

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
Y ELÉCTRICA



ESTUDIO DE CORROSIÓN ASISTIDA POR ESFUERZO EN
ALEACIONES Y SUPERALEACIONES PARA APLICACIONES
AERONÁUTICAS

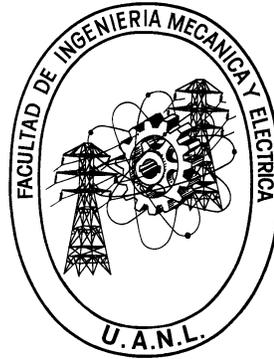
Por

ING. CATALINA JARAMILLO ISAZA

Como requisito parcial para obtener el grado de
MAESTRÍA EN INGENIERÍA AERONÁUTICA con especialidad
en MATERIALES AERONÁUTICOS

NOVIEMBRE, 2015

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
Y ELÉCTRICA



ESTUDIO DE CORROSIÓN ASISTIDA POR ESFUERZO EN
ALEACIONES Y SUPERALEACIONES PARA APLICACIONES
AERONÁUTICAS

Por

ING. CATALINA JARAMILLO ISAZA

Como requisito parcial para obtener el grado de
MAESTRÍA EN INGENIERÍA AERONÁUTICA CON MATERIALES
AERONÁUTICOS

NOVIEMBRE 2015

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA SUBDIRECCIÓN DE
ESTUDIOS DE POSGRADO

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis **“ESTUDIO DE CORROSIÓN ASISTIDA POR ESFUERZO EN ALEACIONES Y SUPERALEACIONES PARA APLICACIONES EN AERONÁUTICAS”**, realizada por la alumna Catalina Jaramillo Isaza, matrícula 1698158 sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ingeniería en Aeronáutica con orientación en Materiales aeronáuticos.

El comité de Tesis

Dra. Citlalli Gaona Tiburcio.

Director de Tesis

Dr.

Revisor

Dr.

Revisor

Vo. Bo.

Dr. Simón Martínez Martínez

Subdirección de Estudios de Postgrado

San Nicolás de los Garza, Ciudad Universitaria, Noviembre del 2015.

AGRADECIMIENTOS

DEDICATORIA

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN

CAPITULO I: INTRODUCCIÓN

Para la industria aeronáutica la corrosión siempre ha sido un problema importante en el mantenimiento de los aviones, incurriendo en altos gastos para el estudio y prevención de la formación de esta en algunos elementos indispensables para el servicio, lo cual puede conducir a la no disponibilidad de las aeronaves y en casos extremos, a una falla catastrófica [1]. El ataque puede tener lugar sobre una superficie entera, o se puede presentar en las rendijas de los ensambles, ocasionando un ataque localizado y generando picaduras profundas haciendo que los agentes corrosivos se puedan difundir en los límites de grano y provocando un ataque intergranular. Los esfuerzos externos o las cargas existentes en la estructura metálica en conjunto con el ambiente atmosférico, pueden provocar mecanismos de degradación que combinados ocasionan agrietamientos del material por tensión y fatiga [2].

Uno de los materiales más utilizados en las estructuras de los aviones comerciales y ultralivianos son las aleaciones de aluminio serie 6XXX, estas están compuestas por silicio y magnesio en proporciones tales para obtener silicato de magnesio, lo cual las hacen tratables térmicamente. La aleación de estudio para este estudio es el 6061-T6 a la cual se le realiza un tratamiento térmico de solución con envejecimiento artificial, para darle buena resistencia a la corrosión, buena formabilidad y buena capacidad para ser mecanizada [3]. Este material ha demostrado consistentemente la resistencia favorable a la corrosión debido que al reaccionar espontáneamente con el oxígeno forma en la superficie óxido de aluminio ($4Al + 3O_2 \rightarrow 2Al_2O_3$); aunque esta es una reacción degradante, la capa de óxido es tan delgada que tiene poco efecto en el material sin carga y tiende a entrar a un estado pasivo, sin embargo, cuando el material se somete a un esfuerzo, la capa de óxido protectora se deforma, ocasionando que el aluminio se empiece a oxidar. La capa de óxido de aluminio también es soluble en ciertos ambientes pero tiende a degradarse cuando se encuentran en ambientes salinos, ácidos o cáusticos.

Las superaleaciones base Níquel se utilizan generalmente en la cámara de combustión de las aeronaves, este tipo de material es el adecuado a las exigencias requeridas por la Aeronáutica Civil. Una de las propiedades que destacan de este tipo de material es retener la mayor parte de su resistencia, incluso después de largos tiempos de exposición por encima de $650\text{ }^\circ\text{C}$ ($1200\text{ }^\circ\text{F}$) [4]. Su versatilidad se debe al hecho de que combinan alta resistencia con buena ductilidad a baja temperatura y estabilidad superficial. En la cámara de combustión están sometidas a ambientes extremos, que al combinarse con los esfuerzos que tiene el avión, pueden presentar la aparición de fisuras de fatiga, de corrosión-fatiga o de SCC, y es necesario prever fallas en servicio [1]. El ataque puede tener lugar sobre una superficie entera, o se puede presentar en

las hendiduras de los ensambles, ocasionando un ataque localizado y generando picaduras profundas, haciendo que los agentes corrosivos se puedan difundir en los límites de grano y provocando un ataque intergranular. Los esfuerzos externos o las cargas existentes en la estructura metálica, en conjunto con el ambiente atmosférico, pueden provocar mecanismos de degradación que combinados ocasionan agrietamientos del material por tensión y fatiga.

La aleación Ti6Al4V es utilizada normalmente en la industria aeronáutica debido a sus buenas propiedades mecánicas, alta resistencia a la corrosión, baja densidad específica y elevado punto de fusión. Estas aleaciones tienen buen comportamiento principalmente en las partes de alta temperatura del turboreactor de los aviones, tales como las palas, álabes y cámaras de combustión, sin embargo esta resistencia se ve disminuida rápidamente cuando están expuestos a diversos esfuerzos y a vapor húmedo de la combustión, que en combinación con el medio en que se encuentre y al adherirse al material, disminuye sus propiedades mecánicas causando deterioro de las piezas y posibles accidentes.

Factores que influyen en la falla de un material como lo es el tipo de material, historia de fabricación, geometría del producto, mecanismo de agrietamiento activo y condiciones ambientales de servicio, pueden tener consecuencias importantes en la propiedades mecánicas y químicas del material ensayado y justo con estos factores se determinó decaimiento de los esfuerzos e se identificó el mecanismo de la corrosión desencadenada. Por esta razón, el estudio se enfatizó en colocar la aleación de aluminio 6061-T6, Una aleación base Níquel llamada Inconel 600 y la aleación de Ti6Al4V en cinco medios (H₂O, NaCl 5%, NaOH 5%, HCl 5%, H₂SO₄ 5%) se sometió a ensayos CERT (Constant Extension Rate Test) bajo la acción de un esfuerzo de tensión a bajas velocidades con el material inmerso en los medios anteriormente mencionados, A diferencia de lo encontrado en la literatura, se realizó en forma simultánea se empleó la técnica de ruido electroquímico (RE), con lo que se puede obtener mayor información respecto de la forma en que está ocurriendo el mecanismo de corrosión, y como se están entrelazando los procesos de corrosión y deformación del material

Hipotesis

Es posible que los materiales aeronáuticos Al6061-T6, Inconel 600 y Ti6Al4V tienen una composición química que las hace idóneas y les proporciona buena resistencia a la corrosión asistida por esfuerzo SCC, sin que afecte la integridad de las aeronaves.

Objetivo

Identificar los mecanismo de agrietamiento por SCC de las aleaciones Al6061-T6, Inconel 600 y Ti6Al4V y se evaluará el sistema microestructura/composición/medio, en el que cada aleación tenga mejor respuesta y resistencia a este tipo de corrosión para su aplicación en aeronáutica; estableciendo mejoras en la metodología de análisis e interpretación de datos. Empleando el ensayo CERT en conjunto con la técnica de Ruido Electroquímico.

Objetivos Específicos

1. Revisión de la Bibliográfica.
2. Selección de las tres aleaciones a estudiar
3. Caracterización de las tres aleaciones por medio de metalografía y difracción de rayos X y pruebas de tensión.
4. Adecuación y acoplamiento del equipo electroquímico con la CERT.
5. Selección medios corrosivos de estudio.
6. Diseño de matriz de experimentación
7. Realización de los ensayos mecánicos simultáneamente con ruido electroquímico.
8. Determinación del tipo de corrosión mediante el análisis de ruido electroquímico.
9. Determinación de las curvas Esfuerzos-Deformación del ensayo CERT
10. Análisis Fractográfico mediante Microscopia Electrónica de Barrido
11. Vinculación curvas Esfuerzo-Deformación con los patrones electroquímicos registrados.

CAPITULO II: MARCO TEORICO

1.1 ALEACIONES DE ALUMINIO.

1.1.1 Generalidades

En la industria aeronáutica se hace siempre referencia al aluminio porque está dentro de los metales más usados en la aviación, Gracias a este y a su aleaciones con otro metal aún más ligero, ha sido posible aumentar el tamaño de los aviones sin comprometer su peso. Por otra parte, esta reducción en el peso también ha hecho posible triplicar y cuadruplicar muchos sistemas importantes y, con ello, reducir la probabilidad de un fallo total de sistemas importantes para la aeronavegabilidad [4]. De ese modo, los fallos simples, e incluso los más complicados, no deberían causar incidencia reseñable en cuanto a la seguridad de vuelo.

Independientemente de los materiales que se utilicen, la estructura de un avión debe diseñarse para soportar ciertas cargas máximas. Las alas, por ejemplo, deben soportar cargas de aproximadamente tres veces el peso del avión y no se permiten deformaciones estructurales ni roturas. A pesar de la creciente utilización de materiales avanzados como los son los compuestos en las estructuras de los aviones, las aleaciones de aluminio siguen siendo la principal opción para el fuselaje, las alas y la estructura de soporte de los aviones comerciales, aviones privados y Microsatélites.

Las aleaciones de aluminio se dividen en dos categorías: Los forjados y los fundidos, en los cuales incluye diferentes procesos para tratarlos térmicamente como lo es el temple, el endurecimiento por precipitación y envejecido. Un gran número de otras composiciones forjadas dependen en cambio del endurecimiento por deformación, usualmente en combinación con varios procedimientos de recocido. Algunas aleaciones fundidas no son tratables térmicamente y son usadas sólo en la condición de colada o en condiciones modificadas térmicamente no relacionadas con los efectos de la precipitación o del tratamiento en solución[5]. Cada uno de estos procesos que les realiza a las aleaciones de aluminio tiene un clasificación según su estado:

F: Suministro. Es el material tal como sale del proceso de fabricación.

O: Recocido. Se aplica a materiales ya sea de forja como de fundición que han sufrido un recocido completo.

O1: Recocido a elevada temperatura y enfriamiento lento.

O2: Sometido a tratamiento termo mecánico.

O3: Homogeneizado. Esta designación se aplica a las bandas de colada continua, que son sometidos a un tratamiento de difusión a alta temperatura.

W: Solución tratada térmicamente. Se aplica a materiales que después de recibir un tratamiento térmico quedan con una estructura inestable y sufren envejecimiento natural.

H: Estado de Acritud. Viene con materiales a los que se ha realizado un endurecimiento por deformación.

H1. Endurecido por deformación hasta obtener el nivel deseado y sin tratamiento posterior.

H2. Endurecimiento en exceso por deformación y recocido parcial para recuperar suavidad sin perder ductilidad.

H3. Acritud y estabilizado.

H4. Acritud y lacado o pintado. Son aleaciones endurecidas en frío y que pueden sufrir un cierto recocido en el tratamiento de curado de la capa de pintura o laca dada.

T: Materiales que han sido endurecidos por tratamiento térmico con o sin endurecimiento por deformación posterior. Las designaciones de W y T solo se aplican a aleaciones de aluminio ya de forja o de fundición que sea termo tratables.

T1: Enfriado desde un proceso de fabricación realizado a una elevada temperatura y envejecido de forma natural.

T2: Enfriado desde un proceso de fabricación realizado a una alta temperatura, trabajado en frío y envejecido de forma natural.

T3: Solución tratada térmicamente, trabajada en frío y envejecida a temperatura ambiente hasta alcanzar una condición estable.

T4: Solución tratada térmicamente y envejecida a temperatura ambiente hasta alcanzar una condición estable. Es un tratamiento similar a T3 pero sin el trabajo en frío.

T5: Enfriado desde un proceso de fabricación a alta temperatura y envejecida artificialmente.

T6: Solución tratada térmicamente y envejecida artificialmente. Son designados de esta forma los productos que después de un proceso de conformado a alta temperatura (moldeo o extrusión) no son endurecidos en frío sino que sufren un envejecimiento artificial.

T7: Solución tratada térmicamente y sobre envejecida para su completa estabilización.

T8: Térmicamente tratada por disolución, trabajada en frío y envejecida artificialmente.

T9: Solución tratada térmicamente, envejecida artificialmente y trabajada en frío.

T10: Enfriado desde un proceso de fabricación realizado a una elevada temperatura, trabajado en frío y envejecido artificialmente hasta una condición sustancialmente estable [6].

1.1.2 Clasificación de las aleaciones de aluminio.

La Asociación del Aluminio estadounidense (The Aluminum Association) en 1954, desarrollo un sistema de identificación que emplea diferentes nomenclaturas para aleaciones fundidas y forjadas, pero agrupa las aleaciones en familias para mayor simplicidad. Se emplea una numeración de cuatro dígitos, como podemos observar en la Figura 1. El primero es un número correlativo que indica el grupo de aleación, haciendo referencia al principal elemento aleante de la serie, mientras que el segundo indica cualquier cambio 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. Los dos últimos dígitos para la serie 1xxx son decimales en el porcentaje de aluminio, por encima del porcentaje mínimo (99%). En las series restantes los últimos dos dígitos identifican las diferentes aleaciones[7].

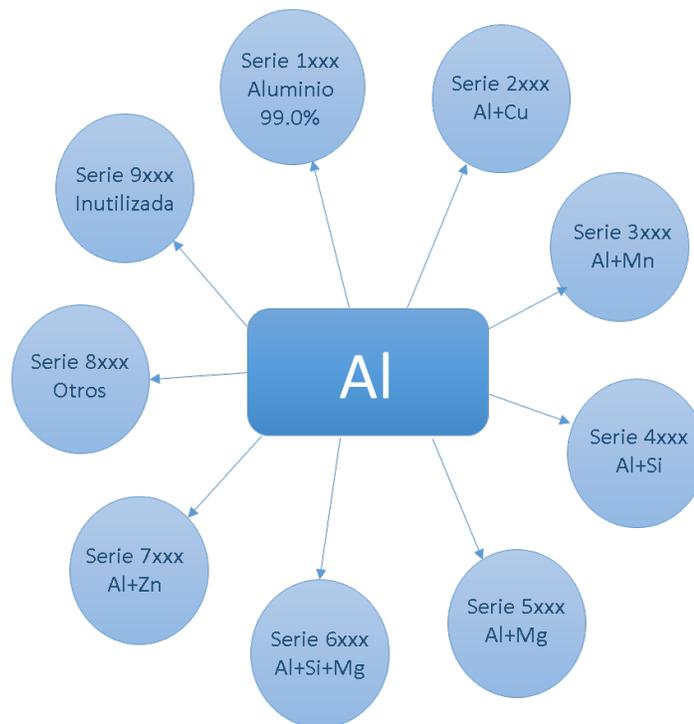


Figura 1. Series de Aluminio según su aleantes.

Aleaciones Aluminio-Cobre (Serie 2XXX)

Las características principales de esta aleación es la buena compatibilidad de las dos propiedades dureza-peso, para poder mejorar sus propiedades mecánicas este material debe estar sometido a tratamiento térmico solubilidad y envejecimiento. Estas aleaciones son generalmente galvanizadas con aluminio de lata pureza para protegerlas de la corrosión y que no se produzca corrosión intergranular. Los usos más frecuentes son en las ruedas de los camiones y aviones, en las suspensiones, fuselaje de aviones, en estructuras que requieran buena dureza a temperatura superiores de 150°C, tiene escasa propiedad de soldabilidad y muy buena maquinabilidad. El cobre en esta aleación es muy poco soluble en el aluminio (0.2% a temperatura ambiente y 5.7% a 548°C) y forma con el aluminio el compuesto intermetálico Al_2Cu producto de una reacción eutéctica. Facilita la colabilidad y desgasificación, disminuyendo la resistencia a la corrosión [7,8].

Aleaciones Aluminio-Manganeso (Serie 3XXX)

Esta aleación tiene 20% más de dureza que el aluminio puro , esto es debido que la adición del Manganeso solo es efectiva en 1.5% por lo que hay poca aleaciones de esta serie, pero este aditivo hace que tenga excelente resistencia a la corrosión. Esta aleación es utilizada en utensilios que requieran dureza media como lo son botellas para bebidas, utensilios de cocina, intercambiadores de calor, mobiliario, señales de tráfico, tejados y otras aplicaciones arquitectónicas.

Aleaciones Aluminio-Silicio (Serie 4XXX)

En este tipo de aleaciones el Si se añade en pocas cantidades para conseguir reducir el rango de fusión de la aleación, el objetivo de esto es conseguir un material que funda a bajas temperaturas para ser utilizado como soldadura, se utiliza para soldar otros materiales que son tratables térmicamente Las aleaciones Al-Si son muy dúctiles y resistentes al choque; tienen un bajo coeficiente de dilatación y una elevada conductividad calorífica y eléctrica, pero son difíciles de mecanizar por la naturaleza abrasiva del silicio. Su peso específico es alrededor del 2,7 gr/m³. La principal aplicación de las aleaciones aluminio-Silicio son la fundición de piezas de difícil geometría y la fabricación de piezas para la industria marítima, por su buena resistencia a la corrosión. Pero no se emplean para piezas ornamentales porque cambian sus propiedades físicas con el tiempo. [6,7]

Aleaciones Aluminio-Magnesio (Serie 5XXX)

El magnesio es un elemento de muy baja densidad, que la fusionarse con el aluminio resultan más ligeras que éste. Se disuelve sólo parcialmente (17.4% a 450°C) y forma el compuesto intermetálico Al_2Mg_3 . Facilita la colabilidad, mejora las propiedades mecánicas. Las principales características de estas aleaciones son una alta dureza por endurecimiento por deformación, buena soldabilidad, buena resistencia a la corrosión en ambiente marino y una baja capacidad de trabajo en frío. Estas características hacen que esta aleación se usen para adornos decorativos, ornamentales, arquitectónicos, exterior de botes, barcos y tanques criogénicos, partes de puentes grúa y estructuras de automóviles. [6]

Aleaciones Aluminio-Silicio-Magnesio (Serie 6XXX)

En esta aleación la adición de Mg y Si en proporciones adecuadas para la formación de Mg_2Si , haciendo que sea tratable térmicamente. Estas aleaciones son menos resistentes que el resto de las aleaciones pero en comparación con las demás es superior en formabilidad, soldabilidad, maquinabilidad y tiene excelente resistencia a la corrosión. Las propiedades mecánicas pueden moderarse con un tratamiento térmico T4 o T6. Es usado en todo el mundo para los moldes de inyección y soplado, construcción de estructuras de aeronaves, como las alas y el fuselaje de aviones comerciales y de uso militar; en refacciones industriales, en la construcción de yates, incluidos pequeñas embarcaciones, en piezas de automóviles, en la manufactura de latas de aluminio para el empaquetado de comida y bebidas. [7,9]

Aleaciones Aluminio-Zinc (Serie 7XXX)

El zinc es más soluble que el cobre y forma con el aluminio el compuesto intermetálico (Al_2Zn_3) que las hace más frágiles. Facilita la colabilidad y desgasificación mejorando mucho las propiedades mecánicas, disminuyendo la resistencia a la corrosión; aumenta la dureza en frío. A veces se añaden pequeñas cantidades de Mg para hacer la aleación tratable térmicamente, debido a que la principal propiedad de estas aleaciones es su alta dureza se suele usar en las estructuras de los aviones, equipos móviles y otras partes altamente forzadas.[9,10]

1.1.3 Aleación 6061-T6

La Aleación de aluminio 6061 es una aleación de aluminio que contiene aleantes como Mg y Si, es considerada una aleación dúctil y ligera, tiene buena resistencia y excelente acabado. Posee excelente resistencia a la corrosión, tiene buenas

propiedades de tensión parecida a la del acero y además facilidad de soldadura. Tiene un tratamiento térmico por solución y un envejecido artificial para aumentar sus propiedades mecánicas.

Su composición química es estandarizada por diversas especificaciones de fabricación para obtener una mayor eficiencia del material dependiendo el requerimiento, en la Tabla 1 se muestra la composición del Al6061-T6.

COMPOSICIÓN QUÍMICA Al6061-T6 (% peso)							
<i>Al</i>	<i>Si</i>	<i>Mg</i>	<i>Cu</i>	<i>Fe</i>	<i>Cr</i>	<i>Zn</i>	<i>Ti</i>
<i>(Balanceado)</i>	<i>0.040-0.80</i>	<i>0.8-1.2</i>	<i>0.15-0.40</i>	<i>0.7 máx.</i>	<i>0.04-0.35</i>	<i>0.25 máx.</i>	<i>0.015</i>

Tabla 1. Composición química estandarizada del Al6061-T6

Las propiedades mecánicas del material en suministro tiene las siguientes características, como se muestra en la Tabla 2.

<i>Aleación</i>	<i>Tensión</i>				<i>Dureza</i>	<i>Corte</i>	<i>Modulo</i>
	<i>Resistencia (MPa)</i>		<i>Elongación en 50.8 mm</i>		<i>Brinell</i>	<i>Ultimo de corte</i>	<i>Módulo de Elasticidad MPaX10³</i>
	<i>Ultimo</i>	<i>Cedencia</i>	<i>1.58 mm de espesor</i>	<i>12.7 mm de Diámetro</i>	<i>500kg Bola de 10mm</i>	<i>Resistencia MPa</i>	
6061-T6	310	276	12	17	95	206.84	68.95

Tabla 2. Propiedades Mecánicas Al6061-T6

Los usos más frecuentes son en los componentes de chapa conformada y/o soldada, piezas mecánicas, moldes en la industria del plástico, camiones ,torres, canoas, vagones, muebles, cañerías, estructuras de las alas de los aviones, fuselaje de avión y otras aplicaciones estructurales donde se requiera soldabilidad y resistencia a la corrosión y mecánica.



Figura 2. Estructura ala de avión.

1.2 SUPERALEACIONES BASE NIQUEL

1.2.1 Generalidades

En la industria aeronáutica y aeroespacial ha venido realizando avances tecnológicos significativos en el desarrollo de materiales para motores de aeroplanos, dirigibles y componentes de generación de energía, uno de esos logros es el avance de la metalurgia con respecto a las superaleaciones base níquel, incrementando aleantes de tipo refractario u otros aleantes como lo son Al, Ti y Cr para incrementar propiedades mecánicas a altas temperaturas y resistencia a la corrosión.

Las superaleaciones constan de dos o más fases cristalinas. En el caso de las superaleaciones base níquel son las fases γ y γ' y presentan un buen comportamiento hasta los 1000 °C aproximadamente. Para temperaturas mayores se suelen emplear superaleaciones de cobalto. Hay dos tipos de formación de grano la monocristalina y la policristalina, las cuales contienen elementos de fortalecimiento de frontera de límite de grano como el Br, Re y Zr haciendo que tenga mayor resistencia a la fluencia y ductilidad.

En términos generales, las superaleación base níquel se pueden clasificar por el tipo de elementos que contengan de la siguiente manera: [11]

- **Formadores γ :** Estos son elementos generalmente del grupo V, VI, VII, y elementos tales como Co, Cr, Mo, W y Fe. Los diámetros atómicos de estos elementos son del 3-13% diferente al níquel.
- **Formadores γ' :** Son elementos que vienen del grupo III, IV, V, y elementos tales como Al, Ti, V, Nb, Ta y Hf. Los diámetros atómicos de estos elementos difieren del níquel por 6.18%. En resumen, los elementos como el Co, Fe, Cr, Nb, Ta, Hf, Mo, W, V, Ti y Al son solución sólida reforzantes, tanto en γ y γ' .

- **Formadores de carburo:** Estos elementos son principalmente C, Cr, Mo, W, Nb, Ta y Ti. Los carburos tienden a precipitar en los límites de grano, y por lo tanto, reducen la tendencia de deslizamiento del límite de grano.
- **Elementos que separan a los límites de grano:** Los elementos principales que separan a los límites de grano son B, C, y Zr. Sus diámetros atómicos son 21-27% diferentes que las de Ni.

Las características más importantes que tiene las superaleaciones base níquel y las que las hacen que sean superiores a cualquier otro material aleado son:

- Buena resistencia mecánica a la tensión a temperaturas elevadas.
- Excelente resistencia a la corrosión y a la oxidación en caliente.
- Buena resistencia a fatiga térmica con alto y bajo número de ciclos.
- Son rígidas y resisten la deformación.
- Presentan una gran dureza.
- Alta resistencia a las vibraciones.
- Alta conductividad eléctrica y propiedades magnéticas.

1.2.2 Solidificación direccional para superaleaciones.

El concepto de solidificación direccional se inició con los trabajos realizados, en 1960, por técnicos de General Electric. Con ellos demostraron que la resistencia a la termofluencia de ciertas superaleaciones de níquel puede aumentar drásticamente si en el momento de la obtención de estas aleaciones, se opera de modo que los límites de los granos se orienten paralelamente a un esfuerzo aplicado uniaxialmente, tal como sería el caso de la fuerza centrífuga existente en los alabes de una turbina debido a la elevada velocidad de rotación.

En 1967, en la empresa aeronáutica Pratt & Whitney Aircraft, se demostró que la resistencia a la tensión de las superaleaciones de níquel aumentaba cuando no desaparecían los límites de grano como ocurre en un monocristal y esta se orientaba según la dirección de la fuerza aplicada. Estos descubrimientos sirvieron para que Pratt & Whitney desarrollara nuevas técnicas para producir alabes de turbinas con notables propiedades, ya que entonces un alabe convencional de turbina se fabricaba colando el metal fundido dentro de un molde cerámico (que se ha precalentado a una temperatura próxima a la mitad de su punto de fusión) y dejándolo solidificar. El metal líquido empieza a cristalizar en las zonas en contacto con el molde; el resultado final es una fina textura policristalina con pequeños granos individuales orientados al azar.

Un procedimiento similar al descrito produce alabes sin límites de grano (monocristalino). Un alabe que sea monocristalino se fabrica colando el metal líquido en un molde que tiene un cuello de botella de forma espiral entre el plato

frío y la parte superior del molde. Al sacar el molde de la campana aislante, empiezan a formarse cristales columnares, debido a que el cuello de botella sólo permite que uno de estos cristales lo cruce. En la parte superior del cuello, donde el molde se agranda, el cristal dilata su diámetro, por lo que sólo crece un cristal en el molde; así, el alabe final (que se forma en la parte superior del molde) será monocristalino.[11]

Con el procedimiento anterior podemos formar diferentes tipos de alabes que cumplan con los requisitos específicos de servicio, en la Figura 3 podemos observar tres tipos de alabes diferentes según su formación de grano.

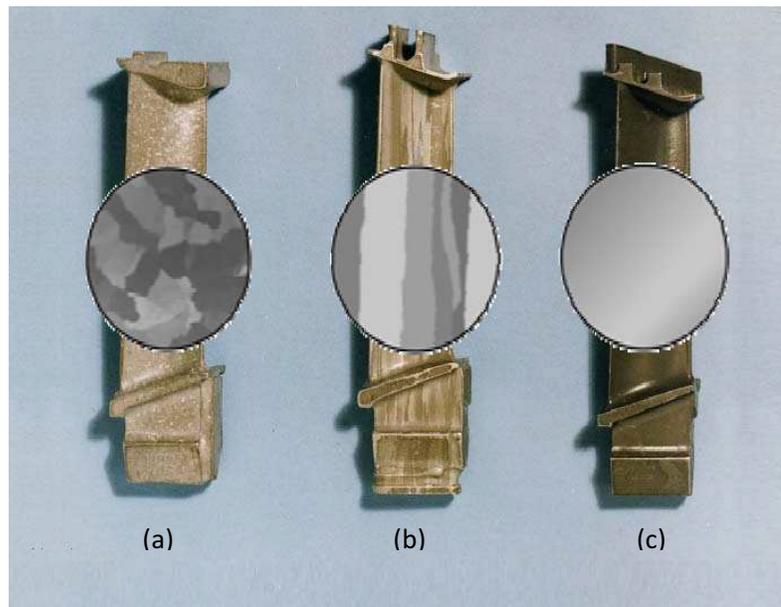


Figura 3. a) Proceso convencional policristalino b) Proceso policristalino de granos columnares c) Proceso monocristalino.[12]

1.2.3 Clasificación de Superalaciones base Níquel.

Como ya habíamos mencionado antes el Níquel se le puede añadir una gran cantidad de elementos aleantes para producir una extensa variedad de aleaciones, las cuales se diseñaron para aplicaciones específicas como lo es la resistencia a la corrosión y la resistencia de sus propiedades mecánicas a altas temperaturas. Las aleaciones resultante del Ni puro mantienen su microestructura cubica centrada en las caras (FCC), γ o austenítica

La primera aleación de Ni fue la Ni-Cu o Monel que se introdujo al mercado en 1905, la segunda aleación que se produce es Ni-Mo o también llamada Hastelloy

B el cual se desarrolló en 1920. En 1930 se introdujo como producto fundido Hastelloy C o Ni-Cr-Mo, La versión forjada del Hastelloy C el C-266 se desarrolla pensando en reducir las impurezas que genera el proceso de fundición. En 1931 se creó el Inconel 600 o aleación de Ni-Cr-Fe inicialmente para la industria láctea y en los años 60's se mejoró para la industria aeronáutica y nuclear. Entre los años 40's y 50's se desarrollaron el Nimonic 80 y el Incolloy 800 debido a las demandas de la aeronáutica para obtener un material que resista grandes temperaturas sin modificar sus propiedades mecánicas.[12,13]

Un representación gráfica de cómo se clasifican y como se desarrollaron las superaleaciones base Niquela partir del Ni puro o Ni-200 se muestra en la Figura 4.

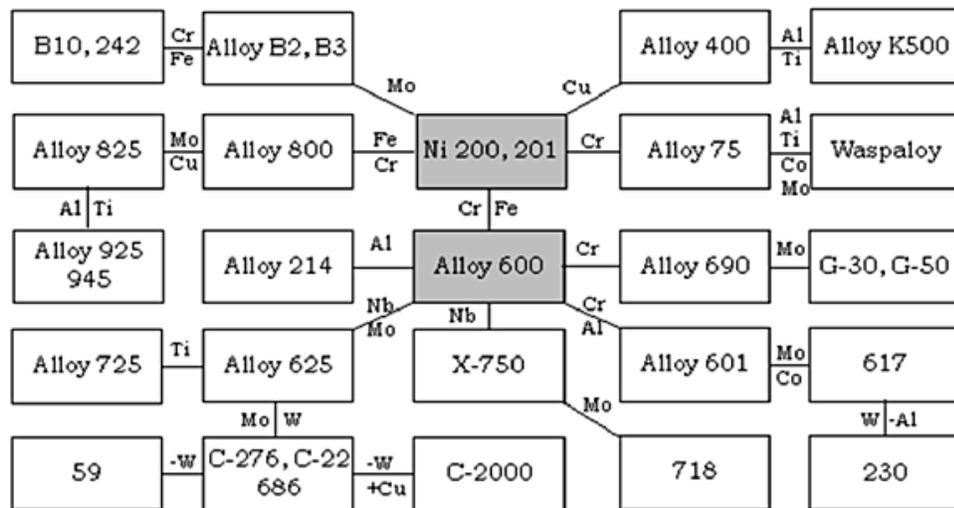


Figura 4. Clasificación y desarrollo de las superaleaciones base Níquel[12].

Níquel Puro o Ni-200

Este material se utiliza generalmente para ambientes cáusticos a temperaturas por encima de los 200°C haciéndolo que su resistencia a la corrosión sea excelente. Este material también se utiliza en aplicaciones atmosféricas tanto en ambientes industriales como marinos donde se pasiva desarrollando una capa protectora. Es susceptible a corrosión cuando está sometido a ambientes ácidos con temperaturas elevadas causando que se incremente la velocidad a la corrosión y sufre también a susceptibilidad a fragilización por hidrogeno bajo ciertas condiciones específicas.[14]

Aleaciones Níquel-Cromo (Ni-Cr)

Este tipo de aleaciones se utilizan ampliamente en industria química y marítimas. Son altamente resistente a la corrosión en ambiente ácidos especialmente con el ácido sulfúrico y ácido clorhídrico a temperaturas cercanas al ambiente.[15] Puede sufrir grandes fracturas intergranularmente cuando es sometido a ácido fluorhídrico. Son susceptibles a corrosión asistida por esfuerzo (SCC) en soluciones acidas que contienen sales de mercurio.[16]

Aleaciones Níquel-Molibdeno (Ni-Mo)

Este tipo de aleaciones fueron diseñadas para manejar ácidos reductores calientes como lo es el ácido clorhídrico en todas las concentraciones y temperaturas, esto es debido que la adición del Mo retarda la reacción catódica de evolución del hidrogeno y por lo tanto la reacción de la oxidación es notablemente baja. Estas aleaciones Níquel-Molibdeno o también llamadas aleaciones tipo B no se recomienda para ser utilizadas con ácido nítrico ni con ácidos reductores contaminados con iones metálicos como lo es el ácido cúprico y férrico. Como este tipo de aleación no forma la capa pasiva en la superficie no son susceptible al a clásica corrosión por picadura, pero cuando están acoplados localmente con un material pasivo o grafito ocasionando corrosión galvánica. [12]

Cuando esta aleación es sometida a temperaturas por encima de 550°C hasta 850°C pierde ductilidad debido a una transformación de fase solida con fases intermetálicas ordenadas de NiMo₄. Según estudios se comprobó que algunas aleaciones de Níquel-Molibdeno sufrieron daño por corrosión asistida por refuerzo con fracturas intergranulares cuando están sometidos a soldadura y a temperaturas de 120°C que contenían zonas expuestas a ácido sulfúrico. [17]

Aleaciones Níquel-Cromo-Molibdeno (Ni-Cr-Mo).

Las aleaciones de Níquel-Cromo-Molibdeno forman una de las familias más grandes y fueron diseñadas para contener sus aleantes en su máxima concentración posible. El Níquel permite que aumente la resistencia a la corrosión en soluciones causticas y a la fisuración en cloruros, el Molibdeno se añade para dar una reducción en la velocidad de corrosión en medios ácidos reductores calientes y el Cromo ofrece protección contra la oxidación en sales o ácidos oxidantes con iones metálicos. Este tipo de aleaciones le brindan al material una excelente resistencia a la corrosión localizada o corrosión en rendijas.

Las Aleaciones Ni-Cr-Mo como lo es el Hastelloy son ampliamente utilizadas en la industria farmacéutica y química para la construcción de componente múltiples para ser utilizados con diferentes medios y temperaturas, como intercambiadores de calor, evaporadores y tubería de transferencia.

Aleaciones Níquel-Cromo-Hierro (Ni-Cr-Fe)

Las aleaciones Níquel-Hierro-Cromo son un grupo grande y diverso de materiales incluyendo el material más popular el Inconel 600, este tiene una gran variedad de aleantes el cual mejoran sus propiedades para fines en específicos. El Inconel 600 es uno de los más vendidos en el mundo ya que se utiliza ampliamente en la industria alimenticia, química, nuclear y aeroespacial. Algunos de sus materiales tienen buena resistencia a la corrosión cuando está sumergido en ácido nítrico debido que al contener cromo este ocasiona que se forme una capa protectora de óxido de cromo en la superficie.

Este tipo de aleaciones tienden a sufrir corrosión asistida por esfuerzo en agua y en ambientes cáusticos a altas temperaturas tanto en servicio de reactores como en el laboratorio, por lo cual ha sido material de investigación por décadas[18]. La susceptibilidad a la fragilización ambiental de estas aleaciones depende de gran medida de factores como la temperatura, nivel de esfuerzo ejercido, velocidad de deformación, presencia de hidrogeno, ph de la solución, potencial electroquímico y factores metalúrgicos.

1.2.4 Inconel 600 (Aleación Ni-Cr-Fe)

La superaleación Inconel 600 es una aleación de níquel-cromo-Hierro usada para aplicaciones que requieren resistencia a la corrosión y a altas temperaturas, fue diseñada para ser usada desde temperaturas criogénicas hasta temperaturas elevadas en el rango de 1093 °C. No es magnética, tiene excelentes propiedades mecánicas, y muestra una combinación deseable de alta resistencia a la tensión y buena soldabilidad bajo un amplio rango de temperaturas. El alto contenido de níquel en el Inconel 600 le permite mantener la resistencia bajo condiciones de reducción, haciéndolo resistente a la corrosión en muchos componentes orgánicos e inorgánicos, tiene una resistencia excelente al agrietamiento intergranular causado por la corrosión asistida por esfuerzo y también provee una excelente resistencia a soluciones alcalinas

La composición típica de esta aleación se muestra en la Tabla 3

COMPOSICIÓN QUÍMICA Inconel 600 (% peso)							
<i>Ni + Co</i>	<i>Cr</i>	<i>Fe</i>	<i>C</i>	<i>Mn</i>	<i>S</i>	<i>Si</i>	<i>Cu</i>
<i>(Balanceado)</i>	<i>14-17</i>	<i>6-10</i>	<i>0.15 máx.</i>	<i>1 máx.</i>	<i>0.015 máx.</i>	<i>0.5 máx.</i>	<i>0.5 máx.</i>

Tabla 3. Composición química comercial Inconel 600

Las propiedades mecánicas del material en suministro tiene las siguientes características, como se muestra en la Tabla 4.

Aleación	Tensión		Dureza		Modulo
	<i>Resistencia (MPa)</i>		<i>Elongación (%)</i>	<i>Brinell</i>	<i>Módulo de Elasticidad GPa</i>
	<i>Ultimo</i>	<i>Cedencia</i>	<i>12.7 mm de Diámetro</i>	<i>500kg Bola de 10mm</i>	
Inconel 600	620	270	25	130	275

Tabla 4. Propiedades Mecánicas Inconel 600.

Las aplicaciones de esta aleación de níquel son típicamente Industria aeroespacial, Industrias de tratamientos térmicos, procesamiento de alimentos, ingeniería nuclear.



Figura 5. Disco con alabe incorporado construido con Inconel 600.

1.3 Aleaciones de Titanio

1.3.1 Generalidades

Generalmente el Titanio puro es el cuarto metal estructural más abundante después del aluminio, hierro y magnesio, se conoce desde hace aproximadamente 200 años. Sin embargo, la producción de titanio no comenzó hasta que el año 1950 por la dificultad que conllevaba extraerlo de forma pura, es considerado como un metal no ferroso ligero de la era espacial.

El titanio experimenta transformaciones alotrópicas a temperaturas elevadas y presión atmosférica. Este fenómeno de la alotropía, se debe a que los átomos que forman las moléculas, se agrupan de distintas maneras, provocando características físicas diferentes. Este material sin alear tiene una estructura hexagonal compacta (fase α), que a los 885 °C cambia a una estructura cúbica (fase β) centrada en el cuerpo, que se mantiene hasta la temperatura de fusión.

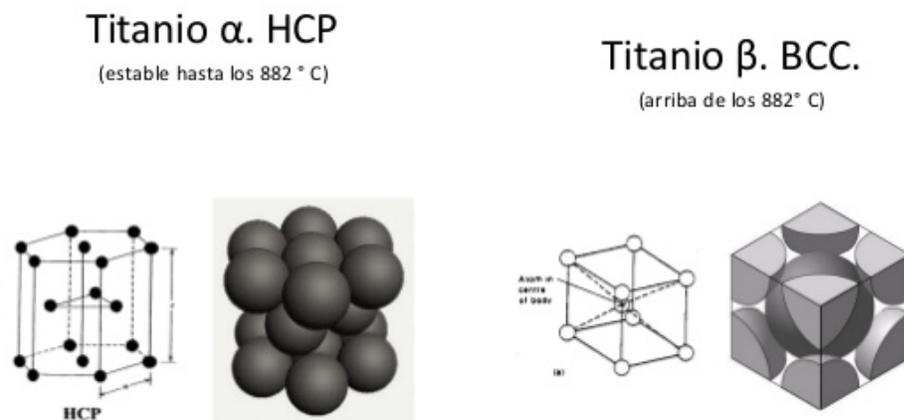


Figura 6. Variedades alotrópicas del Titanio

Este tiene una excelente resistencia a la corrosión tanto en ambientes salinos como en contacto con soluciones acidas, Debido a que se cubre de una finísima película de óxido a la temperatura ambiente, cuando hay presencia de oxígeno. Esta característica la comparte con el aluminio, si bien la protección que proporciona la película protectora del titanio es muy superior a la del aluminio. A altas temperaturas, la reactividad del titanio aumenta muchísimo. Por encima de los 649°C, la resistencia a la oxidación decrece rápidamente y tanto el titanio como sus aleaciones deben protegerse del aire debido a su posible combinación con el oxígeno. La presencia de este elemento y del nitrógeno del aire fragiliza el metal.[19]

El titanio puro es muy dúctil y su resistencia a la tensión es relativamente baja. Se puede elevar su resistencia, pero con el riesgo de disminuir su plasticidad, disolviendo otros elementos en la red del titanio. El oxígeno y el nitrógeno, cuando están disueltos en el titanio, proporcionan una mayor resistencia, lo que no ocurre cuando se hallan en forma de óxidos.

1.3.2 Clasificación de las aleaciones de Titanio

Gracias a la transformación alotrópica del titanio existe la posibilidad de obtener aleaciones con microestructuras de tipo α , β o α/β , dependiendo de los elementos aleantes que estabilizan una u otra fase.

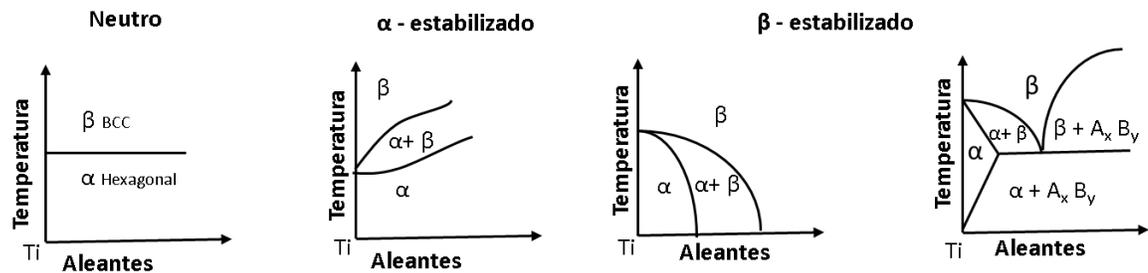


Figura 7. Diagrama de equilibrio del titanio.

Como se puede observar en la Figura 7 el principal efecto de los elementos de aleación en las aleaciones de titanio, es la modificación de la temperatura de transformación. De esta manera, los elementos de aleación se clasifican en: α – estabilizadores, que elevan la temperatura de transformación y β estabilizadores que hacen que descienda. Comercial y técnicamente existen muchas aleaciones de titanio. La ASTM (American Society for Testing and Materials) clasifica estas aleaciones basándose en la presencia de las fases α y β , quedando de la siguiente manera: Titanio de alta pureza, Aleaciones de titanio α , Aleaciones de titanio $\alpha+\beta$ y Aleaciones de titanio β .

1.3.1 Titanio de alta pureza:

El titanio de alta pureza tiene una composición superior al 99% de titanio y está disponible en varios grados (1,2,3,4 y 7) en función del contenido de impurezas que tengan, como el carbono, hidrogeno, hierro, nitrógeno y oxígeno, los cuales influyen sobre la resistencia mecánica y la tenacidad del metal. A mayor cantidad de intersticiales el grado aumenta, es decir el grado 1 es el más puro y el grado

4 el que contiene mayor cantidad de impurezas y el que presenta valores más altos de resistencia mecánica.

1.3.2 Aleaciones de titanio α

Las aleaciones totalmente α contienen 5% de Al (α –estabilizador) y 2.5% de Sn (Neutro), ambos endurecedores por solución. Estas aleaciones tienen una adecuada resistencia a la corrosión, mantienen su resistencia mecánica a temperaturas elevadas, tienen soldabilidad adecuada y poseen ductilidad moderada y conformabilidad a pesar de su estructura hexagonal compacta. Estas aleaciones no son endurecibles mediante tratamientos térmicos y son utilizadas normalmente en estado de recocido, con el fin de eliminar las tensiones residuales originadas por su uso. La principal característica que tienen sus aleantes en el material es mejorar el tamaño de grano.

Estas aleaciones son normalmente usadas en componentes de motores a reacción.

1.3.3 Aleaciones de titanio $\alpha + \beta$

Las aleaciones $\alpha + \beta$ tienen cantidades pequeñas de aluminio y vanadio y pueden tratarse térmicamente para obtener altas resistencias. Primero la aleación es tratada por solución cerca de la temperatura en la fase β lo que permite una pequeña existencia de la fase α para evitar el crecimiento del grano. Después la aleación se enfría para formar una solución sólida sobresaturada metaestable β o martensita de titanio α . Finalmente, la aleación es envejecida o revenida alrededor de 500°C, durante el envejecimiento, las fases α y β dispersas (matriz), y el precipitado de la fase β o α . [19]

Las aleaciones $\alpha + \beta$ tienen buena resistencia, alta ductilidad, propiedades uniformes y buena soldabilidad. Los componentes para estructuras aeroespaciales, motores a reacción y trenes de aterrizajes son aplicaciones típicas de estas aleaciones $\alpha + \beta$ tratadas térmicamente.

1.3.4 Aleaciones de Titanio β

El manganeso, cromo, hierro, molibdeno o niobio hacen que descienda la temperatura de transformación de α a β , y dependiendo de la cantidad de aleante añadida pueden ocasionar la retención de un porcentaje de fase β a temperatura ambiente. Para mejorar las propiedades de estas aleaciones β no se consiguen cuando su estructura está formada en su totalidad por la fase β exclusivamente,

sino que éstas se alcanzan al realizar un tratamiento de envejecimiento que provoca la precipitación de finas partículas de α dentro de los granos β . [12]

También se caracterizan por una elevada ductilidad en el trabajo en frío, lo que las hace susceptibles de ser conformadas en frío en estado de recocido. Otros elementos como el circonio no tienen ningún efecto en la temperatura de transformación pero tienen otros efectos en el metal. El circonio incrementa la resistencia a temperaturas bajas y moderadas.

1.3.5 Aleación de Titanio Ti6Al4V

El Ti6Al4V es la aleación de titanio que pertenece al tipo $\alpha+\beta$ (específicamente casi- β), cuya composición es de 6% Al y 4% V, El aluminio incrementa la temperatura de la transformación entre las fases α y β , mientras que el vanadio disminuye esa temperatura. Esta aleación es ampliamente utilizada en la industria, ya que presenta excelentes propiedades mecánicas, resistencia a la corrosión y oxidación a temperaturas altas, alta tenacidad, biocompatibilidad y se pueden modificar sus propiedades mediante tratamiento térmico. La aleación Ti6Al4V ofrece el mejor rendimiento versátil para una variedad de aplicaciones de reducción de peso en el sector aeroespacial, de automoción y equipos marinos.

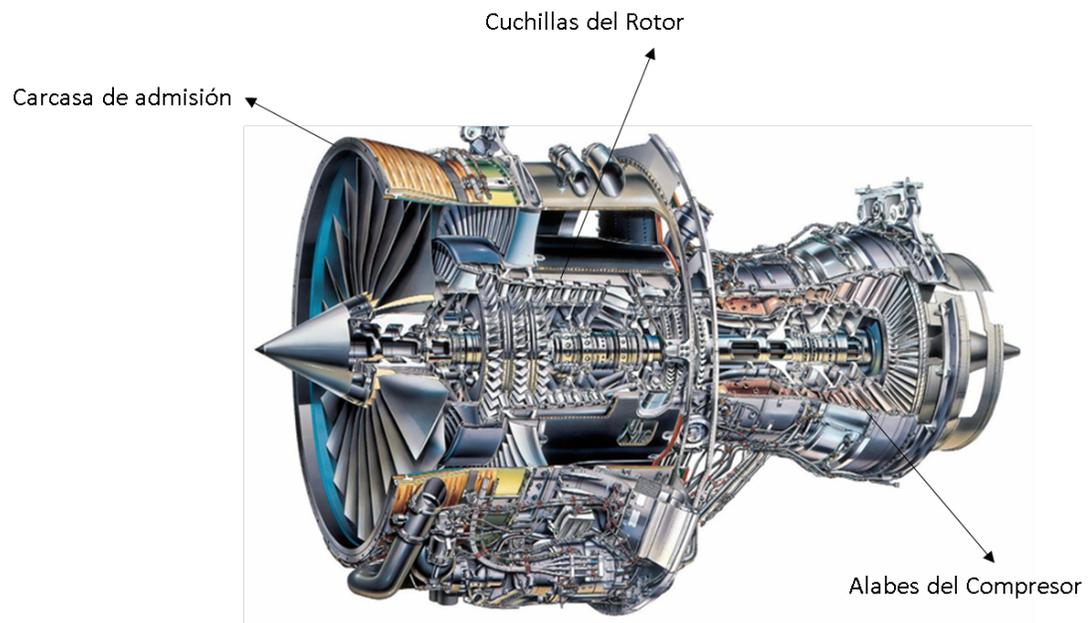


Figura 8. Partes del Turbocompresor RB211-524G/B construidos con Ti6Al4V

La composición más utilizada en la industria de esta aleación se muestra en la Tabla 5

COMPOSICIÓN QUÍMICA Inconel 600 (% peso)							
Ti	Al	V	N	O	H	Fe	Y
87.7	6.75	4.5	0.5	0.2	0.0125	0.3	0.005

Tabla 5. Composición química Aleación de Titanio Ti6Al4V.

En la Tabla 6 se muestran las propiedades mecánicas de la aleación según ficha técnicas del proveedor.

Aleación	Tensión		Dureza		Modulo
	<i>Resistencia (MPa)</i>		<i>Elongación (%)</i>	<i>Brinell</i>	<i>Módulo de Elasticidad GPa</i>
	<i>Ultimo</i>	<i>Cedencia</i>	<i>12.7 mm de Diámetro</i>	<i>500kg Bola de 10mm</i>	
Ti6Al4V	1020	750	14	334	116

Tabla 6. Propiedades Mecánicas de la Aleación de Titanio Ti6Al4V.

1.4 Corrosión asistida por esfuerzo (Stress Corrosión Cracking-SCC)

La corrosión asistida por esfuerzo es un proceso de corrosión caracterizada por el inicio y propagación de grietas que crecen lentamente bajo la acción simultánea de esfuerzos de tensión sostenidos y un ambiente corrosivo específico. Es una forma peligrosa de corrosión debido a que la falla del material es súbita e inesperada. Este tipo de corrosión se da en ciertos medios específicos para cada material y el agrietamiento se origina únicamente cuando la tensión sobrepasa un umbral crítico. [20]

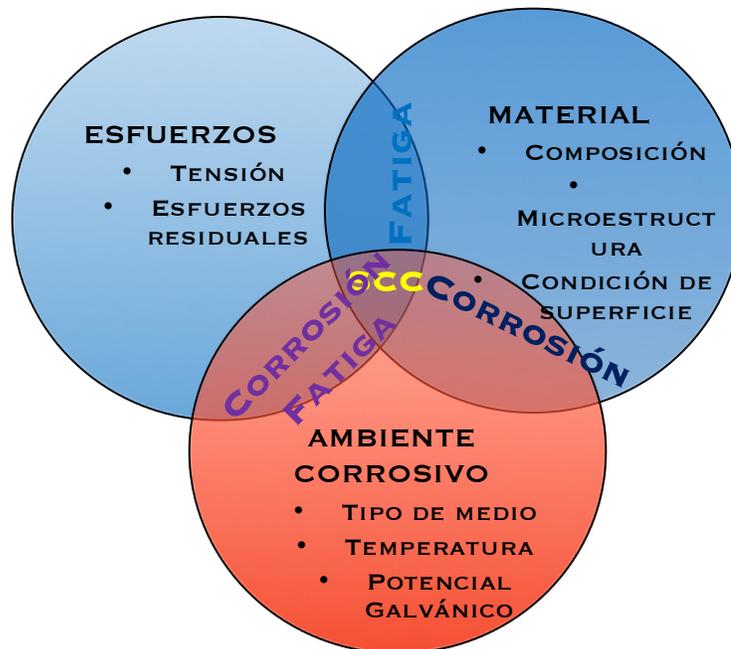


Figura 9. Corrosión asistida por esfuerzo.

El ataque puede tener lugar sobre una superficie entera, o se puede presentar en las hendiduras de los ensamblajes, ocasionando un ataque localizado y generando picaduras profundas, haciendo que los agentes corrosivos se puedan difundir en los límites de grano y provocar un ataque intergranular. Los esfuerzos externos o las cargas existentes en la estructura metálica, en conjunto con el ambiente atmosférico, pueden provocar mecanismos de degradación que combinados ocasionan agrietamientos del material por tensión y fatiga. Factores como tipo de material, historia del proceso, forma del producto, mecanismo de agrietamiento activo, configuración, geometría, y condiciones ambientales de servicio, pueden tener consecuencias importantes en la determinación del tipo de espécimen, y condiciones del ensayo a emplear.

A lo largo del tiempo se han ido observando fenómenos de SCC en gran número de materiales metálicos conocidos, cuando se hallaban en contacto con algunos medios corrosivos. Debido a las exigencias de la tecnología se han ido desarrollando nuevas aleaciones, buen número de ellas con extraordinarias características mecánicas y gran resistencia a la corrosión generalizada, sin embargo, se ha visto que muchas de estas aleaciones de reciente entrada en la tecnología, como contrapartida, fallan por corrosión asistida por esfuerzo en algunos medios específicos, cuando la tensión actuante alcanza valores elevados. En la industria aeroespacial y aeronáutica ha representado un gran problema debido que ha causado una gran pérdida de tiempo y dinero, un caso específico son las fallas estructurales por agrietamientos por corrosión asistida

por esfuerzo en diferentes partes de naves espaciales y satélites del Programa Apolo, incluyendo aleaciones de aluminio y Ti6Al4V en medios corrosivos como el agua y nitrógeno.[21,22]

En la superficie del metal se incuba una microgrieta que progresa en profundidad, sin casi pérdida de material, y por concentración de tensiones mecánicas y a veces, de hidrógeno naciente en la zona que rodea el inicio de grieta, produciéndose finalmente un desgarre brusco que lleva a la rotura sin estricción del material, cuando la grieta ha alcanzado una profundidad crítica. Todas las fallas por SCC tienen una apariencia macroscópica común de fragilidad. La velocidad de la SCC puede variar desde 10 E^{-11} a 10 E^{-1} m/s, pero normalmente está en el intervalo de 10 E^{-10} a 10 E^{-7} m/s. Figura 10[19]



Figura 10. Falla por corrosión asistida por esfuerzo.

1.5 Ruido Electroquímico

La técnica de ruido electroquímico (EN de la denominación en inglés Electrochemical Noise) fue desarrollada a comienzos de la década de los 70 por investigadores como Iverson, Hladky y Dawson[23]. La naturaleza del ruido electroquímico no tiene que ver con señales audibles, sino con fluctuaciones en el potencial y las corrientes electroquímicas de los procesos de corrosión de un determinado material. Cabe resaltar que a diferencia de las técnicas electroquímicas usuales, el ruido electroquímico es una técnica que no perturba el sistema, es decir, que no aplica ningún tipo de señal; además permite obtener información acerca de la cinética de la reacción, o sea la velocidad de corrosión; siendo posible la identificación del tipo de corrosión ya sea: uniforme o localizada. Estos son motivos por los cuales se tiene sumo interés en aplicar esta técnica.[24]

Las fuentes de ruido electroquímico dependen de diferentes condiciones de corrosión, como el resultado de efectos mecánicos, propagación de grietas, tensiones de superficies, y abrasión de la superficie metálica por partículas, efectos químicos, como adsorción de cloruros, formación o rotura de películas pasivas, repasivación durante la iniciación del picado, crecimiento y desprendimiento de burbujas de hidrógeno durante la disolución en soluciones ácidas.

1.5.1 Medición de ruido electroquímico (ENM).

Las medidas de esta técnica son debidas a fluctuaciones espontáneas de potencial y/o corriente, generadas por variaciones en la cinética de reacciones de corrosión. Estas medidas incluyen monitoreo de potencial bajo control galvanostático, corriente bajo control potencioestático o fluctuaciones de corriente y potencial libres de los electrodos.[25]

El arreglo para realizar la medición de ruido en un sistema se puede representar de dos maneras como se muestra en la Figura 11. Para el primer caso, el ruido de potencial se mide entre uno de los electrodos de trabajo y el electrodo de referencia, mientras que el ruido en corriente se mide entre los dos electrodos de trabajo del mismo material con las mismas dimensiones, comportándose los dos electrodos como un solo electrodo del doble del área de uno de ellos. Para el segundo caso, el primer par de electrodos mide el ruido de potencial y el segundo par mide el ruido en corriente, teniendo un electrodo en común del mismo material. [23,25]

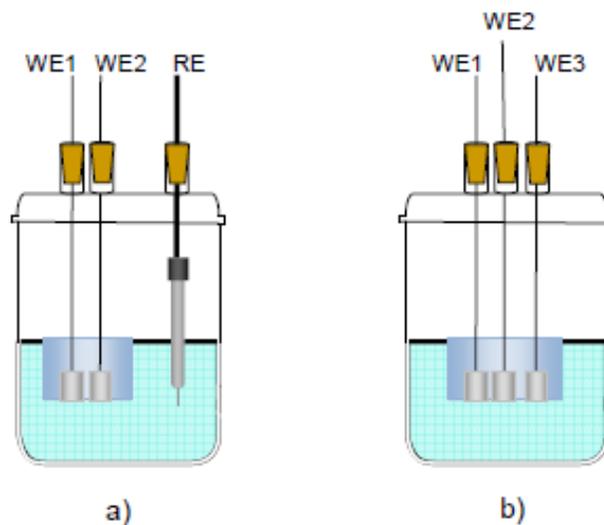


Figura 11. Arreglos para la medición de ruido electroquímico. a) Dos electrodos de trabajo y un electrodo de referencia. b) Tres electrodos de trabajo.

Es importante tener en cuenta, que el ruido en potencial es muy sensible en procesos de rompimiento de película y en etapas de iniciación de la corrosión localizada, mientras que el ruido en corriente es más sensible cuando el sistema alcanza una propagación, de ahí la importancia de obtener ambas medidas al mismo tiempo.

1.5.2 Interpretación datos ruido electroquímico

Los datos de corriente y voltaje obtenidos en ensayos de ruido electroquímico proporcionan un tipo de información difícil de interpretar de forma directa. La adquisición de los datos en los ensayos de ruido electroquímico se realiza habitualmente en periodos de duración bastante largos, esto da lugar a una gran cantidad de datos lo cual dificulta su análisis. Por ello, con el fin de disponer de una información útil y confiable de los datos se usan técnicas estadísticas cuya finalidad es conseguir un entendimiento básico de los datos y de las relaciones existentes entre las variables analizadas.

Hay varios métodos para el análisis de este tipo de datos, es de criterio de cada investigador que todo utilizar, pero lo más importante es tener la mayor información posible de cada una de ellas. Los métodos utilizados se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Inspección directa de registros experimentales.
- Análisis estadístico en el dominio temporal.
- Análisis en el dominio de frecuencias.
- Análisis basado en la Teoría del Caos.
- Análisis basado en la transformada de Wavelets

Generalmente las técnicas más utilizadas son la de inspección directa y la de análisis estadístico, El método más simple de análisis y el más directo, es el examinar las series de tiempo para la identificación de detalles que son característicos de los tipos de corrosión particulares [25], como puede ser la detección visual de transitorios de rompimiento y repasivación o de cambios oscilantes a zonas localizadas o corrosión por picaduras.

Por ejemplo, un registro de ruido electroquímico generado en un sistema que experimenta un proceso de corrosión uniforme o de pasivado, se caracteriza por mostrar pocos transitorios individuales, son cambios tan pequeños los cambios que serían difíciles de detectar. Por el contrario, los procesos de corrosión localizada suelen dar lugar a la aparición de transitorios que se pueden distinguir

con facilidad del resto del registro de ruido electroquímico por su tamaño y duración. Cuando existe una ruptura de la capa pasiva formando picadura en el material, hay un caída de potencial que reacciona con la parte anódica u una recuperación catódica para balancear el sistema.

El análisis estadístico de las series de tiempo es un método simple y rápido para la interpretación de la técnicas de ruido electroquímico. Estas series de tiempo se definen por la distribución de los valores expresados en la probabilidad acumulativa y se definen otras características de acuerdo a los parámetros estadísticos encontrados en los datos experimentados.

Media:

Con esta variable tenemos una pequeña aproximación de datos medios de corriente y de potencial para tener una forma más fácil de estudiarlos y se halla de la siguiente manera.

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n X_i \quad (1)$$

Varianza:

La varianza es la medida del promedio de energía de la corriente alterna del sistema, y la podemos hallar con la siguiente formula:

$$S^2 = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (X_i - \bar{X}_n) \quad (2)$$

Desviación estándar:

La desviación estándar es un parámetro estadístico que permite evaluar la dispersión de un conjunto de datos con respecto al valor medio. Este parámetro cuantifica la amplitud de las fluctuaciones con los registros de Voltaje y corriente del sistema. La desviación estándar es utilizada para calcular la resistencia de ruido R_n , la corriente I_{rms} y el índice de localización IL .

$$\sigma = \sqrt{S^2} \quad (3)$$

Media cuadrática rms (**I**_{rms}):

El valor rms es la medida de la cantidad de energía disponible de la señal, incluyendo el efecto de cualquier corriente directa (DC).

$$rms = \sqrt{\bar{X}n^2 + S^2} \quad (4)$$

Índice de Localización (**IL**):

Una de las principales características de la técnica de ruido electroquímico es el estudio de fenómenos de corrosión localizada y una manifestación de ello, es el llamado Índice de Localización (IL), que es otro parámetro estadístico que se ha utilizado en el análisis de la señal de ruido en corriente y que se define como la relación que existe entre la desviación estándar (σ) y el valor rms (**I**_{rms}) de la corriente [24,26].

$$IL = \frac{\sigma_I}{I_{rms}} \quad (5)$$

Según estudios de esta técnica por Botana-Aballe [25] y Eden [26], han propuesto que el Índice de localización (IL) sea una medida de la desviación de dos electrodos idénticos del sistema, más que como un indicador del mecanismo de corrosión. Por lo que salió la correlación del índice de localización y el Tipo de corrosión presente en el sistema, como se muestra en la Tabla 7.

Tipo de Corrosión	Valores de IL	
	Máx.	Min.
Localizada	1.0	0.1
Mixta	0.1	0.01
Uniforme	0.01	0.001

Tabla 7. Correlación entre el índice de localización y tipos de Corrosión.[25,26]

Resistencia de Ruido (Rn)

La resistencia de ruido complementa la información proporcionada por los registros de potencial y de corriente separadamente, se obtiene dividiendo la desviación estándar de potencial sobre la desviación estándar de intensidad:

$$R_n = \frac{\sigma_V}{\sigma_I} \quad (6)$$

Velocidad de corrosión (CR):

La densidad de corriente de corrosión se puede medir por cualquier técnica electroquímica, por lo cual a partir de la resistencia de ruido, Rn, es posible determinar la densidad de corriente de corrosión dividiendo la constante de Stern-Geary sobre la resistencia de ruido mediante la siguiente ecuación:

$$I_{corr} = \frac{B}{R_n} \quad (7)$$

y con ello evaluar la velocidad de corrosión (CR, Corrosion Rate) la cual se realiza mediante la siguiente expresión:

$$CR = k \frac{i_{corr}}{\rho} EW \quad (8)$$

donde:

k: constante expresada en diferentes sistemas de unidades.

ρ : es la densidad del metal o aleación utilizado.

i_{corr} : es la densidad de corriente.

EW: es el peso equivalente del metal o aleación utilizado.

CAPITULO III

DESARROLLO EXPERIMENTAL

La metodología que se llevó a cabo en este trabajo de investigación está encaminada a determinar la susceptibilidad que tienen tres materiales aeronáuticos a la corrosión asistida por esfuerzo. En la Figura 12, se puede observar el diseño metodológico resumido.

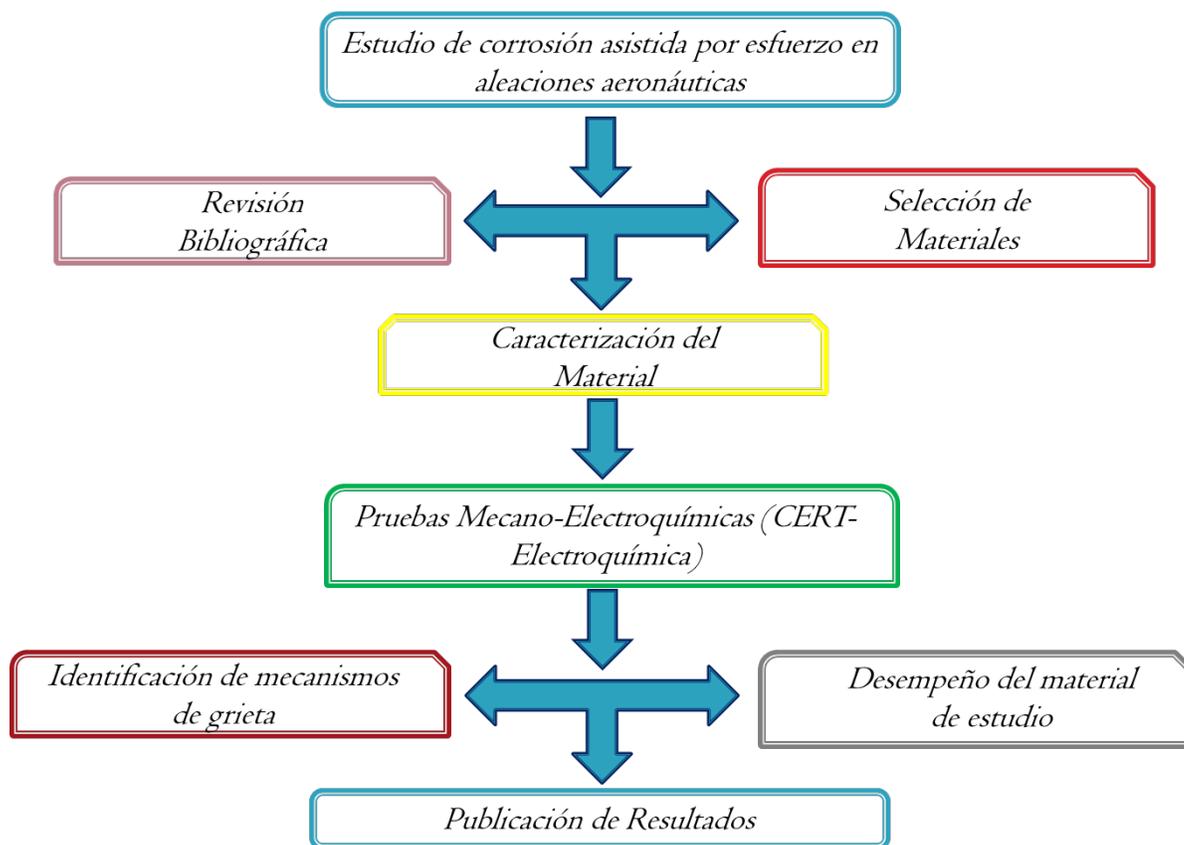


Figura 12. Diseño metodológico.

3.1 Selección y Caracterización del material.

Se realizó un estudio exhaustivo sobre las aleaciones usadas comúnmente en el área aeronáutica por medio de fichas técnicas, normas técnicas, artículos y se seleccionó tres materiales aeronáuticos que cumplen un papel importante en la construcción de los aviones y satélites y que según estudios son susceptibles a ciertos medios cuando están sometidos a corrosión asistida por esfuerzo. También se seleccionó el tipo de medio en el cual son los más susceptibles según el servicio del material en el sector aeronáutico, de acuerdo a esto se seleccionó tres materiales y cinco medios el cual se muestra en la Tabla 8 .[pendiente bibliografía]

Material	Medio
Al 6061-T6 Inconel 600 Ti6Al4V	H ₂ O, NaCl 5%, NaOH 5%, HCl 5%, H ₂ SO ₄ 5%.

Tabla 8. Material y medios de estudio.

3.1.1 Florescencia de Rayos X.

Después de obtener el material se analizó por medio de la técnica de espectroscopia de Fluorescencia de Rayos X (FRX), para corroborar la composición química cuantitativamente y cualitativamente los materiales de estudio y compararla con la suministrada por el proveedor. El equipo utilizado es el analizador de FRX portátil Delta Premium de la Marca Olympus (Figura 13) este equipo está configurado con potentes tubos de rayos X miniatura, detector de PIN de silicio (SDD), filtros especializados, y un sistema de optimización de múltiples haces para análisis de campo por FRX más detallados, el cual al emitir los rayos X mide la longitud de onda y energía absorbida por el material, el cual detecta por elementos[27].



Figura 13. Analizador de FRX portátil Delta Premium (Olympus).[27]

3.1.2 Análisis Microestructural.

Se prepara las muestras de acuerdo a la Norma ASTM E3 para la preapración metalográfica[28], se corta una muestra de 50 mm de largo por 63.5 mm de diámetro con la cortadora de precisión Struers Secotom-10 (Figura 14) trabajando con un disco de Óxido de Aluminio 50A20, después se realiza montaje en baquelita (Polyfast) de marca Struers con Prensa de embutición CitoPress (Figura 15).Se realizó un pulido basto de lija N°80 a N°4000, después un pulido fino con paño y alúmina a 1 μ m para obtener el brillo espejo esperado para la preparación de la muestra.



Figura 14. Cortadora de Precisión Struers Modelo Secotom-10



Figura 15. Prensa de embutición CitoPress Marca Struers

Las muestras se limpiaron utilizando un baño de ultrasónico Branson 3800 con metanol por un tiempo de 15 minutos (Figura 16), Luego se realizó el ataque químico de acuerdo a la Norma ASTM E407 donde nos especifica el tipo de reactivo utilizar para cada uno de los materiales, para el Al6061-T6 y el Inconel 600 se utilizó el reactivo Kalling's 2 (50 ml Metanol, 100ml HCl, 4gr CuCl_2) y para el Ti6Al4V se utilizó el reactivo Krolls (100 ml H_2O , 3 ml HF, 3 ml HNO_3) [29]. Para observar la microestructura se utilizó un Microscopio invertido Zeiss Axio Observer Z1m (Figura 17)



Figura 16. Baño Ultrasónico 3800 Branson.

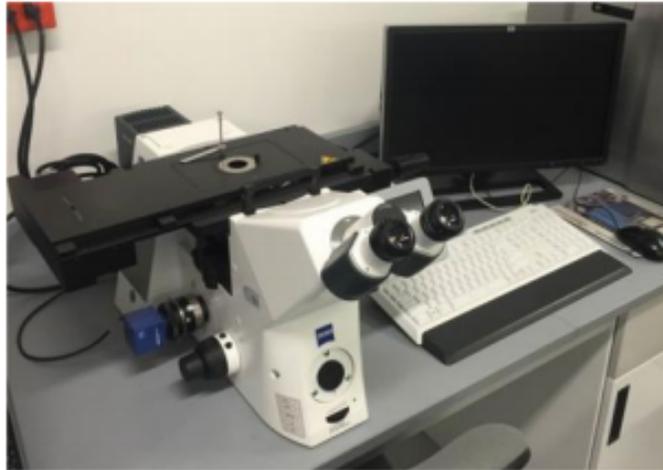


Figura 17. Microscopio Invertido de luz transmitida Axio Observe Z1m.

3.1.3 Ensayo de Tensión

Para la realización de los ensayos se empleó los siguientes equipos, con los que se cumplen los requisitos especificados en la norma ASTM E8/E8M-15ª Máquina universal de ensayos mecánicos servo-hidráulico Landmark 370 (Figura 18) y Extensómetro MTS 634.12F-24, para determinar los valores de Modulo de elasticidad (E), Resistencia Última (σ_u) y Resistencia la fluencia (σ_F) y así obtuvimos una base de comparación para las pruebas sometidas a corrosión asistida por esfuerzo [30].



Figura 18. Maquina Universal Servo-Hidráulica Landmark 370 .

3.1.4 Ensayo a Velocidad de Extensión Constante (CERT).

Se realizaron pruebas mecánicas en el equipo CERT (Cortest) del Laboratorio de corrosión (Figura 19). Las muestras se maquinaron según la norma ASTM G129. Las dimensiones de la probeta maquinada para el ensayo se especifican en la Figura 20. Posteriormente se eliminaron en las muestras las marcas ocasionadas por la herramienta de maquinado en el área de prueba, puliéndolas superficialmente utilizando de una lija grado 400 hasta una lija grado 4000. Antes del montaje en el equipo CERT las muestras se limpiaron con acetona y se secaron bajo una corriente de aire caliente [31]. La velocidad de deformación utilizada en el ensayo para el aluminio es de $5 \cdot 10^{-6} / s^{-1}$ y para el Inconel 600 y Ti6Al4V es de $5 \cdot 10^{-5} / s^{-1}$.

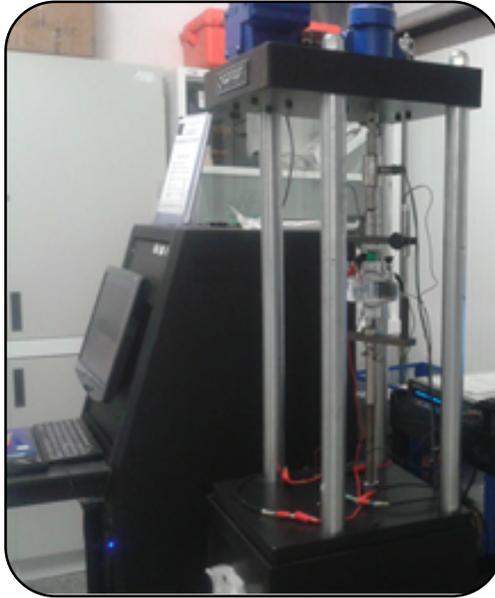


Figura 19. Maquina CERT (Cortest) CIIIA-UANL.



Figura 20. Muestras para el ensayo CERT según Normas G129 y E8/E8M

Una vez finalizada la prueba de la máquina CERT se calcula el parámetro de ductilidad de reducción de área con la fórmula siguiente, después comparamos con la relación de tiempo de fallo con respecto al ensayo de tensión sin medio y con medio inerte y se determina la susceptibilidad de acuerdo a lo indicado en el Diagrama de McIntyre. Figura 21.[31, 32]

$$\%RA = \frac{A_i - A_F}{A_i} * 100 \quad (9)$$

Luego hallamos el índice de reducción de área para así compararla con el diagrama de McIntyre y determinar que categoría se encuentra el material.

$$I_{RA} = \frac{\%RA_m}{\%RA_i} \quad (10)$$

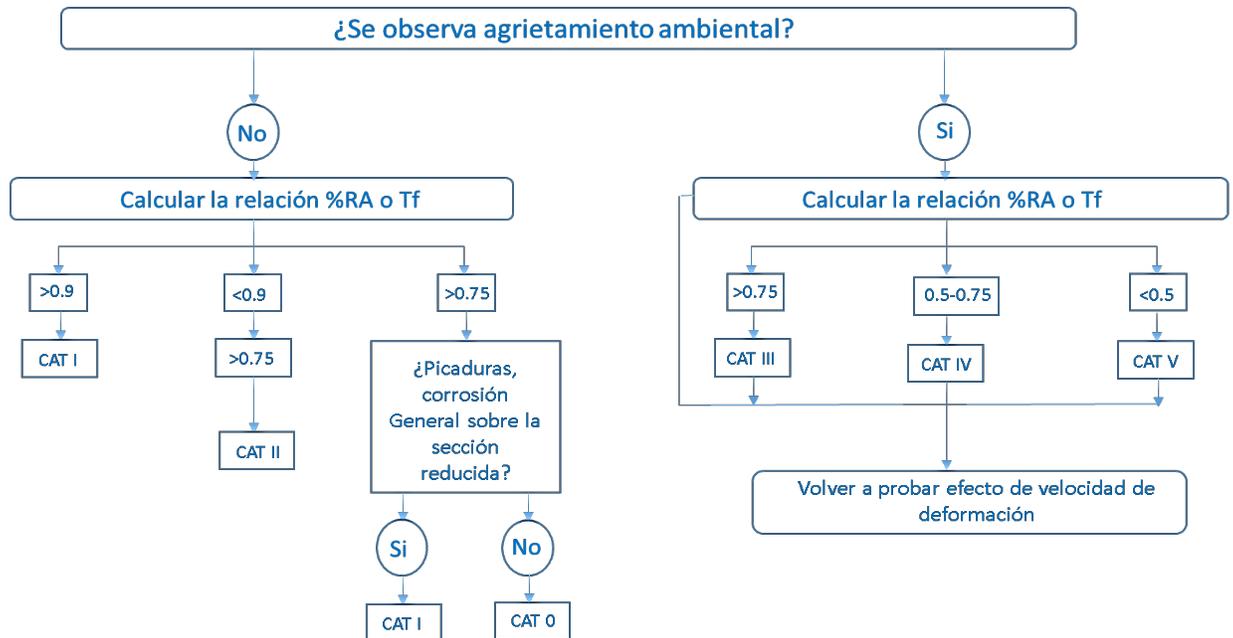


Figura 21. Diagrama de flujo de McIntyre

Según lo anterior McIntyre determino Cinco Categorías para determinar la susceptibilidad del material a la corrosión asistida por esfuerzo.[32]

- **CAT I Inmune:** Materiales candidatos en esta categoría no muestran evidencia de crecimiento de grietas inducidas por el ambiente en el examen al microscopio. La relación de reducción de área es igual o mayor que 0,9.
- **CAT II Prácticamente Inmune:** No hay evidencia de crecimiento de agrietamiento ambiental en el examen microscópico. En materiales que son prácticamente inmunes la relación de reducción de área está entre un 0,65 y 0,9.
- **CAT III Medianamente susceptible:** Los materiales muestran crecimiento secundario de grietas poco profundas, solamente en la región de la sección del cuerpo. La relación de reducción de área va desde 0,75 a 0,95.

- **CAT IV Susceptibilidad moderada:** Fracturas frágiles inducidas por el medio agresivo aparecen en la superficie final. Grietas secundarias en la sección reducida y en la región del cuello. La relación de reducción de área está entre 0,5 y 0,75.
- **CAT V Susceptible:** Fracturas frágiles inducidas por el medio ambiente, predominantes en la superficie final de la fractura en los materiales. Grietas secundarias extensivas aparecen sobre el cuello, pueden extenderse hacia abajo dentro de los bordes. El cuello es altamente limitado o eliminado. La relación de reducción de área es inferior a 0,5.

3.1.5 Ruido Electroquímico (RE).

Todos los experimentos con la técnica de ruido electroquímico simultáneamente a los ensayos CERT, se realizaron en una celda electroquímica con 3 electrodos con capacidad de 500 ml, como se muestra en la Figura 22. Las soluciones de trabajo fueron preparadas utilizando H₂O (Blanco), Cloruro de Sodio, Hidróxido de Sodio, Ácido sulfúrico y Acido Clorhídrico con una concentración del 5% en peso. Para hacer la medición simultánea de ruido en corriente y potencial, se utilizaron electrodos de trabajo del material a estudiar y un electrodo de referencia (WE1, WE2, RE), donde los electrodos de trabajo miden el ruido en potencial, y entre uno de ellos y el de referencia se mide el ruido en corriente (WE2, RE) [25]. Esta técnica se empleó utilizando un Potenciostato Solartron SI 1287 (Figura 23).

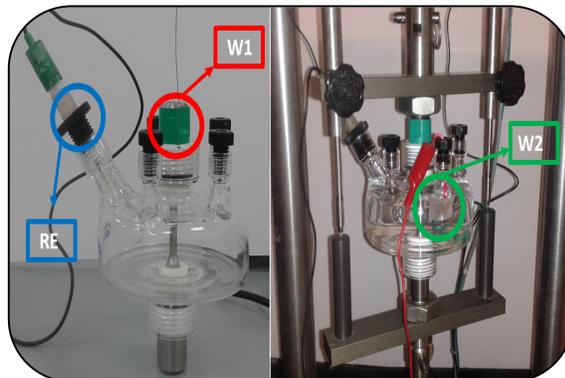


Figura 22. Celda Electroquímica empleada



Figura 23. Potenciostato Solartron SI 1287

Después de realizar las pruebas electroquímicas se obtienen los valores estadísticos de Índice de localización y la Resistencia al ruido y así poder entrelazar los procesos de corrosión y deformación.

3.1.6 Ruido Electroquímico (RE).

Con la finalidad de caracterizar con mayor detalle y llevar a cabo un análisis fractográfico de las probetas ensayadas en la máquina CERT, se utilizó Microscopia Electrónica de Barrido (MEB). El equipo utilizado fue un Microscopio Marca Jeol Modelo JSM5800LV utilizando 15kV. Para esta caracterización, las probetas se cortaron y se examinaron con y sin productos de corrosión, limpiándolas posteriormente mediante ultrasonido en etanol, como se puede apreciar en la Figura 2.18 y finalmente las muestras se secaron en una mufla a una temperatura de 60°C. En el MEB, se observó en detalle la morfología de la superficie de fractura y en sentido longitudinal y la fractura en la zona del cuello de estricción de cada probeta analizada.

Para el análisis fractográfico de las muestras ensayadas y con la finalidad de caracterizar con mayor detalle las probetas ensayadas en la máquina CERT, se utilizó Microscopia Electrónica de Barrido (MEB). El equipo utilizado es el Microscopio Marca Jeol Modelo JSML-6510-LV (Figura 24). Para esta caracterización, las probetas se cortaron y se examinaron con y sin productos de

corrosión, limpiándolas mediante ultrasonido en Metanol, luego se secaron con aire caliente. Se observó en detalle la morfología de la fractura, longitudinalmente se verificó el tipo de fractura y un análisis por EDS para determinar productos de corrosión.

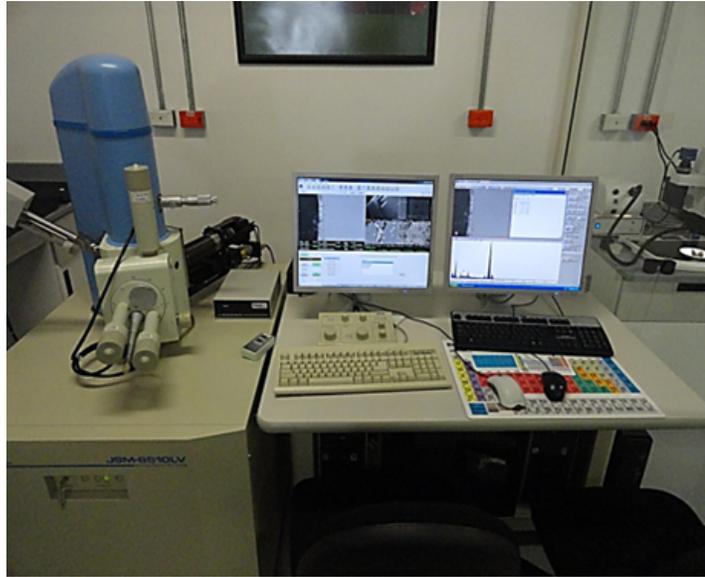


Figura 24. Microscopio Electrónico de Barrido Jeol.JSML-6510-LVM

CAPITULO IV

ANALISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se muestran los resultados con sus respectivo análisis y discusión obtenidos después de realizar los ensayos CERT (Constant Extension Rate Test) simultaneo a la técnica de ruido electroquímico (RE), y determino la disminución de las propiedades mecánicas e identificar el mecanismo de la corrosión desencadenada y que tipo de susceptibilidad presenta.

4.1 Caracterización Material

4.1.1 Florescencia de rayos X:

Se realizó prueba de Fluorescencia de rayos X y se analizó la composición química del material, para compararla con la composición nominal suministrada por el proveedor de cada material (Al6061-T6, Inconel 600, Ti6Al4V)

COMPOSICIÓN QUÍMICA Al6061-T6 (% peso) - EXPERIMENTAL							
Al	Si	Mg	Cu	Fe	Cr	Zn	Ti
97.1	0.061	1.3	0.46	0.75	0.23	0.12	0.015
COMPOSICIÓN QUÍMICA Al6061-T6 (% peso) - PROVEEDOR							
Al	Si	Mg	Cu	Fe	Cr	Zn	Ti
95.9-98.6 %	0.040-0.80	0.8-1.2	0.15-0.40	0.7 máx.	0.04-0.35	0.25 máx.	0.015

Tabla 9. Comparación de composición química del Al6061-T6 Proveedor Vs Experimental.

COMPOSICIÓN QUÍMICA Inconel 600 (% peso)-EXPERIMENTAL							
Ni + Co	Cr	Fe	C	Mn	S	Si	Cu
72	16	7.2	--	0.4	0.013	0.32	0.61
COMPOSICIÓN QUÍMICA Inconel 600 (% peso)-PROVEEDOR							
Ni + Co	Cr	Fe	C	Mn	S	Si	Cu
72 min.	14-17	6-10	0.15 Máx.	1 máx.	0.015 máx.	0.5 máx.	0.5 máx.

Tabla 10. Comparación de composición química del Inconel 600 Proveedor Vs Experimental.

COMPOSICIÓN QUÍMICA Ti6Al4V (% peso)-EXPERIMENTAL							
Ti	Al	V	N	O	H	Fe	Y
87.7	6.1	5.6	0.2	0.12	0.02	0.4	0.003
COMPOSICIÓN QUÍMICA Ti6Al4V (% peso)-PROVEEDOR							
Ti	Al	V	N	O	H	Fe	Y
BALANCEADO	6.75	4.5	0.05	0.2	0.0125	0.3	0.005

Tabla 11. Comparación de composición química del Inconel 600 Proveedor Vs Experimental.

Como se puede observar en la tabla 9,10 Y11, los valores de porcentaje en peso de cada uno de los componentes de los materiales de estudio obtenidos por fluorescencia de rayos x, son similares a los valores nominales, por lo cual se confirma que el material corresponde al Al6061-T6, Inconel 600 y Ti6Al4V.

4.1.2 Análisis Microestructural.

Se realizó preparación metalográfica y se obtuvieron las micrografías a aumentos de 100X en el microscopio óptico de cada uno de los materiales.

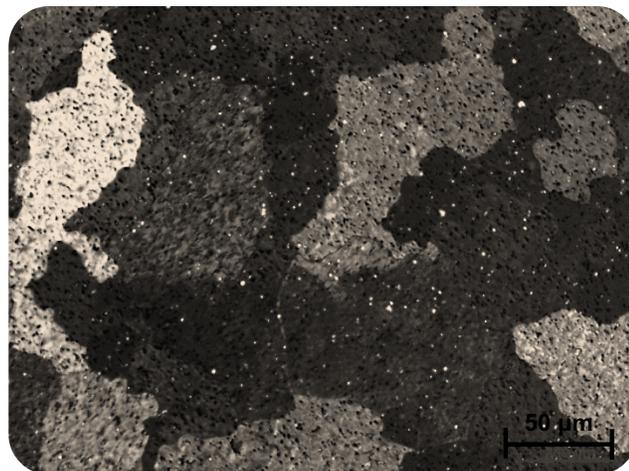


Figura 25. Micrografía Al6061-T6.

En la Figura 25 podemos observar que al ser tratada térmicamente el tamaño de grano es más grande debido que algunos autores concluyen que esta aleación exhibe un crecimiento de grano cuando está a temperaturas por encima de 400°C

[33] . Podemos observar presencia de partículas grandes de composición con la presencia de Al, Mn y Cr y precipitaciones de Mg_2Si dentro del grano.

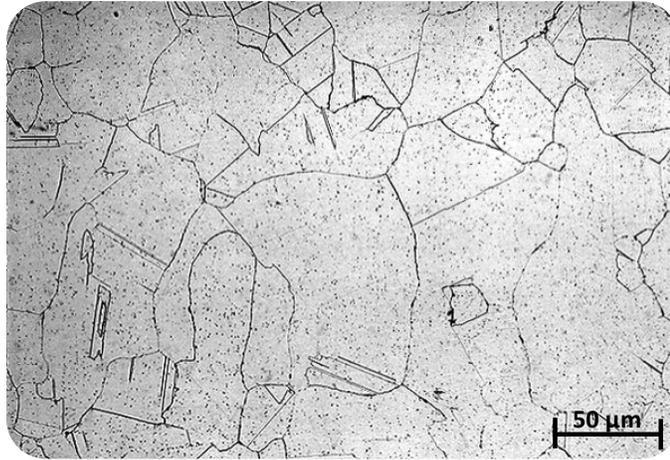


Figura 26. Micrografía Inconel 600.

En la Figura 26 se observa la micrografía del Inconel 600 donde se puede observar una estructura maclada mostrando una matriz de Níquel con precipitaciones formadas por carburos de cromo primarios, y la distribución homogénea del niobio dentro de la matriz de níquel[34].

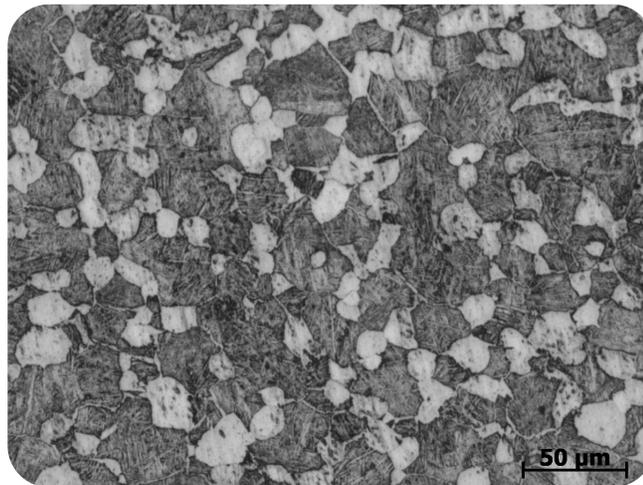


Figura 27. Micrografía Ti6Al4V.

En la Figura 27 se observa una matriz martensítica de morfología globular donde hay presencia de fases α y β características de este tipo de aleaciones bifásicas.

4.2 Ensayos Mecano-Electroquímicos.

4.2.1 Ensayo de tensión a velocidad constante (CERT)

Antes de realizar los ensayos de tensión a velocidad constante se realizó al material ensayos de tensión en la Máquina universal servo-hidráulica Landmark 370 del Centro de investigación e innovación en ingeniería Aeronáutica, a fin de confirmar las propiedades mecánicas iniciales del material, Ver Tabla 12. Con esas valores experimentales se introdujo a la maquina CERT las variables para que el ensayo estuviera más apegado a la realidad.

Aleación	Tensión			Modulo
	Resistencia (MPa)		Elongación (%)	Módulo de Elasticidad GPa
	Ultimo	Cedencia		
Al6061-T6	311.3	275.45	28	69
Inconel 600	625.3	283.4	18	271.5
Ti6Al4V	1060.3	880	12	113.8

Tabla 12. Valores de tensión experimentales de las aleaciones de estudio.

Después de realizados los ensayos CERT a una velocidad de 5×10^{-6} mm/s se obtuvieron las gráficas esfuerzo Vs Deformación del Al 6061-T6 , Se muestra la Figura 28 donde se puede observar que el material al estar sometido a diferentes medios agresivos vemos que el blanco no difiere de los resultados obtenidos de tensión normal sin medio, También podemos como al someterlo a NaCl 5% presenta disminución de ductilidad rompiendo el material poco después que el material llegara al límite de cedencia, para el NaOH 5% cae drásticamente sus propiedades mecánicas con presencia de fragilidad con una disminución del 17,4% en el UTS. En el que se encuentra inmerso en el H2SO4 5% tiene un comportamiento muy típico pero a comparación con el agua disminuye su UTS con poca ductilidad, en comparación con el HCL 5% que presenta buena ductilidad pero los valores de Esfuerzo de fluencia y UTS son los más bajos de todos los medios estudiados, con una disminución de 24.6 % de UTS y 24.1% de Esfuerzo de fluencia.

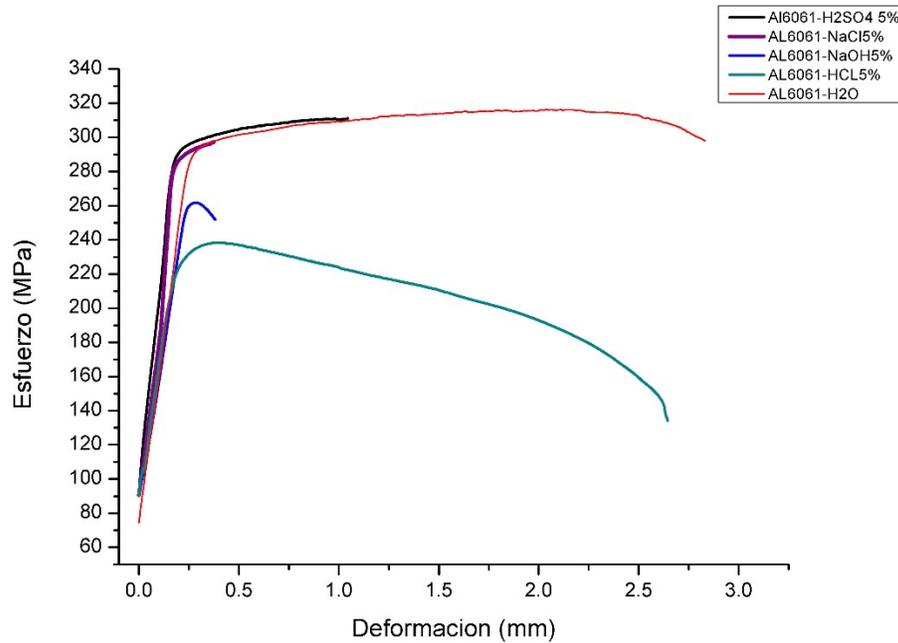


Figura 28. Grafica Esfuerzo Vs Deformación del Al6061-T6 en 5 medios.

En la Figura 29 podemos comparar los diferentes medios cuando están sometidos al ensayo CERT en la Gráfica de Esfuerzo Vs Deformación, en el material Inconel 600, a comparación con el del Aluminio 6061-T6 se puede observar una tendencia más uniforme pero vemos que la mayoría de medios se encuentran dentro o superior a las propiedades mecánicas iniciales y presenta buena ductilidad, con excepción del Inconel 600 inmerso en NaOH 5% que presentó una disminución drástica del 12.8% en el UTS y 19% en el esfuerzo de fluencia. El esfuerzo máximo fue el del H₂SO₄ 5% de 661.69 MPa y el menor fue el del NaOH 5% 560.19 Mpa.

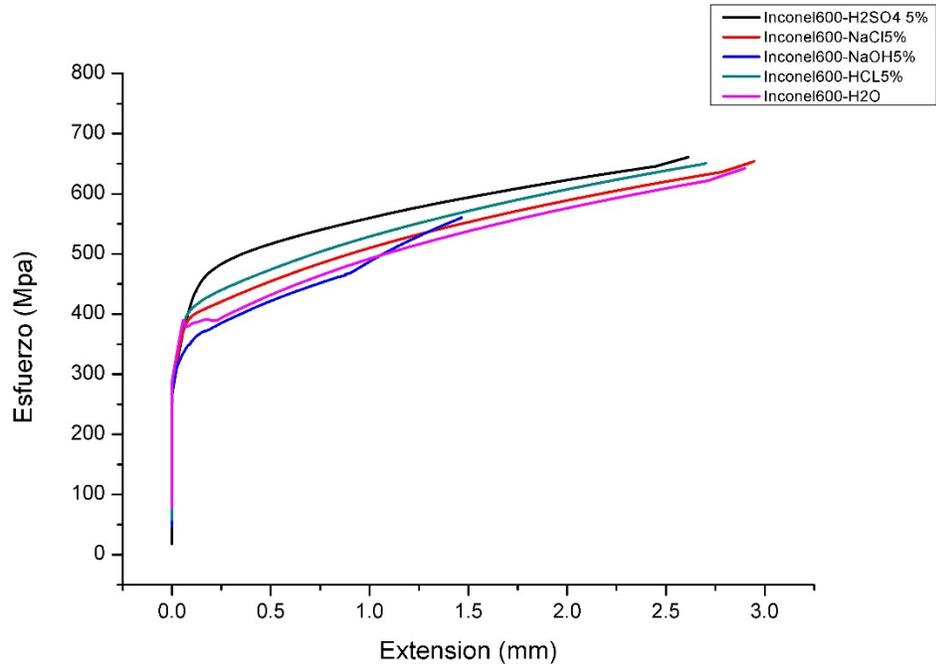


Figura 29. Grafica Esfuerzo Vs Deformación del Inconel 600 en 5 medios.

En la Figura 30 se observa el comportamiento que presenta el Ti6Al4V EN LA Curva esfuerzo deformación es muy típica del material, viendo que todos los medios disminuyen en poca proporción sus propiedades mecánicas excepto la que está sometida a NaCl 5% ya que su tendencia es idéntica que la que está en el H2O. El mejor comportamiento mecánico lo obtuvo el inmerso en NaCl 5% con un esfuerzo máximo es la con 1050.62 MPa y un esfuerzo de fluencia de 920.13 y el que presento las peores condiciones fue la inmersa en el NaOH 5% con un esfuerzo máximo de 992.65 MPa y 822 Mpa en el esfuerzo de fluencia.

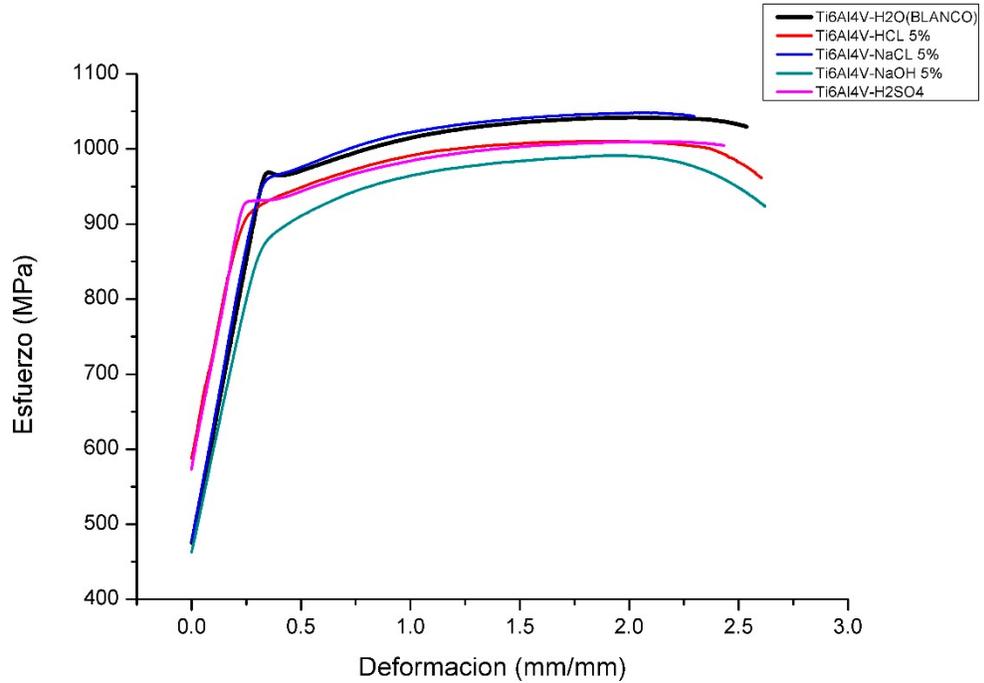


Figura 30. Grafica Esfuerzo Vs Deformación del Ti6Al4V en 5 medios.

Para evaluar el comportamiento mecánico del material mediante los parámetros de ductilidad del material, se denota con el Porcentaje de elongación %E y el porcentaje de estricción o reducción de área %RA [35]. Estas variables las comparamos con los tres materiales y los 5 medios como se muestra en la Figura 31 en la cual se puede observar que el que presenta menor % Elongación es el Al6061-T6 inmerso en el NaOH 5% con un porcentaje de 2.98% y un valor de 20.55% de reducción de área. Para el caso del Al 6061-T6 el medio influyo mucho en la propiedades mecánicas ya que se comportó diferente con respecto al medio que se encontrara, ocasionando que el material fallara por el medio y no por el esfuerzo mecánico aplicado. Este mismo comportamiento le paso al Inconel cuando estaba inmerso en medios ácidos, mientras que el Ti6Al4V generalmente presento excelente respuesta, debido a que fallaba por el esfuerzo generado sin que interfiriera el medio.

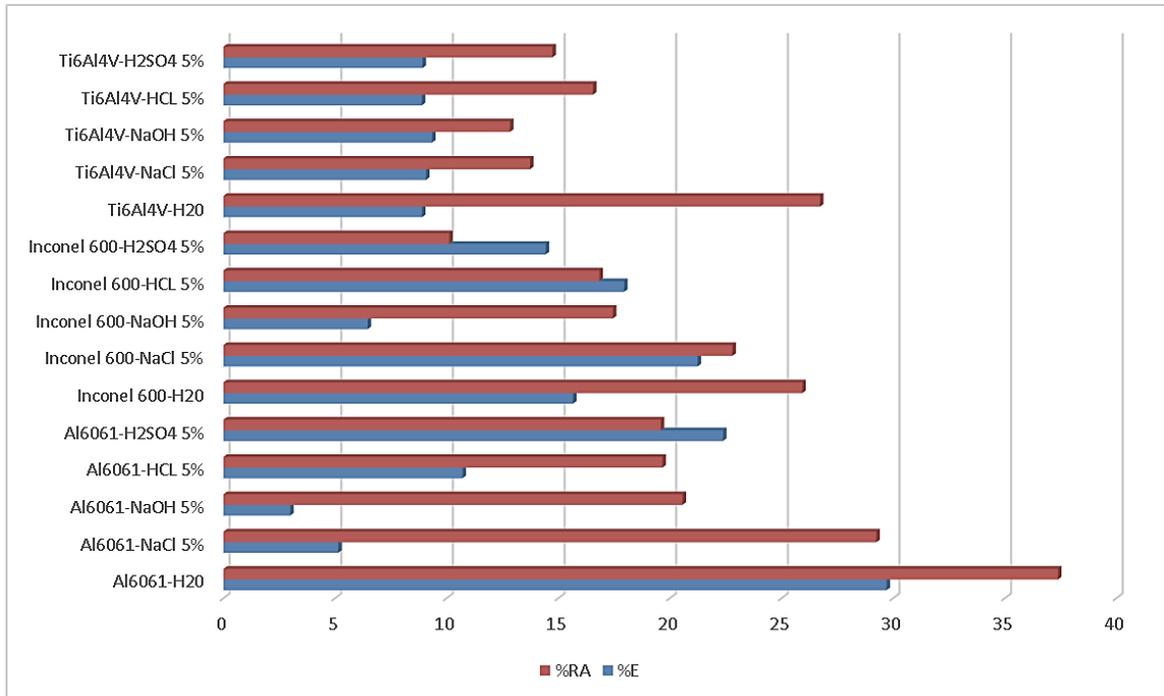


Figura 31. Grafica % E y % RA de los materiales de estudio.

Para analizar que el materiales susceptible a Corrosión asistida por esfuerzo se determina el Índice de reducción de área con la formulas 9 y 10 descrita en el Marco teórico el cual se muestra en la Tabla 13 junto con los valores mecánicos de % Elongación, Esfuerzo máximo, esfuerzo de fluencia , de ruptura y su categoría de susceptibilidad a corrosión asistida por esfuerzo. Se observa que después de realizar los cálculos correspondiente y con la ayuda de la fractografía podemos determinar su categoría, siendo la categoría I aquella que no es susceptible a la corrosión asistida por esfuerzo, mientras que la categoría V es indicativa de una alta susceptibilidad.

Vemos que el Al6061-T6 tiene una categoría que varía entre II y el IV dependiendo del tipo de medio que este inmerso siendo la categoría más elevada IV correspondiente al NaOH 5% y H2SO4 5%. El Inconel 600 con medios ácidos es susceptible a la corrosión asistida por esfuerzo mientras que a medios alcalinos y salinos no presenta esta susceptibilidad, esto es debido a que algunos de sus componente al reaccionar con un medio ácido no protege el material y desprende la capa de pasivación que forma. Mientras que el Ti6Al4V tiene una excelente resistencia a la corrosión asistida por esfuerzo mostrándose inmune en todos los medios estudiados, justo como lo indican en la literatura.

Ensayo	%E	%RA	I _{RA}	Categoría SCC	Esfuerzos (MPa)		
					Fluencia	Máximo	Ruptura
Al6061-H2O	29.704	37.381	--	--	288.8	316.86	298.52
Al6061-NaCl 5%	5.139	29.245	0.782	Medianamente susceptible (CAT III)	282.2	297.48	297.48
Al6061-NaOH 5%	2.987	20.559	0.549	Susceptibilidad Moderada (CAT IV)	255.55	261.49	252.16
Al6061-HCL 5%	10.704	19.661	0.525	Susceptibilidad Moderada (CAT III)	219.48	238.8	135.55
Al6061-H2SO4 5%	22.375	19.586	0.523	Susceptibilidad Moderada (CAT IV)	283.56	310.88	306.81
Inconel 600-H2O	15.651	25.929	--	--	341.29	642.28	635.56
Inconel 600-NaCl 5%	21.235	22.797	0.879	Prácticamente Inmune (CAT II)	360.94	653.48	626.73
Inconel 600-NaOH 5%	6.456	17.443	0.672	Inmune (CAT I)	276.87	560.19	533.28
Inconel 600-HCL 5%	17.945	16.837	0.649	Susceptibilidad Moderada (CAT IV)	380.24	650	642.24
Inconel 600-H2SO4 5%	14.431	10.111	0.389	Susceptible (CAT V)	407.21	661.69	652.32
Ti6Al4V-H2O	8.892	26.719	--	--	937.95	1042.43	1029.73
Ti6Al4V-NaCl 5%	9.071	13.726	0.513	Inmune (CAT I)	920.13	1050.62	1042.43
Ti6Al4V-NaOH 5%	9.344	12.830	0.480	Inmune (CAT I)	822	992.65	923.41
Ti6Al4V-HCL 5%	8.880	16.549	0.619	Inmune (CAT I)	867.70	1010.27	960.49
Ti6Al4V-H2SO4 5%	8.911	14.732	0.551	Inmune (CAT I)	884.89	1008.63	1003.92

Tabla 13. Resultados mecánicos y susceptibilidad a SCC del Al6061-T6, Inconel 600 y Ti6Al4V.

4.2.2 Ruido Electroquímico

En las siguientes Figuras se encuentran la relación de las series de tiempo en corriente y potencial con las curvas esfuerzo -deformación con los tres materiales de estudio en los tres puntos cruciales de la curva (Esfuerzo de fluencia, Esfuerzo máximo y de ruptura). Los ensayos de ruido electroquímico se realizaron mediante un análisis estadístico utilizando un polinomio de grado 2 para la distribución de datos para un ajuste de ellos más preciso, para después sacara las variables de ruido. El objetivo de hacer uso de los métodos estadísticos, es tratar a las series de tiempo en potencial y corriente, como una colección de datos que no guardan relación entre diferentes muestras

ensayadas, simplemente se define su comportamiento por la distribución de sus valores.[36]

- **Al6061-T6 H₂O**

BIBLIOGRAFIA

[1] Benavides S. Corrosion control in the aerospace industry US Coast Guard. Woodhead Publishing Limited. UK. 2009.

[2] Gaona Tiburcio C, Zambrano Robledo P, Martínez Villafañe A, Almeraya Calderón F. Corrosión en la industria aeroespacial. En Valdez Salas B, & Schorr Wiener M (Eds.). Corrosión y preservación de la infraestructura industrial. Barcelona, España: OmniaScience; 2013. pp. 33-48.

[3] Materiales Aeronáuticos Aleaciones no ferrosas: El aluminio aleado y el titanio aleado, sus aplicaciones en aeronáutica "Universidad Nacional de La Plata Facultad de Ingeniería Departamento de Aeronáutica.

[4] Cardenas Fernanadez J; Diaz del Castillo F. Lecturas para Ingeniería No. 23 "Superaleaciones". Laboratorio de Tecnología de Materiales. Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán Departamento de Ingeniería. Cuautitlán Izcalli, Edo. de México. 2015.

[5] Irausquín. I.A. "COMPORTAMIENTO A LA FATIGA Y CORROSIÓN-FATIGA DE LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 7075-T6 RECUBIERTA CON TiN". Universidad Central de Venezuela. Caracas, Mayo de 2003

[6] ASM International. Aluminum Alloy Castings: Properties, Processes, and Applications (#05114G).Chapter 1. 2004

[7] ASM International 1994. ASM Specialty Handbook: Aluminum and Aluminum Alloys. J. R. Davies (Ed.), The Materials Information Society, Metals Park, USA.

- [8] Santos Sanchez. E, "Comportamiento Térmico de aleaciones de aluminio de la serie 2XXX sinterizadas". Universidad Carlos III de Madrid, Departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica. Leganés, Abril de 2011.
- [9] Hufnagel.W, " Manual del Aluminio", Vol. 1, Segunda edición, Editorial Reverté S.A,2004.
- [10] Polmear I. J., Light alloys, metallurgy of the light metals (1988) 265-267.
- [11] Cárdenas F. J, Díaz del castillo. F, "LECTURAS PARA INGENIERÍA No. 23, SUPERALEACIONES", Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de estudios superiores Cuautitlán, Departamento de Ingeniería, Laboratorio de tecnología de materiales, Cuautitlán Izcalli, Edo. de México 2015.
- [12] Rebak .R.B, "Aleaciones de Niquel", GE Global Research, Schenectady, NY,2013.
- [13] Agarwal D.C, "Nickel and Nickel Alloys", In Uhlig's, Corrosion Handbook, ed. Wiston Revie, NY, 2000.
- [14] "www.Specialmetals.com", Technical Information Specific Alloys, Huntington, WV, 2015.
- [15] Rebak .R.B, Dillman .J.R, Crook . P, Shawver .C.V.V, "Corrosion behavior of Nickel Alloys in wet hydrofluoric acid", Materials and corrosion,Vol 52, N°4, 2001.
- [16] The international Nickel company, Corrosion and Engineering Bulletin Ceb-5, Inco, New York, USA,1968.
- [17] Takisawa Y, Sekine I, "Stress corrosion cracking phenomena on Ni-Mo alloys in high temperature non aqueous solution", Paper 355, Corrosion/85, NACE, Houston, USA, 1985.
- [18] Szklarska. S, Rebak R.B, "Stress corrosion cracking of alloy 600 in high temperature aqueous solution: influencing factors, mechanisms and models", In

control of corrosion of the secondary side of steam Generators, eds, RW Staehle, JA Gorman, AR McIlree, 223-257, NACE, Houston, TX, 1996.

[19] Roger C.R, “ The Superalloy: Fundamentals and application”, ed. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 2008.

[20] Gaona Tiburcio C, Zambrano Robledo P, Martínez Villafañe A, Almeraya Calderón F. Corrosión en la industria aeroespacial. En Valdez Salas B, & Schorr Wiener M (Eds.). Corrosión y preservación de la infraestructura industrial. pp. 33-48. Barcelona, España: OmniaScience; 2013.

[21] Tesch A. “Stress-Corrosion Cracking and its prevention in Space Applications”, European Space Agency (esa), 11th International Fatigue Congress, Melbourne, 2014.

[22] Johnson, R. E., “Apollo experience report: The problem of stress-corrosion cracking”, NASA Lyndon B. Johnson Space Center, Houston, TX, United States, 1973.

[23] Dawson, J.L.; “Electrochemical Noise Measurements for Corrosion Applications Electrochemical Noise Measurement: The Definitive In-Situ Technique for Corrosion Applications” , Electrochemical Noise Measurements for Corrosion Applications, pp 3-35, ASTM, West Conshohocken, PA, 1996.

[24] Genescá J., “Técnicas Electroquímicas para el Control y Estudio de la Corrosión, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química, México, 2002.

[25] Botana . J., Aballe. A., Bárcena M.M.; Ruido Electroquímico: Métodos de Análisis; Universidad de Cadiz, Septem Ediciones, España, 2002.

[26] Eden D.A., Electrochemical Noise- The first two octaves, Corrosion 98, Paper 386, NACE, Houston, USA, 1998.

[27] <http://cache.olympus-ims.com>, “DELTA Premium: Especificaciones: analizador XRF portátil”, DELTA_Premium_ES_A4_201508, P/N: 920-261-ES Rev. B, 2015.

- [28] ASTM International, "ASTM E3-11: Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens", 2011.
- [29] ASTM International, "ASTM E407 - 07 Standard Practice for Microetching Metals and Alloys", 2007.
- [30] ASTM International, "ASTM E8 / E8M - 15a Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials", 2012.
- [31] ASTM International, "ASTM G 129-13 Standard Practice for Slow Strain Rate Testing to Evaluate the Susceptibility of Metallic Materials to Environmentally Assisted Cracking", 2013.
- [32] McIntyre D. R., Kane, R. D., and Wilhelm, S. M., "Slow Strain Rate Testing for Materials Evaluation in High Temperature H₂S Environments", Corrosion Journal, 44 (12), DOI: 10.5006/1.3584966.1988.
- [33] Oldani, C.I, Aguirre, L.I, Manzini, R. "Características microestructurales de la aleación AA6061 repujada". Revista Materia, v. 13, n. 3, pp. 553 – 559, 2008.
- [34] Castillo M., Villa G., Vite M., Palacios F., Hernández L.H., Urriolagoitia G., "Estudio del comportamiento mecánicometalúrgico de aleación inconel 600 y estelita, Instituto Politécnico Nacional, Distrito Federal, México Científica, vol. 9, núm. 1, pp. 13-22, 2005.
- [35] Hibbeler R.C., "Mecánica de Materiales", Pearson Education, Sexta Edición, ISBN 970-26-0654-3.2006.
- [36] Malo Tamayo J.M., Chavarín Uruchurtu J., "Técnicas Electroquímicas para el Control y Estudio de la Corrosión", Facultad de Química UNAM, México D.F., "Capitulo" La Técnica de Ruido Electroquímico Página 91 ISBN: UNAM 970-32-0540-2, 2003.

