

## Caracterización de la Degradación Microestructural en Álabes de Turbinas de Aleación INCONEL® X-750 por Microscopía Electrónica de Barrido

Márquez, Ángel<sup>1</sup>

Instituto Universitario de Tecnología de Maracaibo  
[marquez.angel@gmail.com](mailto:marquez.angel@gmail.com)

Chaparro, Luis<sup>2</sup>

Instituto Universitario de Tecnología de Maracaibo  
[luischapa10@gmail.com](mailto:luischapa10@gmail.com)

Recibido: 14/06/2018  
Aceptado: 16/07/2018

### RESUMEN

El presente artículo resultado de una investigación de carácter tecnológico, describe usando Microscopía Electrónica de Barrido (MEB), la microestructura degradada de los álabes de turbina de aleación INCONEL® X-750, como consecuencia del servicio que prestan. Para esto se hizo una amplia búsqueda, recuperación, análisis e interpretación de datos obtenidos y registrados de distintas fuentes e investigadores tales como Allen y Viswanathan (1989), Camperos y otros. (2009), así como la experiencia de los autores durante los años 2011 al 2013 en el análisis metalúrgico o metalografía por MEB de quince (15) muestras tomadas de distintas zonas de cinco (5) álabes fabricados con INCONEL® X-750 provenientes de tres (3) turbinas distintas cada una con diferentes horas y condiciones de servicio cada muestra. El análisis y descripción de las microestructuras observadas en las muestras, permitió caracterizar la microestructura degradada o envejecida al hacerse evidente los cambios producidos por el servicio en la morfología de la fase gamma prima, los carburos y otros precipitados, así como la presencia de daños como grietas, que caracterizan éste envejecimiento. Estas imágenes y su descripción muestran los cambios microestructurales asociados a las condiciones de servicio lo que permite una mejor comprensión del mecanismo de degradación que ocurre. También podrían ser usadas como material de referencia a la hora de evaluar en empresas la condición de los alabes de turbina fabricados con esta superaleación y como material de apoyo en algunas unidades curriculares del Programa Nacional de Formación en Ingeniería de Materiales Industriales del Instituto Universitario de Tecnología de Maracaibo (IUTM) u otras instituciones de educación en el área de ingeniería.

**Palabras clave:** álabe de turbina; degradación de microestructura; INCONEL® X-

<sup>1</sup> Profesor Instructor del Instituto Universitario de Tecnología de Maracaibo desde 1994 hasta la actualidad. Venezuela

<sup>2</sup> Profesor Agregado del Instituto Universitario de Tecnología de Maracaibo desde 2007 hasta la actualidad. Venezuela

750.

## **Characteritation of microestructural degradation in turbines blades of alloy INCONEL™ X-750 by scanning electronic microscopy**

### **ABSTRACT**

The present article as a resut of an investigation of technological character, describes by means of scanning electronic microscopy (SEM), degraded microstructural in turbine´s blades of alloy INCONEL™ X-750 as a result of its service. For this, an extensive search, recovery, analysis and interpretation of data obtained and registered from different sources and researchers from authors as Allen. & Viswanathan (1989), Camperos & others. (2009), and authors own experience obtained between 2011 to 2013 in metallurgical analysis or metallography using (SEM) of fifteen samples taken from different areas of five blades manufactured in INCONEL™ X-750 from three different turbines each one of them with different hours and conditions of service. The describing and analysis of the observed samples microestructures, allowed to characterize the degraded or aged microstructure by became evident the changes observed in the samples produced by the service, in the morphology of the gamma-prime phase, the carbides and other precipitates, as well as the presence of damages such as cracks; that characterize microestructural degradation or aged experienced by service of the gas turbine´s blades manufactured of above mentioned superalloy. This images and its description show the microestructural changes associated to service condition allowing a better understandig of degrading process. Its images also could be uses as reference material at the time of evaluate in companies the condition of turbines´s blades manufactured with this superalloy and also as support material in some curricular units of the National Training Program in Industrial Materials Engineering and other engineering education universities.

**Keywords:** Turbine blade; microstructure degradation; INCONEL™ X-750.

### **Introducción**

Las turbinas constituyen hoy en día en el mundo entero según Giampaolo (2006), el medio tecnológico más adecuado para transformar, la energía de los fluidos líquidos o gaseosos: agua, vapor y aire caliente, en energía mecánica

rotativa, para entre muchos otros usos: impulsar los generadores de electricidad, comprimir el gas extraído de los yacimientos petrolíferos, transportarlo y/o reinyectarlo en los pozos de extracción de petróleo. Solamente en nuestro país, Petróleos de Venezuela S.A. (PDVSA) cuenta para éste propósito en sus operaciones con más de doscientas (200) turbinas a gas.

En dichas turbinas según Allen y Viswanathan (1989), los álabes permiten el proceso de conversión de la energía térmica que se le ha agregado al fluido, a energía mecánica en forma de un movimiento rotativo de alta velocidad; al direccionar primero el aire frío a la entrada y luego el aire caliente que sale de una cámara de combustión hasta la salida de la turbina, exponiendo los mismos por tanto, a extremas condiciones de operación, tanto por los elevados esfuerzos mecánicos como por el agresivo ambiente de gases de combustión a alta presión y elevada temperatura que soportan. Todo lo anterior, hace que los álabes sean considerados los componentes más críticos y limitantes del tiempo de vida útil de una turbina.

De tal forma que para poder operar en las extremas condiciones ya descritas, de acuerdo con Reed (2006), los álabes de turbina son fabricados en aleaciones de alto rendimiento o desempeño también llamadas superaleaciones, las cuales poseen una elevada resistencia mecánica y a la fluencia a altas temperaturas, estabilidad de fase y una gran resistencia a la corrosión y a la oxidación. El elemento base de éstas superaleaciones típicamente es el níquel y/o el cobalto en solución sólida con otros elementos como el titanio, el aluminio y el cromo, los cuales propician la formación de una estructura metalúrgica o microestructura susceptible de endurecerse por precipitación con el tratamiento térmico adecuado, lo cual permite desarrollar las excelentes características o propiedades de las superaleaciones.

Por su parte, Camperos, S y otros (2009), afirman que la microestructura

típica de estas superaleaciones así obtenidas, está constituida inicialmente por una matriz austenítica cúbica de cara centrada en solución sólida o gamma ( $\gamma$ ) que se fortalece por la formación y precipitación de fases secundarias tales como gamma prima ( $\gamma'$ ) y carburos (MC) a través del tratamiento térmico inicial. Luego, durante la prestación del servicio a esfuerzos altos y temperaturas elevadas, a pesar de la estabilidad de las microestructuras de estas superaleaciones, la misma se degrada o envejece con la cual se afectan adversamente las propiedades de resistencia mecánica y se desarrolla la termofluencia que propicia la formación de las grietas, lo cual disminuye el tiempo de vida útil o de servicio de los álabes.

Conocer pues, el estado de la microestructura de los álabes de turbina, según Urdaneta (2011), es vital para establecer si hay o no degradación de la microestructura, y poder estimar o determinar aproximadamente el tiempo de vida útil de los mismos y por tanto, decidir si los álabes aún están en condiciones de seguir operando, requieren de un retratamiento térmico para reacondicionar o rejuvenecer la estructura, o si es necesario, el eventual reemplazo de los mismos, todo lo cual redundaría en la reducción de los costos del ciclo de vida de éstos críticos y costosos componentes.

Esta degradación de la microestructura o envejecimiento, puede evaluarse en ciertas superaleaciones utilizando microscopía óptica (MO) con algunas limitaciones, y en otras solamente es posible utilizando microscopía electrónica, bien sea de barrido (MEB) o de transmisión (TEM); mediante la observación y caracterización de la forma, tamaño y distribución (morfología) de la microestructura de la superaleación y que usualmente incluye las fases responsables del mecanismo de refuerzo de la matriz, por los precipitados de fase secundaria tales como gamma prima ( $\gamma'$ ) y carburos complejos (MC).

Éste artículo tecnológico recopila datos pocos comunes, por cuanto el Instituto Universitario de Tecnología de Maracaibo (IUTM), no cuenta con un

microscopio electrónico de barrido (MEB), fundamental en la formación académica y de investigación en varias unidades curriculares del Programa Nacional de Formación (PNF) de ingeniería de materiales industriales (IMI), a lo cual se suma la confidencialidad o hermetismo con la que las pocas personas y empresas que conocen del tema manejan la información sobre el mismo.

Por tal motivo fue necesario realizar una amplia búsqueda, recuperación, análisis e interpretación de los datos obtenidos y registrados de distintas fuentes e investigadores tales como Miglin.(1989), Urdaneta (2011) y otros, reseñados en las fuentes consultadas referente a la aleación INCONEL® X-750, particularmente su microestructura degradada o envejecida por el servicio que prestan los álabes de turbinas a gas fabricados con ésta superaleación. Además de estos datos, los autores aportan su experiencia durante los años 2011 al 2013, en el análisis metalúrgico o metalografía por MEB de quince (15) muestras de ésta superaleación, suministradas para su evaluación por una empresa dedicada al mantenimiento de turbinas a gas.

Dichas muestras tomadas de distintas zonas de cinco (5) álabes fabricados en INCONEL® X-750 y provenientes de tres (3) turbinas distintas, cada una con diferentes horas de servicio; permitió caracterizar tanto la microestructura sin degradar, como la microestructura degradada. Parte de los informes de resultados de éstas evaluaciones presentadas a la empresa, se incluyen de forma limitada en ésta investigación.

El objetivo de este artículo es presentar una serie de imágenes de microestructuras, que describen y explican, los cambios observados en las muestras de los alabes con distintas horas de servicio y hacen evidente el cambio en la morfología de la fase gamma prima, los carburos y otros precipitados así como la presencia de daños como grietas; que caracterizan la degradación microestructural.

Las imágenes de microestructuras así obtenidas, permiten caracterizar la degradación microestructural de los álabes, y pueden ser usadas como material de apoyo en algunas unidades curriculares del Programa Nacional de Formación en Ingeniería de Materiales Industriales, en empresas interesadas en evaluar la condición de los álabes de turbina fabricados con esta superaleación e incluso al aumentar el conocimiento de este fenómeno para desarrollar métodos para el control, la prevención y mitigación de este mecanismo.

## **Materiales y Métodos**

Para completar esta investigación tecnológica, se hizo una amplia búsqueda en bibliotecas físicas y virtuales que incluyeron trabajos de grado, artículos de revistas y reportes o informes sobre el tema objeto de la investigación y reseñadas en las fuentes de información, también se contactó y consultó a varios expertos en el tema.

Se usaron además, de forma parcial los informes elaborados y presentados, por los autores antes señalados y colegas docentes de la Universidad del Zulia (LUZ) expertos en MEB, a una empresa de la zona dedicada al mantenimiento de turbinas a gas. La empresa contrató estos servicios con el propósito de evaluar el estado de la microestructura o condición de unas muestras tomadas de álabes de turbinas a gas sacadas de servicio entre los años 2011 al 2013; turbinas que para el momento se encontraban en proceso de mantenimiento en las instalaciones de la empresa.

Los informes presentados a la empresa, cuyos resultados parciales forman como se explicó, parte de ésta investigación, consisten en el análisis metalúrgico o metalografía por MEB para evaluar la degradación microestructural de las muestras por la presencia, distribución, forma y tamaño de las fases presentes; así como la presencia de daños como grietas; para de ésta manera establecer si los álabes aún estaban en condiciones de seguir operando, requerían de un retratamiento térmico

para reacondicionar o rejuvenecer la estructura o si era necesario el eventual reemplazo de los mismos.

La evaluación mediante la comparación y el contraste de las diferentes microestructuras disponibles, incluyendo las de los informes presentados a la empresa, además de las descripciones recopiladas de dichas microestructuras permitieron establecer los cambios ocurridos desde la estructura sin degradar hasta la microestructura degradada.

Asimismo, los cambios observados y registrados en las fases presentes en las microestructuras se describen en términos de tipo, distribución y tamaño es decir morfología de las mismas; como se dijo tanto para una microestructura sin degradar, como para otra degradada; especialmente lo concerniente a la morfología de gamma prima ( $\gamma'$ ) y los carburos (MC) que caracterizan a ésta aleación y similares superaleaciones base níquel endurecibles por precipitación.

Finalmente, luego de observar y comparar las distintas microestructuras provenientes de las múltiples condiciones de servicio encontradas en las muestras debido a la manera que fueron tomadas las mismas, de diferentes zonas o partes (parte inferior, media y superior) de cada uno de los cinco (5) álabes, los que a su vez fueron tomados de tres (3) turbinas diferentes, también con diferentes horas y condiciones de servicio, se seleccionaron las microestructuras en mejores condiciones con el fin de identificar o caracterizar los cambios observados.

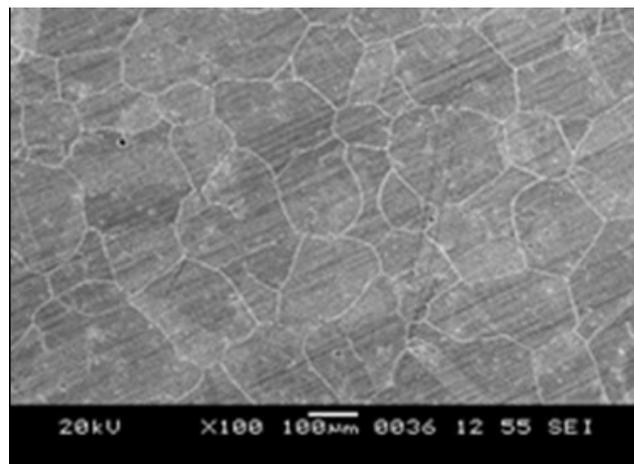
## **Resultados**

Producto de ésta investigación se presentan una serie de microestructuras obtenidas mediante (MEB) de muestras de álabes de turbinas a gas con distintas horas y condiciones de servicio fabricados en la superaleación INCONEL™ X-750. Esta evaluación de la microestructura de la superaleación consiste en observar y caracterizar, la forma, tamaño y distribución (morfología) de las fases presentes y

que usualmente incluyen además de la matriz constituida por la fase gamma ( $\gamma$ ) los otros periodos responsables del mecanismo de refuerzo de la matriz por los precipitados de etapa secundaria, tales como gamma prima ( $\gamma'$ ) y carburos complejos (MC).

En este sentido, al usar estas microestructuras como referencia, los estudiantes y docentes de distintas unidades curriculares que forman la malla de la carrera de Ingeniería de Materiales Industriales (IMI) del Programa Nacional de Formación (PNF) del Instituto Universitario de Tecnología de Maracaibo (IUTM), serán capaces de identificar los elementos claves que permiten conocer la condición o estado, de ésta u otras microestructuras similares, es decir realizar una evaluación del deterioro o degradación que sufre la microestructura de este tipo de álabes durante su servicio. Se presentan a continuación una serie de microestructuras, correspondiendo la primera a de la matriz constituida por austenita o fase gamma ( $\gamma$ ).

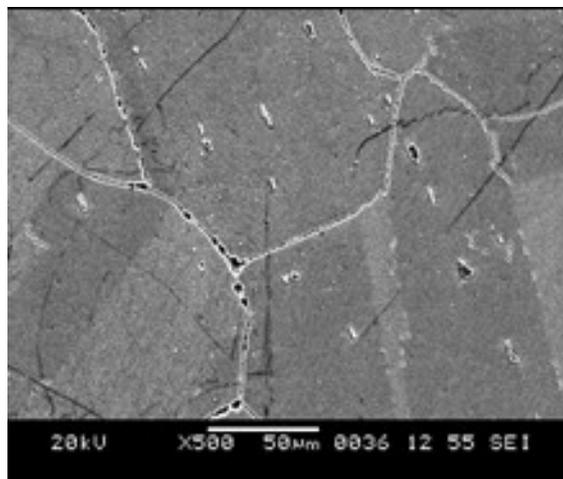
**Figura 1. Matriz de solución sólida gamma ( $\gamma$ ) con carburos precipitados apenas visibles en la matriz, no se observa gamma prima ( $\gamma'$ ). 100X.**



**Fuente: Campos y Márquez (2011)**

A pesar del alto porcentaje de elementos de la aleación tales como: hierro, cobalto, cromo, molibdeno y tungsteno, y los tratamientos térmicos que buscan precipitar y estabilizar carburos finos  $M_6C$  y  $M_{23}C_6$  a partir de los MC en la matriz; a estos aumentos no es posible resolver u observar los carburos finos ni gamma prima ( $\gamma'$ ) como se evidencia. Apenas se observan algunos carburos precipitados de distintos tipos y tamaños, que por efectos del triple tratamiento recibido en su condición inicial o sin degradar es lo que se busca en ésta aleación, es decir, precipitar los carburos y que pasen luego a formar solución sólida. Por otra parte, como afirma Vander Voort, G. (2004), no es posible a bajos aumentos como los aquí empleados resolver los mismos. A continuación imagen de la misma zona de la microestructura anterior pero a 500X.

**Figura 2. Fase gamma ( $\gamma$ ) con presencia de carburos de distintos tipos  $M_6C$  y carburos  $M_{23}C_6$  precipitados en los límites de granos y en la matriz. No se observa el fino precipitado intermetálico gamma prima ( $\gamma'$ ). 500X.**



**Fuente: Campos y Márquez (2011)**

A 500X se sigue observando la matriz de gamma ( $\gamma$ ) y los carburos precipitados, apenas visibles en la micrografía anterior a 100X se empiezan a identificar aunque no es posible aún resolverlos o identificarlos plenamente debido

a que la estructura al no estar degradada los mismos son extremadamente finos. Sigue sin poder observarse tampoco el fino precipitado intermetálico gamma prima ( $\gamma'$ ) para lo que es necesario aumentos del orden de 10.000X como se observará más adelante. A continuación imagen de una microestructura a 5.000X de una zona de límites de grano donde si es posible identificar o caracterizar el tipo de carburos presente en los mismos cuando el material no está degradado (Ver Figura 3) para mayores detalles de la morfología de los carburos.

**Figura 3. Detalle de la zona de los límites de granos en un punto triple donde se pueden caracterizar los carburos precipitados en los mismos: A)  $M_6C$  B)  $M_{23}C_6$  comienza a observarse en la matriz gamma ( $\gamma$ ). el fino precipitado intermetálico gamma prima ( $\gamma'$ ). 5.000X.**



**Fuente: García (1995)**

Los aumentos de la imagen a continuación son desconocidos pero muestran una zona de límites de grano donde es posible caracterizar o identificar con mejor detalle que en la foto anterior los carburos  $M_{23}C_6$  globulares precipitados en los límites de grano y también se aprecia mejor que en la microestructura anterior el precipitado intermetálico de gamma prima ( $\gamma'$ ) fino, precipitado en la matriz gamma ( $\gamma$ ).

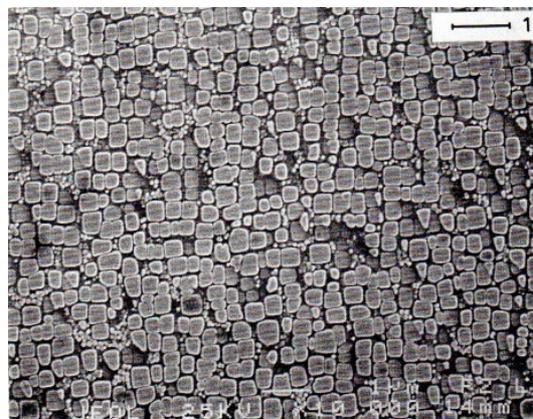
**Figura 4. Detalle de carburos  $M_{23}C_6$  globulares precipitados en los límites de grano. Se observa gamma prima ( $\gamma'$ ) esférico y cuboide, precipitado en la matriz gamma ( $\gamma$ ). Aumentos desconocidos.**



**Fuente: MIGLIN (1989)**

Finalmente como resultado se presenta una microestructura enteramente formada por gamma prima ( $\gamma'$ ) en solución sólida en gamma ( $\gamma$ ) en sus dos formas típicas sin degradar. La primera y más deseable es la primaria de forma cuboide pequeña y la otra la otra es la secundaria de forma esférica en la matriz gamma ( $\gamma$ ).a 10.000X.

**Figura 5. Gamma prima ( $\gamma'$ ), bimodal precipitado en la matriz gamma ( $\gamma$ ). Partículas cubicas primarias y partículas secundarias esféricas a 10.000X.**

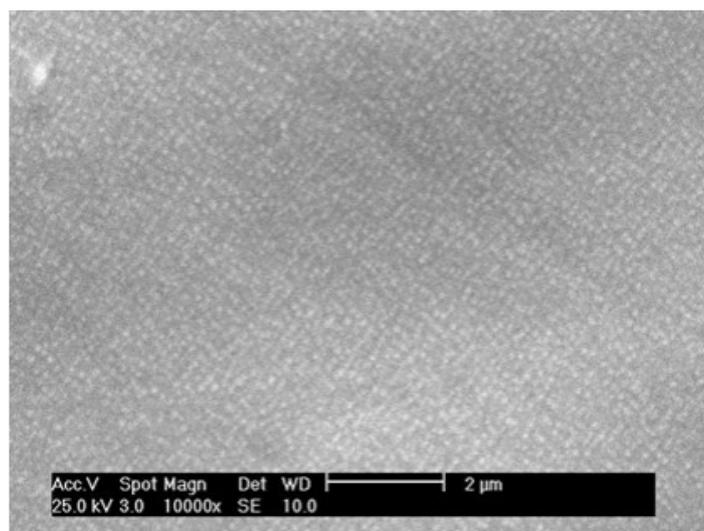


**Fuente: García (1995)**

Cuanto mayor sea la cantidad y por tanto menor el tamaño de esta fase en la microestructura, menor será también el grado de deterioro de la misma. ASM International Handbook Committee. (1990). Hay que recordar que el calor es una forma de energía que permite el crecimiento de los granos o fases y siendo que el propósito de éstos álabes exponerlos por el servicio que prestan a elevadas temperaturas para aprovechar esta energía, con el tiempo es inevitable que la microestructura se degrade, es decir crezcan los carburos y migren hacia los límites de grano y gamma prima ( $\gamma'$ ) por consiguiente, también crezca.

Por otra parte, gamma prima ( $\gamma'$ ) paulatinamente cambia su forma inicial cuboide a esférica para finalmente unirse a sus vecinos por coalescencia, tal como fue establecido por los autores reseñados anteriormente. Cuanto mayor sea la cantidad y por tanto menor el tamaño de la gamma prima ( $\gamma'$ ) precipitado en gamma ( $\gamma$ ) observado en la microestructura, menor será también el grado de deterioro de la misma u horas de servicio del álabe.

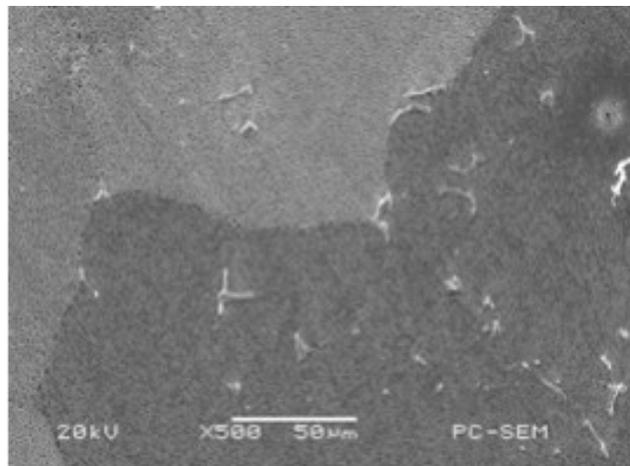
**Figura 6. Detalle de gamma prima ( $\gamma'$ ), precipitado en la matriz gamma ( $\gamma$ ).  
10.000X.**



**Fuente: Campos y Márquez (2011)**

En las imágenes siguientes se puede observar que las fases presentes tienen forma, tamaño y distribución (morfología) distintas a las de las imágenes anteriores correspondientes a microestructuras sin degradar. La degradación observada en las microestructuras a continuación, se pone de manifiesto cómo se explicó en las imágenes precedentes, en primer lugar por la pérdida de la forma cúbica del precipitado principal ( $\gamma'$ ) y su crecimiento y coalescencia; en segundo lugar por la formación y crecimiento del carburo secundario  $M_{23}C_6$  a lo largo de los límites de grano y la formación de carburos secundarios  $M_6C$  a partir de los carburos  $M_{23}C_6$ . A continuación imagen a 500X que muestra los carburos precipitados tanto en la matriz gamma ( $\gamma'$ ) como en los límites de grano de estos.

**Figura 7. Matriz de solución sólida gamma ( $\gamma$ ) con carburos precipitados claramente visibles en la matriz y bordes de grano también gamma prima ( $\gamma'$ ). 500X.**



**Fuente: Campos y Márquez (2011)**

Al comparar la morfología de los carburos presentes en la imagen anterior (Figura 7) con los observados en la figura 2 correspondiente a una microestructura sin degradar, también a quinientos aumentos (500X); salta a la vista la diferencia

entre el tamaño, la forma y la distribución, incluso la cantidad de los carburos presentes tanto en la microestructura sin degradar como en la degradada, y esto como se expuso anteriormente a solo 500X.

Los carburos que predominan en la figura 7, se observan alargados o formando cadenas, tanto en la matriz como en los límites de grano; a diferencia de cuando no están degradados que tienden a ser globulares. Este alargamiento, caracteriza el deterioro de los carburos. Véase también las imágenes de las Figura 3 y 4 correspondiente a detalles de los carburos sin degradar.

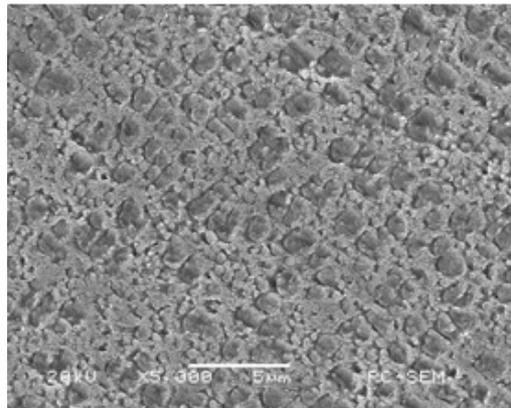
Por otra parte, en la misma figura 7 a 500X, se presenta otro elemento clave para identificar las estructuras con degradación, puesto que se observa aunque sin resolver, gamma ( $\gamma'$ ). Esto por el tamaño de grano mayor que poseen las microestructuras con degradación por el crecimiento sufrido como consecuencia de las horas de servicio.

Las microestructuras a distintos aumentos que siguen, muestran el deterioro progresivo de la fase gamma prima ( $\gamma'$ ), caracterizado inicialmente por la pérdida de la fina forma cuboide obtenida a través del triple tratamiento térmico; el engrosamiento, crecimiento o aumento del tamaño de esta seguido de la coalescencia y finalmente la formación de ( $\gamma'$ ) en bloques amorfos, tal como se presenta en la figura siguiente:

Al comparar la morfología de la fase gamma prima ( $\gamma'$ ), presente en la imagen siguiente (Figura 8) a cinco mil aumentos (5.000X) con los observados en las figura 5 y 6 a diez mil aumentos (10.000X) correspondientes a una microestructura sin degradar; salta a la vista no solo la diferencia entre el tamaño, la forma y la distribución, y por tanto en la cantidad de la fase gamma prima ( $\gamma'$ ) entre ambas; todo esto, elementos claves para identificar la degradación de ( $\gamma'$ ). Basta recordar para tener una idea del crecimiento sufrido por la estructura sin degradar que para

poder observar y resolver esta se requieren 10.000X mientras que en la microestructura degradada bastan 5.000X para igual propósito.

**Figura 8. Detalle de gamma prima ( $\gamma'$ ) grueso, en la matriz gamma ( $\gamma$ ). 5.000X.**

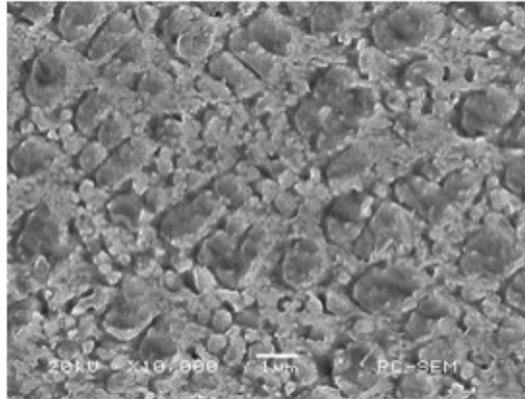


**Fuente: Campos y Márquez (2011)**

La fase gamma prima ( $\gamma'$ ) observada en la figura 8, se caracteriza por ser gruesa o de mayor tamaño de grano que las de las microestructuras sin degradar correspondientes a las figuras 5 y 6, pero también se caracteriza por ser amorfa debido a la pérdida de la fina forma cuboide y esferoidal observadas en las mismas figuras citadas.

La figura 9 a continuación muestra un detalle de la misma gamma prima ( $\gamma'$ ) de la microestructura anterior (Figura 8) pero a 10.000X. En ésta imagen se observa la coalescencia que sufre el fino precipitado inicial de gamma prima de forma cuboide o esferoidal que caracteriza las microestructuras sin degradar hasta ésta gamma prima ( $\gamma'$ ) amorfa característica de microestructuras degradadas.

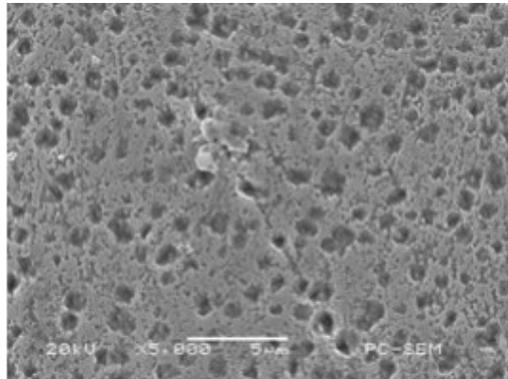
**Figura 9. Detalle de gamma prima ( $\gamma'$ ) sin forma típica o amorfo, se observa coalescencia de los mismos. 10.000X.**



**Fuente: Campos y Márquez (2011)**

Las microestructuras a distintos aumentos que siguen, muestran la degradación de la fase gamma prima ( $\gamma'$ ) en su etapa final, la permanencia a elevadas temperaturas por periodos de tiempo largos ha permitido la coalescencia de casi todas las partículas de ( $\gamma'$ ) que terminan formando bloques amorfos masivos o de gran tamaño con espacios entre los mismos. A continuación imagen de microestructura degradada a 5.000X donde puede observarse gamma ( $\gamma'$ ) en bloques masivos amorfos.

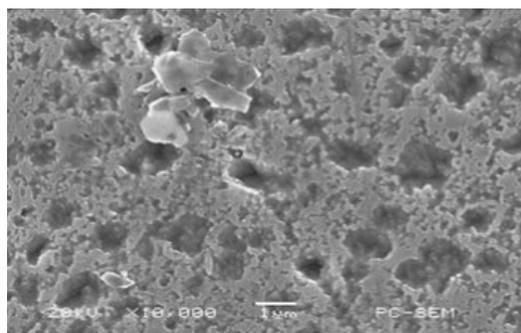
**Figura 10. Fase gamma prima ( $\gamma'$ ) degradada totalmente amorfa a 5.000X.**



**Fuente: Campos y Márquez (2011)**

La microestructura que se muestra a continuación (Fig. 11), corresponde a la misma zona de la microestructura anterior (Figura 10), pero a 10.000X. Puede observarse; la pérdida completa de la morfología inicial deseada o sin degradar de gamma ( $\gamma'$ ); como consecuencia de largas horas de exposición al servicio. También se observa mejor los espacios entre éstos bloques amorfos de gamma ( $\gamma'$ ) degradada; y el inicio a partir de un carburo de una grieta.

**Figura 11. Detalle de gamma prima ( $\gamma'$ ) amorfa y carburo precipitado a 10.000X. Igual que figura anterior (Figura 10).**



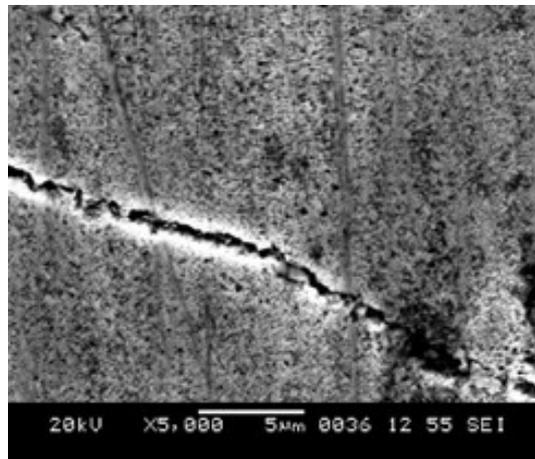
**Fuente: Campos y Márquez (2011)**

Las últimas cinco microestructuras (Figuras 7 a 11), permiten caracterizar a distintos aumentos, la degradación progresiva de la fase ( $\gamma'$ ), esto trae como consecuencia, que al disminuir la cantidad de partículas en la matriz, queda mayor

espacio disponible para el deslizamiento de las dislocaciones, y por ende, menor cantidad de obstáculos para evitar su movimiento. Esto a su vez ocasiona una pérdida de dureza y mayor deformación, que se refleja en el decrecimiento de las propiedades mecánicas del material y finalmente su falla.

La Figura 12 que se presenta a continuación, es la última microestructura seleccionada para permitir observar otra característica de una aleación INCONEL™ X-750 con la microestructura degradada; esta vez ya en su fase final, cuando aparecen las grietas intergranulares o en los límites de granos, lo cual finalmente causan la falla del álabe; producto del decrecimiento de las propiedades mecánicas del material como se explicó antes, como consecuencia de la exposición prolongada a elevados esfuerzos y temperatura de los álabes por el servicio que prestan.

**Figura 12. Detalle una grieta intergranular con los bordes de granos empobrecidos o libres de gamma prima ( $\gamma'$ ). 10.000X.**



**Fuente: Campos y Márquez (2011)**

## Conclusiones

Las turbinas constituyen hoy en día el medio tecnológico más adecuado para transformar, la energía de los fluidos líquidos o gaseosos: agua, vapor y aire

caliente, en energía mecánica rotativa para entre otros usos, impulsar los generadores de electricidad. Asimismo, los alabes de las turbinas son considerados los componentes más críticos de las mismas al estar expuestos a extremas condiciones de operación, que hacen que los mismos sean, además de los elementos más costosos los limitantes del tiempo de vida útil de éstas.

Por lo antes expuesto, los fabricantes de turbinas a gas, año tras año mejoran los materiales que utilizan en la fabricación de los componentes de las mismas, haciéndolos cada día más resistentes a las elevadas temperaturas y condiciones corrosivas en la que prestan servicio, así también como a la termofluencia, esto permite a su vez aumentar la eficiencia y la potencia de las turbinas.

En buena parte lo anterior ha sido posible entre otras cosas, por una mejor comprensión de los mecanismos de corrosión y degradación de las superaleaciones sufridas por los álabes durante su operación, especialmente el aumento del conocimiento sobre dicho fenómeno y los cambios microestructurales asociados a éste, lo que ha permitido, desarrollar métodos para el control, la prevención y mitigación de dichos mecanismos.

Conocer pues, el estado de deterioro microestructural de los álabes de turbina, es vital para poder extender el tiempo de vida útil de los mismos y reducir los costos del ciclo de vida de éstos componentes críticos. En el país, solamente la industria petrolera y petroquímica nacional cuentan entre sus equipos, con cerca de doscientas (200) turbinas a gas, necesarias para cumplir una serie de operaciones, entre las que caben destacar: producir vapor para la reinyección en pozos, transportar gas o calentar productos y subproductos y en menor escala generar energía eléctrica.

Si a la cantidad de turbinas antes mencionadas, sumamos las utilizadas por la industria eléctrica nacional para la generación de electricidad, nos encontramos que en el país tenemos un inventario de turbinas que sobrepasa las doscientas

(200) unidades, la mayoría en operación continúa por la naturaleza del servicio que prestan. La cifra estimada antes mencionada, no incluye la flota aérea civil y militar, cuya operación no es continua igualmente por la naturaleza del servicio que prestan.

Mantener operativas esta cantidad de turbinas, podría implicar una enorme inversión de divisas en momentos que las circunstancias económicas del país obligan a racionalizar cada día más el uso de las mismas, especialmente cuando éstas son requeridas para el reemplazo de dichos componentes, los cuales no se fabrican en el país y por tanto deben ser importados.

Es por las razones antes expuestas, que evaluar el estado de deterioro de los álabes de turbina resulta imperativo para la economía del país, por los ahorros que se pueden generar al extender el tiempo de vida útil de éstos componentes críticos y reducir además, los costos del ciclo de vida de los mismos, por la exposición durante su operación a extremas condiciones combinadas de esfuerzos y temperaturas elevadas en un ambiente oxidante y corrosivo.

Por otra parte, resulta necesario desarrollar tecnología propia, para romper la dependencia tecnológica, en áreas que por su importancia y valor estratégico así lo requieren, tales como, la industria del petróleo, la del gas y la de generación de energía eléctrica. El conocimiento de cómo evaluar el estado de deterioro de la microestructura de los álabes de turbina mediante microscopía electrónica de barrido (MEB), resulta pues no solo necesario por razones económicas y estratégicas, sino también, de enorme ayuda para el estudio, así como la comprensión de los materiales y la corrosión; áreas de conocimientos básicos en todas las carreras de ingeniería, particularmente en la de ingeniería de materiales industriales, metalurgia y mecánica.

La presente investigación permitió recopilar datos pocos comunes por una parte por cuanto el Instituto Universitario de Tecnología de Maracaibo (IUTM), no cuenta con un microscopio electrónico de barrido, fundamental en la formación

académica y de investigación en varias unidades curriculares del Programa Nacional de Formación (PNF) en ingeniería de materiales industriales (IMI).

Por otra parte, el IUTM no cuenta con bibliografía en temas especializados del área de materiales, tales como: comportamiento mecánico de materiales, análisis de fallas, superaleaciones, termofluencia y materiales compuestos y avanzados. Tampoco, hay convenios para el acceso a redes de universidades o entes especializados en temas de ingeniería de materiales.

Todo lo anterior redundaba en una muy limitada información disponible sobre el tema, especialmente en el idioma español, a lo cual se suma la confidencialidad o hermetismo con la que las pocas personas y empresas que conocen del tema manejan la información sobre el mismo.

Se presenta entonces éste artículo, con el propósito de continuar el trabajo iniciado en el país por otros investigadores, con el objetivo de que se convierta en gran aporte y referencia de trabajos similares para aquellos interesados en el área.

## **Referencias consultadas**

- Allen, J. y Viswanathan, R. (1989). **Gas Turbine Blade Life Assessment and Repair Guide**. Research Report prepared to Electric Power Research Institute (EPRI). Palo Alto, CA. USA.
- ASM International Handbook Committee. (1990). **ASM Handbook Volume 1, Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys**. Ninth Edition. ASM International. Ohio. USA.
- Camperos, S y otros. (2009). **Determinación de la Degradación Microestructural de Álabes de Turbina mediante la Técnica de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)**. Trabajo Especial de Grado para optar al Título de Magister Scientiarum en Metalurgia y Ciencia de los Materiales en la Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela. Extraído el 10 de agosto de 2011 desde <https://saber.ucv.ve/jspui/handle/123456789/2178>
- Campos, W. y Márquez, A. (2011). **Análisis Metalúrgico de álabes de primera etapa de turbina GE 5001**. Informe preparado a Empresa TurboCare, C.A.

Maracaibo, Venezuela.

Campos, W y Márquez, A. (2011). **Metalografía por Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) a Muestras de álabes de Turbina**. Informe preparado a Empresa TurboCare, C.A. Maracaibo, Venezuela..

Campos, W y Márquez, A. (2012). **Evaluación por microscopía electrónica de barrido a muestras de álabes de turbina W-101**. Informe preparado a Empresa TurboCare, C.A Maracaibo, Venezuela.

García, H. (1995). **Effects of the Laser Beam Powder Welding Process on the Hardenability of Superalloy IN-738LC Deposition Welds**. Thesis submitted to Michigan State University of the requirements for the degree of Master of Science. No Publicado.

Giampaolo, A. (2006). **Gas turbine handbook: principles and practices**. Third Edition. Fairmont Press, Inc. Lilburn. USA.

Miglin, M.(1989). **Microstructure and Stress Corrosion Resistance of Alloys X-750 y 718 in LWR Environments**. Research Report prepared to Electric Power Research Institute (EPRI). Palo Alto, CA. USA.

Reed, R. (2006). **The Superalloys: Fundamentals and Applications**. First Edition. Cambridge University Press. Cambridge, USA.

Vander Voort, G. (2004). **ASM Handbook Volume 9: Metallography and Microstructures**. Ninth Edition. ASM International. Ohio. USA.

Urdaneta, N. (2011). **Manual técnico para el análisis y restauración de las superaleaciones de componentes críticos utilizados en turbinas**. Trabajo de Grado para optar al título de Especialista en Corrosión y Materiales. Instituto Universitario de Tecnología de Maracaibo. }

©2018 por el autor. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia de Creative Commons Reconocimiento – No Comercial 4.0 Internacional (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).