

# Efectos de las cargas térmicas variables en los Sistemas de Barrera Térmica

## Effects of variable thermal loads in Thermal Barrier Coatings

Andrés Ignacio Díaz Cano, Luis Tobón<sup>1</sup>

Fecha de recepción: 27 de mayo de 2013

Fecha de aceptación: 20 de julio de 2013

### Resumen

Los sistemas de barrera térmica (TBC) han sido una solución para incrementar las temperaturas de operación de máquinas térmicas como turbinas para generación eléctrica, motores de combustión interna y demás aplicaciones de alta sollicitación. Las características de las cargas térmicas a las que son sometidos los sistemas TBC determinan factores claves como el crecimiento de óxidos y la propagación de grietas. El presente estudio propone el diseño y construcción de un prototipo que permite desarrollar experimentos que simulan las cargas térmicas variables en condiciones reales de operación, dando la posibilidad de medir las temperaturas de la capa protectora cerámica y el sustrato durante la prueba. Adicionalmente, es posible recrear el gradiente térmico entre dichos componentes. Finalmente, empleando análisis y procesamiento digital de imágenes se observa el crecimiento de óxidos y comportamiento de grietas para una probeta sometida a 64 ciclos térmicos.

**PALABRAS CLAVE:** Sistemas de barrera térmica, ciclo térmico, porosidad, análisis y procesamiento digital de imágenes.

---

<sup>1</sup> Grupo de tribología y superficies. Facultad de Minas Universidad Nacional de Colombia sede Medellín [aidiaz@unal.edu.co](mailto:aidiaz@unal.edu.co), [letobon@unal.edu.co](mailto:letobon@unal.edu.co)

## Abstract

Thermal barrier coatings have been a solution to increase service temperatures in thermal machines as electric generation turbines, internal combustion engines and other high solicitation applications. Thermal loads features applied to TBC systems determine key factors as oxides growing and crack propagation. This study propose design and construction of a prototype which allows the developing of experiments simulating real services, variable thermal loads and the measurement of a protective ceramic layer, Top coat, and substrate temperature during the test. Additionally, is possible to recreate the thermal gradient between these components. Finally, using image processing and analysis of oxide growth and cracks propagation were analyzed in a sample brought under 64 cycles.

**KEYWORDS:** Thermal barrier coatings, thermal cycling, porosity, processing and digital image analysis

## 1. Introducción

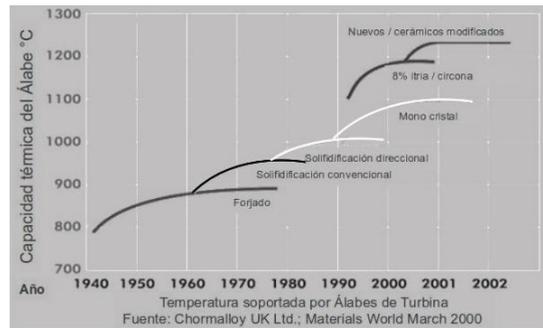
Una de las grandes necesidades que afronta la sociedad moderna es la creciente demanda de energía eléctrica, recurso suministrado mediante plantas nucleares, hidroeléctricas, térmicas o fuentes de energía renovable. Colombia, gracias a sus notables riquezas hídricas, abastece la energía eléctrica de manera satisfactori. Sin embargo, en regiones costeras en donde los recursos no son óptimos se plantea la alternativa de generación mediante centrales térmicas, las cuales contribuyen con alrededor del 30% del sistema de suministro eléctrico nacional <sup>[1]</sup>.

Las turbinas empleadas en dichas centrales son máquinas térmicas que producen trabajo de manera proporcional a la deferencia de temperaturas del proceso que en ellas tiene lugar. De este modo, la generación eléctrica será proporcional, entre otros muchos factores, a la temperatura máxima de operación <sup>[2]</sup>. Las condiciones de servicio a altas temperaturas afectan la integridad y el desempeño mecánico de los componentes de la turbina <sup>[3]</sup>.

A lo largo de la historia se han desarrollado aplicaciones tecnológicas para lograr que esos componentes puedan trabajar a mayores temperaturas. La Figura 1 muestra el incremento de temperatura a lo largo de los años, según las diferentes tecnologías empleadas en los álabes de las turbinas a gas.

Una solución para mantener mayores temperaturas en las turbinas ha sido el uso de Sistemas de barrera térmica (TBC, por sus siglas en inglés) <sup>[1-3]</sup>.

Ellos constan de dos capas principales: (i) una capa de anclaje (BC), constituida por elementos metálicos, y (ii) una capa protectora cerámica (TC). Actualmente las capas son depositadas empleando una variedad de técnicas, entre las que se destacan: *Air Plasma Spray (APS)*, *high velocity oxy-fuel (HVOF)*, *Electron beam physical vapor deposition (EB-PVD)*[5].



**Figura 1.** Desarrollo de materiales para álabes de turbinas a través del tiempo<sup>[4]</sup>.

En Colombia, las centrales termo-generadoras son sistemas para generación secundaria o de apoyo, lo que se traduce en arranques acelerados y tiempos de operación cortos y poco uniformes. Estas condiciones de operación generan cargas térmicas variables en los sistemas TBC, las cuales varían respecto a las temperaturas de operación estables y tiempos prolongados presentes cuando las plantas termo-generadoras son la principal fuente de abastecimiento eléctrico<sup>[1]</sup>.

Adicional a las turbinas para generación eléctrica, los sistemas de barrera térmica son empleados en aplicaciones como motores de combustión interna, turbinas de aeronaves y componentes aeroespaciales, las que requieren también temperatura variable en tiempos cortos<sup>[6]</sup>.

La vida útil de los sistemas TBC es una variable clave en el correcto funcionamiento de una amplia gama de máquinas térmicas. Se han desarrollado diversos estudios donde se sugiere que los mecanismos responsables de la falla de los Sistemas de barrera térmica varían según las condiciones de operación, ya sean cargas térmicas estables y prolongadas en el tiempo, o cargas térmicas cíclicas y de menor duración<sup>[7]</sup>. El presente estudio propone el diseño y construcción de un prototipo que permite estudiar los efectos del ciclo térmico en Sistemas de barrera térmica.

## 2. Materiales y métodos

### 2.1. Probetas empleadas

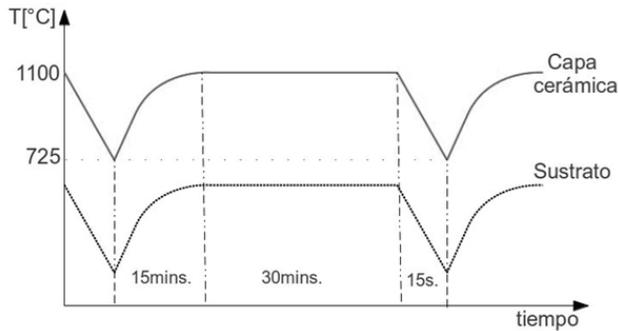
Un sustrato de súper aleación Inconel 625 fue recubierto con una capa de anclaje tipo NiCoCrAlY mediante la técnica de HVOF. Por su parte, la capa externa de zircona estabilizada con itria al 7% fue depositada mediante la técnica de APS.

### 2.2. Ciclo térmico

La prueba propuesta pretende aportar a la comprensión de los fenómenos térmicos en los sistemas TBC, al someterlos a cargas térmicas variables y analizar las modificaciones, motivando el desarrollo de futuros materiales o cambios en las técnicas de deposición. El presente no es el primer intento para desarrollar este tipo de pruebas térmicas cíclicas. Bentele *et al.* [8] desarrollaron ciclos de un minuto de calentamiento por combustión de gas a alta presión y tres minutos de enfriamiento a temperatura ambiente. Por otra parte, investigadores de los laboratorios Toyota construyeron en 1979 una máquina para probar muestras cilíndricas de varios materiales, entre los cuales se encontraban barras de zircona estabilizadas con itria; las calentaron por medio de resistencias eléctricas y las enfriaron por inmersión de las muestras en agua [9]. En 1995, Jian *et al.* [10] investigaron el daño producido en la capa externa de un recubrimiento compuesto de zircona estabilizada con itria al 8%, al calentarlo hasta 1.250°C por cinco minutos, empleando láser de CO<sub>2</sub> y refrigerado por convección forzada hasta temperatura ambiente.

La Figura 2 muestra el perfil teórico de temperatura que se busca obtener durante el desarrollo de la prueba.

Sesenta y cuatro ciclos fueron recreados con el propósito de simular las cargas térmicas debidas a arranques rápidos en turbinas reales. Cada ciclo comprendió quince minutos de calentamiento desde temperatura ambiente, treinta minutos de sostenimiento a 1.100°C y quince segundos de enfriamiento hasta 725°C.



**Figura 2.** Perfil de temperatura teórico de la capa cerámica, 64 ciclos térmicos.

### 2.3. Prototipo

El presente estudio propone el uso de resistencias eléctricas como medio de calentamiento, a diferencia de láseres o equipos de combustión. Esto con el objetivo de obtener una distribución homogénea de temperatura sobre la superficie de la capa cerámica (13 mm<sup>2</sup>) y simular la dinámica térmica de la turbina.

A pesar de que los equipos láser alcanzan elevadas temperaturas, las tasas de calentamiento son altamente elevadas,  $\sim 241^{\circ}\text{C/s}$ , alejándose de las presentes en las turbinas<sup>[11]</sup> y, por la tanto, no son empleadas en este estudio.

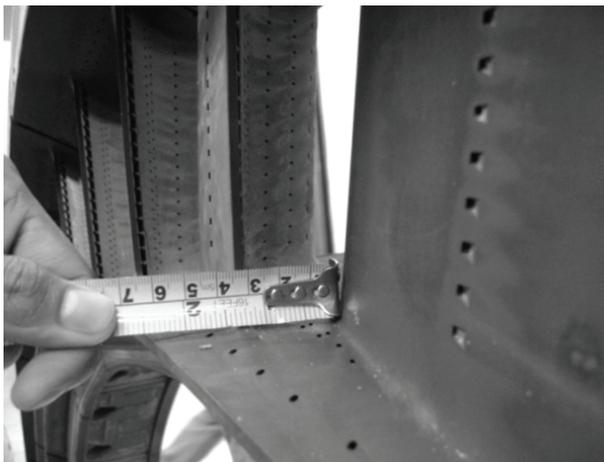
Por su parte, los equipos con métodos de calentamiento que emplean combustión superan las temperaturas presentes en la turbina. Una llama de acetileno puede alcanzar una temperatura máxima de  $\sim 3.480^{\circ}\text{C}$ <sup>[12]</sup>, adicionalmente se presenta una distribución de temperatura poco homogénea sobre la probeta, dejando una brecha entre las temperaturas de prueba y sus respectivos efectos y daños en la muestra.

Como antesala a la configuración aquí propuesta se desarrollaron pruebas empleando un equipo de oxiacetileno. Infortunadamente, la distribución de temperatura sobre la superficie del recubrimiento no pudo ser controlada a satisfacción, debido a las consecuencias anotadas antes.

De esta manera, las resistencias eléctricas ofrecen la posibilidad de analizar diversas regiones de la muestra, 13 mm sobre un corte transversal, luego de someterlo a pruebas en donde el error en estado estacionario de la temperatura fue del  $\pm 1\%$ .

Con el objetivo de simular condiciones extremas de operación, el prototipo ofrece una tasa calentamiento de hasta  $0.8^{\circ}\text{C}/\text{s}$  con una temperatura máxima de  $1.200^{\circ}\text{C}$ . La tasa de enfriamiento empleada fue de  $\sim 25^{\circ}\text{C}/\text{s}$ .

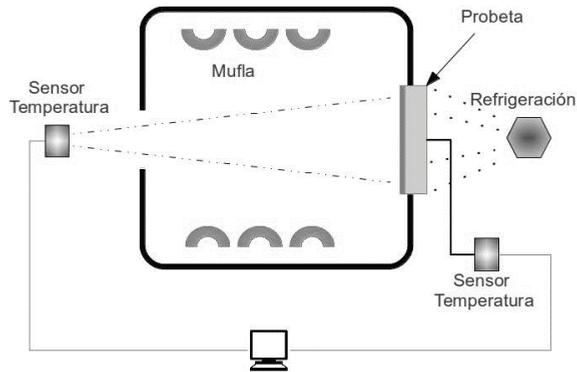
La Figura 3 muestra orificios de refrigeración presentes en una turbina, los cuales permiten que componentes como los álabes se encuentren refrigerados.



**Figura 3.** Orificios de refrigeración, turbina.

La disposición de la probeta adentro del prototipo posibilita mantener el gradiente térmico entre la capa cerámica, TC, y el sustrato durante la prueba, recreando de la manera más fiel las condiciones reales de operación (ver sección 3.1, Figura 6). Diferenciándose, de esta manera, de las pruebas tradicionales de ciclo térmico donde el sustrato y recubrimiento son sometidos a pruebas bajo la misma temperatura, es decir, toda la probeta comparte una temperatura común.

En la Figura 4 se muestra una representación esquemática del equipo desarrollado. El enfriamiento se realizó por convección forzada de aire.



**Figura 4.** Condiciones térmicas para pruebas cíclicas de sistemas tbc. Prototipo.

Es importante anotar que la máquina propuesta reproduce cargas térmicas de operación de las turbinas, dejando de lado los efectos mecánicos, daños erosivos por transmisión de momentum y demás fenómenos.

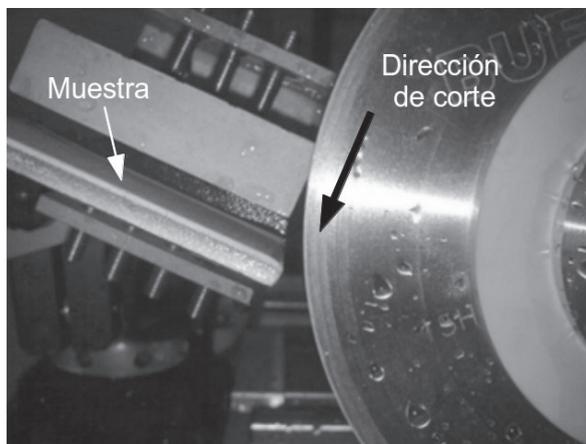
Con el objetivo de tener un mayor control en las variables del experimento, las temperaturas de la capa cerámica (TC) y del sustrato pueden ser medidas durante el proceso de prueba.

## 2.4. Preparación metalográfica

A diferencia de los procedimientos metalográficos tradicionales, la preparación de los recubrimientos TBC presenta una dificultad adicional al contener los componentes cerámico y metálico de manera simultánea. Defectos como grietas pueden ser solucionados por pulimiento, montaje o corte. Teniendo en cuenta los anteriores aspectos, y con base en las recomendaciones de la literatura [13-15], las probetas fueron seccionadas empleando una cortadora de precisión Buehler ISOMET 5000 y un disco serie 15 HC de trece centímetros de diámetro; los parámetros de velocidad de giro y avance fueron 3.000 RPM y 6 mm/min, respectivamente.

Los cortes se hicieron sometiendo el recubrimiento a compresión, con lo que se evitó esfuerzos que pudieran promover el crecimiento de grietas dentro del TBC o, incluso, desprendimiento del mismo. La Figura 5 muestra la disposición para el corte de las probetas. Las probetas fueron montadas en resina tipo baquelita, empleando el equipo Simplimet 3000.

Para evitar que el recubrimiento se alterara durante el proceso, láminas metálicas fueron posicionadas en la superficie de la barrera térmica.



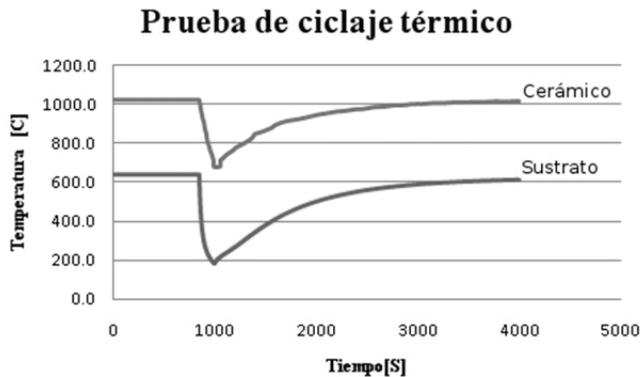
**Figura 5.** Montaje para corte de sistemas de barrera térmica.

El pulido requerido para revelar una microestructura confiable se basó en recomendaciones de la norma ASTM E 1920-03 <sup>[16]</sup> y literatura relacionada <sup>[13-15]</sup>, implementando esmeriles de diamante de diferentes tamaños, y sílice coloidal como abrasivo final. Aunque el pulido se desarrolló de manera manual, se utilizaron lastres sobre las probetas con el objetivo de proporcionar una presión de  $\sim 35$  KPa.

### **3. Pruebas y resultados**

#### **3.1. Perfiles térmicos recreados**

La Figura 6 muestra la curva obtenida durante el experimento. Ilustra el gradiente térmico entre la capa cerámica y el sustrato. También se evidencia la disminución de la temperatura causada por la refrigeración. Finalmente, la temperatura de la TC se incrementa lentamente para estabilizarla de nuevo a  $\sim 1100^{\circ}\text{C}$ .



**Figura 6.** Curva de temperaturas reales del recubrimiento y sustrato, obtenidas durante pruebas de ciclos térmicos.

### 3.2. Efectos de la aplicación de ciclos térmicos en los sistemas TBC

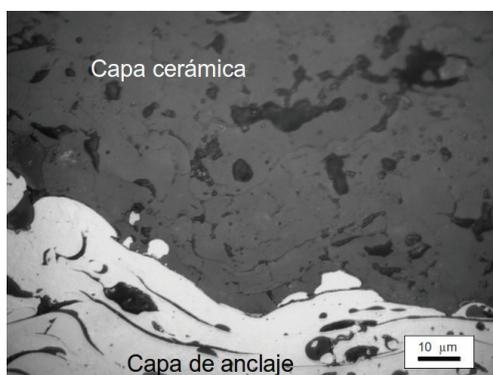
Uno de los fenómenos más comunes y referenciados en la literatura es el crecimiento de óxidos en el interior de los sistemas TBC. El contenido de aluminio presente en la capa de anclaje (el cual posibilita una mejor adherencia de la capa cerámica), junto con el oxígeno del ambiente, a alta temperatura, proporcionan condiciones propias para la formación de alúmina ( $Al_2O_3$ ), óxido de formación predominante en los Sistemas de barrera térmica estudiados [17]. Esta capa de óxido es comúnmente denominada TGO [18].

La formación de TGO es un proceso difusivo activado térmicamente y dependiente del tiempo de exposición al que es sometido el sistema. Diversos autores han demostrado cómo el progresivo crecimiento de la TGO puede generar el desprendimiento del Sistema de barrera térmica, afectando de manera directa la integridad de la turbina [18], [20]. Micrografías ópticas de la sección transversal de una probeta sin tratamiento térmico, Figura 7, y de la probeta de 64 ciclos, Figura 8, muestran cómo los ciclos térmicos promueven el crecimiento de la capa de óxido. En la Figura 7 es visible como en la intercara, entre la BC (zona clara) y la TC (zona oscura), no se presentan óxidos a diferencia de la Figura 8, donde es evidente la presencia de la TGO (región oscura).

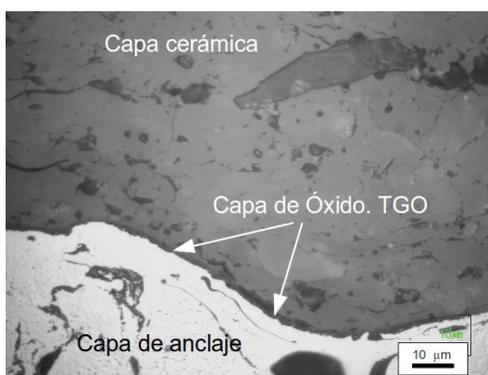
Con el objetivo de determinar el crecimiento de la TGO debido a ciclos térmicos, se emplearon análisis y procesamiento digital de imágenes para

medir el espesor en diferentes secciones de la muestra. Buscando garantizar una adecuada muestra se tomaron sesenta datos, obteniendo así un espesor promedio de  $1.37 \pm 0.3 \mu\text{m}$ .

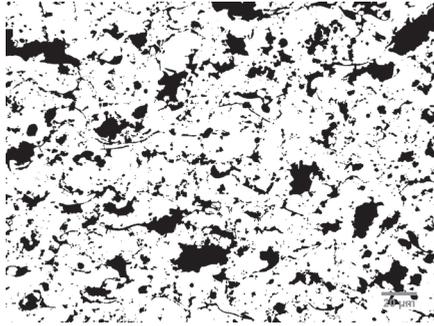
Otra variable que determina el posible desprendimiento es el comportamiento de las grietas dentro de los Sistemas de barrera térmica. Al igual que para la TGO, se emplearon análisis y procesamiento digital de imágenes, estudiando el comportamiento de las grietas antes y después de ciclos térmicos. La Figura 9 muestra la morfología del sistema TBC, después de un proceso de binarización, con el objetivo de aislar poros y grietas. La Figura 10 muestra el resultado de la separación de grietas para la probeta sin tratamiento térmico.



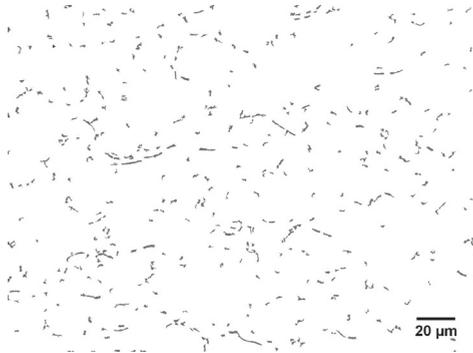
**Figura 7.** Micrografía óptica de probeta sin tratamiento térmico, 200x. No se presentan óxidos en la intercarra cerámica/capa de anclaje.



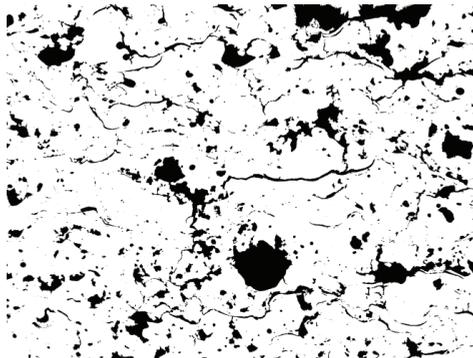
**Figura 8.** Micrografía óptica de probeta luego de 64 ciclos, 200x. Se presentan óxidos, tgo, en la intercarra capa cerámica/capa de anclaje.



**Figura 9.** Morfología de poros y grietas probeta sin tratamiento térmico, imagen binaria, 500x.



**Figura 10.** Tratamiento digital de imágenes para revelar grietas. Probeta sin tratamiento térmico, 500x.



**Figura 11.** Grietas de probeta sometida a 64 ciclos, imagen binaria 500x.

Análogamente, se desarrolló el mismo procedimiento para la probeta sometida a 64 ciclos térmicos. Los respectivos resultados son mostrados en la Figura 11 y la Figura 12.

Para determinar de manera más precisa el comportamiento de las grietas debido a los ciclos térmicos se cuantificaron parámetros de porcentaje, cantidad de grietas, al igual que su tamaño. El porcentaje de grietas se tomó como la relación de zonas blancas y negras en veintiséis micrografías sometidas a un tratamiento análogo a los de la Figura 10 y Figura 12.

La Tabla 1 presenta información de las grietas encontradas. La cantidad de grietas presenta una reducción cercana al 50%, lo cual es soportado por las Figuras 10 y 12. Esto se debe a que la temperatura genera un proceso de sinterización en el interior del recubrimiento <sup>[21]</sup>, lo cual sinteriza los poros de menor tamaño generados en el proceso de aplicación. De manera simultánea el crecimiento de la TGO y la redistribución de esfuerzos promueven el incremento en la longitud de las grietas.



**Figura 12.** Tratamiento digital de imágenes para revelar grietas en probeta a 64 ciclos, 500x.

**Tabla 1.** Efecto de la aplicación de ciclos térmicos en grietas y poros de sistemas TBC.

Probeta	Grietas [%]	Cantidad de Grietas	Longitud [ $\mu\text{m}$ ]
Sin tratamiento térmico	$1.33 \pm 0.40$	$198.46 \pm 54.54$	$817.04 \pm 245.79$
64 ciclos	$1.51 \pm 0.46$	$102.26 \pm 56.73$	$934.14 \pm 287.61$

## 4. Conclusiones

El equipo propuesto logró recrear, de manera satisfactoria, las cargas térmicas presentes en una turbina, y desarrollar pruebas que permitan estudiar el efecto térmico en los SBT. Las cargas térmicas sometieron el recubrimiento a esfuerzos que aumentaron el porcentaje de grietas y la longitud de las mismas. Sin embargo, la cantidad disminuyó a raíz de procesos difusivos propios de la sinterización.

Se logró desarrollar un tratamiento metalográfico adecuado con el objetivo de identificar y analizar elementos claves dentro de los recubrimientos TBC, como grietas y capas de óxido.

El procedimiento y análisis aplicado a las imágenes de la sección transversal del recubrimiento permiten cuantificar y cualificar, de manera precisa, el comportamiento de elementos como grietas para diferentes ciclos o tiempos de exposición.

## 5. Agradecimientos

Los autores del trabajo expresan sus agradecimientos a los laboratorios de Tribología y Superficies, y de Caracterización de Materiales, de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.

## 6. Referencias

- [1] COMPES. Importancia estratégica del proyecto de generación termoeléctrica a carbón, Gecelca 3. Bogotá.
- [2] Jorge Félix Fernández. Ciclo brayton, turbinas a gas. Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional de Argentina, Mendoza, mayo 2009.
- [3] Carlos G. Levi. Emerging materials and processes for thermal barrier systems Current Opinion in Solid State and Materials Science 8 (2004) 77–91.
- [4] Chromalloy. World, M. (2000). UK.
- [5] Lech Pawlowski. The science and engineering of thermal spray coatings. Second Edition. John Wiley & Sons, Ltd. ISBN: 978-0-471-49049-4. 2008.
- [6] Robert A. Miller, Dongming Zhu. Thermophysical and Thermomechanical Properties of Thermal Barrier Coating System, NASA/TM—2000-210237.
- [7] Z. A. Chaudhury, G. M. Newaz, S. Q. Nusier, T. Ahmed, R. L. Thomas. (1999) Chronological evaluation of interfacial damage in TBC due to thermal cycling journal of materials science 342475 – 2481.

- [8] M. Bentele, C. L. (1952). Thermal shock test on gas turbine materials.32-38: Aircraft Eng., volXXIV, No. 276.
- [9] N. Kamiya, O. k. (1979). Prediction of thermal fatigue life of ceramics. 573-582: Journal of material science 14.
- [10] C. Y. Jian, T. H. (1995). Thermal shock and fatigue resistance evaluation of functionally grade coating for gas turbine blades by laser heating method. Composites Engineering, Vol. 5, No. 7, 879-889.
- [11] Bin Zhou, KlodKokini. Effect of preexisting surface cracks on the interfacial thermal fracture of thermal barrier coatings: an experimental stud. Surface & Coatings Technology 187 (2004) 17–25.
- [12] Charles E. Baukal, Jr. Heat transfer in industrial combustion, CRC Press Boca Raton New York 2000.
- [13] Davis, J. (2004). Handbook of thermal spray technology. Materials Park, OH, USA: Thermal Spray Society, ASM international.
- [14] Geels, K. (2007). Metallographic and Materialographic Specimen Preparation, light microscopy, image analysis, and hardness testing. West Conshohocken, PA 19428-2959: ASTM international.
- [15] Voort, G. F. (1984). Metallography: Principles and practice. ASM international.
- [16] Standard guide for Metallographic preparation of thermal sprayed coatings ASTM E 1920–03 (Reapproved 2008). ASTM international.
- [17] J. A. Haynes, M. K. Ferber, W. D. Porter, E. D. Rigney. (1999). Characterization of alumina scales formed during isothermal and cyclic oxidation of Plasma-Sprayed TBC Systems at 1.150 °C. Oxidation of Metals, Vol. 52, No. ½.
- [18] A.G. Evans a, M.Y.He, J.W. Hutchinson. (2001). Mechanics-based scaling laws for the durability of thermal barrier coatings. Progress in Materials Science 46, 249-271, Pergamon.
- [19] A. Rabiei, A. G. EVANS. Failure mechanisms associated with the thermally grown oxide in plasma-sprayed thermal barrier coating. Actamaterialia. 48 (2000) 3963–3976.
- [20] W.R. Chen, R. Archer, X. Huang, and B.R. Marple. TGO Growth and crack propagation in a Thermal Barrier Coating, JTTEE5 17:858–864 DOI:10.1007/s11666-008-9251-81059-9630 © ASM International
- [21] F. Cernuschi, L. Lorenzoni, S. Ahmaniemi, P. Vuoristo, T. Mäntylä. (2005). Studies of the sintering kinetics of thick thermal barrier coatings by thermal diffusivity measurements Journal of the European Ceramic Society 25, 393–400.