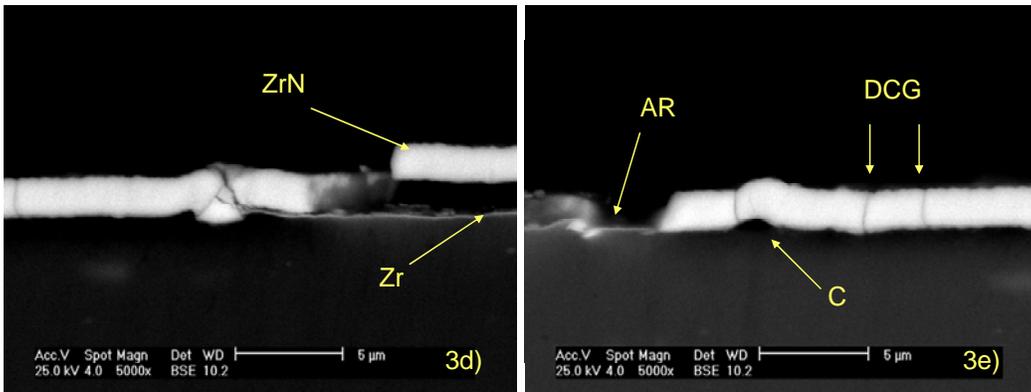
Si observamos el conjunto substrato+ZrN de las muestras 3 y 4 podemos observar con facilidad delaminación en algunas secciones del recubrimiento, quedando a menudo expuesta la capa de zirconio puro colocada para mejorar la adhesión del mismo; también se puede notar que a diferencia de las probetas ensayadas al aire en las cuales las grietas se nuclean indistintamente en la superficie del recubrimiento o la intercara con el substrato, en estas muestras las grietas observadas nucleaban sobre la superficie del recubrimiento, se atribuye este comportamiento al efecto del medio corrosivo que influye sobre el recubrimiento

corroyéndolo, despegándolo o creando picaduras que actúan como concentradores de esfuerzo que facilitan la nucleación de grietas en la cara externa dado que al ocurrir el contacto del agente corrosivo con el substrato una vez sorteada la protección del recubrimiento se produce una pila de aireación diferencial lo que provoca un aumento en la velocidad de propagación de grieta, esto se ve con más claridad en la muestra 4 dado que estuvo más tiempo bajo el efecto del ambiente corrosivo, en la figura 4.a se aprecia el crecimiento de dos grandes frentes de grieta casi paralelos que al encontrarse originan un marcado escalón de clivaje, en la figura 4.f se nota claramente el típico crecimiento columnar de la película de nitruro de zirconio en la cual no se observó ningún nódulo pero si se percibió delaminación en diferentes partes.



Legenda

ZIG = Zona de Inicio de Grieta Principal.
ZPG = Zona de propagación de Grietas.
ZT = Zona de Transición.
ZD = Zona de Despegue.
IG = Inicio de Grieta.



Legenda

DCG = Dirección del Crecimiento de Grieta.
AR = Ausencia de Recubrimiento.
GS = Grieta Secundaria.
C = Cavidad.

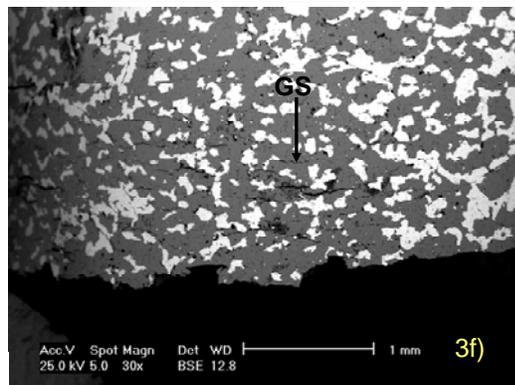
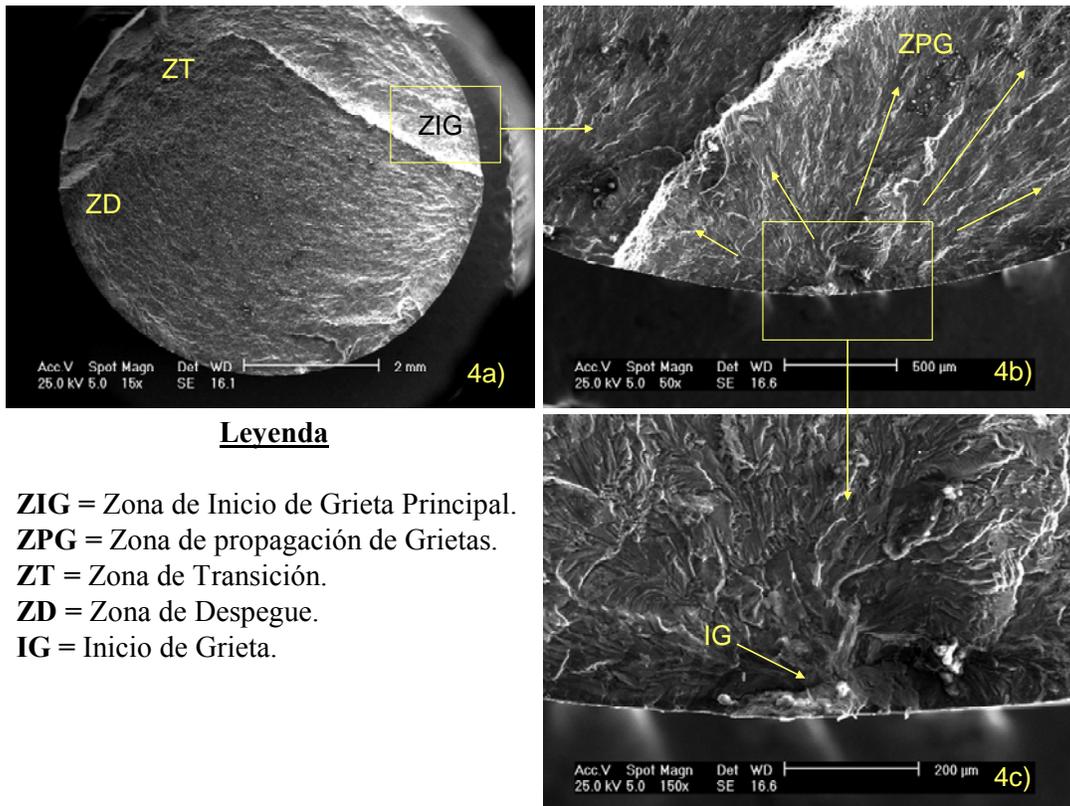
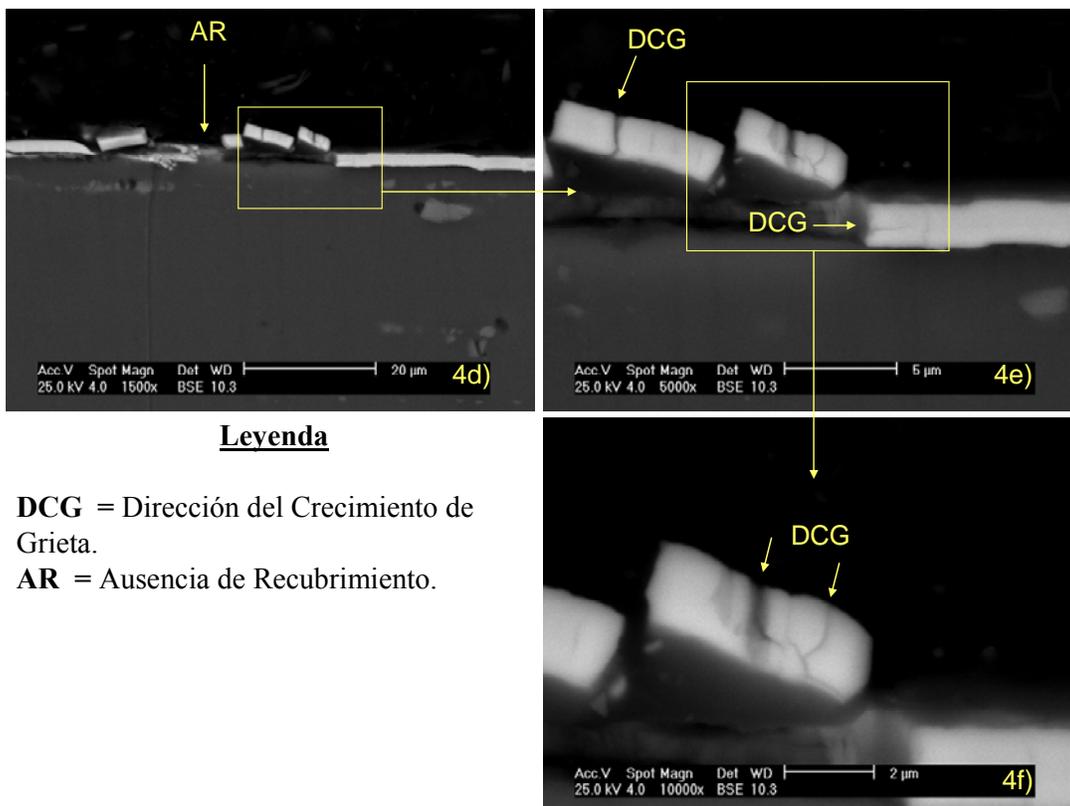


Figura 3.14 Probeta 3: Fatiga Corrosión, S=323 MPa (Esfuerzo más alto)



Levenda

ZIG = Zona de Inicio de Grieta Principal.
ZPG = Zona de propagación de Grietas.
ZT = Zona de Transición.
ZD = Zona de Despegue.
IG = Inicio de Grieta.



Levenda

DCG = Dirección del Crecimiento de Grieta.
AR = Ausencia de Recubrimiento.

Figura 3.15 Probeta 4: Fatiga Corrosión, S=169 MPa (Esfuerzo más bajo)

CONCLUSIONES

- Los resultados evidencian que la deposición del recubrimiento ha sido efectuada a una temperatura superior a los 120 °C, temperatura a la cual se realiza el envejecimiento de la aleación de aluminio 7075-T6. Esto ha traído como consecuencia un crecimiento de los precipitados existentes en el sustrato y por ende, una reducción en sus propiedades mecánicas.
- El cambio ocurrido en la microestructura (crecimiento de precipitados) ocasionó una disminución del orden del 60% en la resistencia a la tracción (σ_u) del material recubierto, con respecto a las propiedades del sustrato.
- La reducción de la vida a la fatiga para el material recubierto varió en un 98% para 269 MPa y un 160% para 377 MPa, mientras que para los ensayos de corrosión-fatiga varió en un 11% para 219 MPa y un 82% para 323 MPa.
- El comportamiento a la corrosión-fatiga del material recubierto para bajos niveles de esfuerzo es ligeramente superior al del sustrato, lo que indica una mejor respuesta a la corrosión del conjunto (sustrato-recubrimiento) para los referidos niveles de esfuerzos.

- Del estudio fractográfico se evidenció que en el material recubierto las grietas se propagan para los ensayos de fatiga al aire, indistintamente sobre la superficie del sustrato o en la intercara del recubrimiento y que para los ensayos de fatiga corrosión las grietas nuclean sobre la superficie externa del recubrimiento.
- Tanto en los ensayos de tracción como en los de fatiga se observó cierto desprendimiento del recubrimiento de ZrN del material base, evidenciando con esto problemas de adherencia.

RECOMENDACIONES

- Realizar un estudio similar en el que la temperatura del reactor durante la deposición del ZrN no alcance la temperatura de envejecido de la aleación, lo que se lograría con el empleo de un plasma frío (menor a 100 °C).
- Evaluar la adherencia entre el recubrimiento y el sustrato debido al desprendimiento que se observó en los ensayos de fatiga.
- Evaluar el perfil de esfuerzos residuales con la finalidad de determinar su influencia en el mecanismo de nucleación de grieta.
- Realizar el estudio del conjunto bajo otras modalidades de fatiga, como lo es la fatiga por flexión plana y fatiga por carga axial, de manera de poder evaluar las características del recubrimiento para otras condiciones de fatiga.
- Evaluar el comportamiento del recubrimiento de Nitruro de Zirconio sobre otros sustratos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ASM International 1996. *ASM Specialty Handbook: Aluminum and Aluminum Alloys*. J. R. Davies (Ed.), The Materials Information Society, Metals Park, USA.
2. BERRIOS J., M. H. STAIA., E. C. HERNÁNDEZ., H. HINTERMAN., E. S. PUCHI., *Surface & Coatings Technology*, V 108-109 (1998), p-p 466-472.
3. BERRIOS J., TEER D., PUCHI E. 2001. *Surface & Coatings Technology*, V 148; 179-190.
4. BERRÍOS J., TEER D., PUCHI E. Jornadas de Investigación JIFI 2002.
5. BERRÍOS J., LA BARBERA-SOSA J. G., TEER D. and PUCHI E., *Surface & Coatings Technology*, V 179 (2004), p-p 145-157.
6. DIETER G. 1986. *Mechanical Metallurgy*. Third edition, McGraw-Hill, Tokio, p-p 375-431.
7. FORREST P. 1962. *Fatiga de los Metales*. Urmo, Londres, p-p 72-152.
8. FORREST P. 1972. *Fatiga de los Metales*. Urmo, Bilbao.
9. HATCH, J. 1993 “Aluminum Properties and Physical Metallurgy” ASM Metals, Park Ohio.
10. IRAUSQUÍN I., 2003 Comportamiento a la Fatiga y Corrosión-Fatiga de la

Aleación de Aluminio 7075-T6 recubierta con TiN. Trabajo de grado, Escuela de Metalurgia y Ciencia de Materiales, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela (UCV). Tutor: Prof. E. Puchi.

11. PIÑEIRO A. 2005. Estudio del Comportamiento a la Fatiga al Aire y Fatiga Corrosión de una Aleación de Aluminio 6063-T6 Recubierta con un Depósito Autocatalítico de Ni-P, Escuela de Metalurgia y Ciencia de Materiales, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela (UCV). Tutor: Prof. E. Puchi.
12. PUCHI E., STAIA M. H., HINTERMANN H., PERTUZ A. and CHITTY J., *Thin Solid Films*, V 290-291 (1996), pp 370-375.
13. PUCHI E., 2002. *Surface & Coatings Technology*, 160; 177-186.
14. SHIGLEY, J. 2001. "Diseño en Ingeniería Mecánica" Mc Graw Hill Quinta Edición, México, p-p 302-344.
15. VAN HORN K. 1968. *Aluminum, Vol. II, Design and Application*. American Society for Metals (ASM), Metals Park, USA.
16. VAN HORN K. 1968. *Aluminum, Vol. III, Fabrication and Finishing*. American Society for Metals (ASM), Metals Park, USA.

REFERENCIAS WEB

17. www.suppliersonline.com
18. www.balzers.com
19. www.teercoatings.co.uk
20. www.fullspeedahead.com
21. www.interlocracing.com
22. www.rcdengineering.com
23. www.stockcarproducts.com
24. www.ofmega.com
25. www.nctcoating.com
26. www.lakesprecision.com