

Análisis microscópico posterior a la combustión del material del inserto de la boquilla de un motor cohete en un propulsor sólido: resultados (Parte II)

Post-burn microscopic analysis of the material of the insert of the solid propellant rocket engine nozzle: results (Part II)

Análise microscópica pós-queima do material do inserto da tubeira de motor foguete a propelente sólido: resultados (Parte II)

Ronald Izidoro Reis ^I

Wilson Kiyoshi Shimote ^{II}

Christian Frederico de Avila Von Dollinger ^{III}

Luiz Cláudio Pardini ^{IV}

RESUMEN

La parte I de este trabajo presentó el procedimiento para la preparación de muestras y conceptos importantes, como la ablación en la boquilla del motor y también las protecciones térmicas ablativas y reirradiativas. En la parte II, (presentada en el presente trabajo), se realizó, en la condición posterior a la combustión, la caracterización por estéreo microscopía, microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido (MEV) del compuesto CRFC usado como un inserto en la boquilla del motor S43. El análisis de microscopía óptica, realizado en la región alrededor de la sección de la garganta, mostró que la erosión de la muestra era más pronunciada en la superficie que la observada en las regiones más alejadas del paso del flujo de gas. La microscopía electrónica de barrido, realizada en la región alrededor de la sección de la garganta, proporcionó un análisis más profundo de la morfología del material compuesto, permitiendo la identificación de detalles de las barras de refuerzo, como los filamentos de fibra de carbono y, en la matriz de carbono pirolítico, las diferentes láminas depositadas por CVD.

Palabras clave: Propulsión sólida. Material compuesto. Inserción de la boquilla. Inserto de CRFC.

ABSTRACT

In part I of this work the procedure of preparation of samples and important concepts were presented, such as ablation in the motor tubing and also that of ablative and re-radiative thermal protections. In part II, (presented in the this study), the characterization by stereo microscopy, optical microscopy and scanning electron microscopy (SNAM) of the CRFC composite used as an insert in the tubing of the S43 engine was performed in the post-burning condition. The analysis by optical microscopy, performed in the region around the throat section, showed that the erosion of the sample was more pronounced on the surface than that observed in the regions farther from the passage of the gas flow. The scanning electron microscopy, performed in the region around the throat section, provided a more in-depth analysis of the morphology of the composite material, allowing to identify details of the reinforcing rods, such as carbon fiber filaments and, in the pyrolytic carbon matrix, the different lamellae deposited by CVD.

Keywords: Solid propulsion. Composite material. Tubing Insert. CRFC Insert.

I. Instituto de Aeronáutica y Espacio – (IAE) – São José dos Campos/SP – Brasil. Doctor en Ingeniería Metalúrgica y de Minas por la Universidad Federal de Minas Gerais. Email: ronaldrir@fab.mil.br

II. Instituto de Aeronáutica y Espacio – (IAE) – São José dos Campos/SP – Brasil. Doctor en Ciencias Térmicas por École Nationale Supérieure de Mécanique et d'Aérotechnique - ENSMA França. Email: wilsonwks@fab.mil.br

III. Instituto de Aeronáutica y Espacio – (IAE) – São José dos Campos/SP – Brasil. Doctor en Ciencia e Ingeniería de Materiales por la Universidad Federal de São Carlos. Email: christiancfavd@fab.mil.br

IV. Instituto de Aeronáutica y Espacio – (IAE) – São José dos Campos/SP – Brasil. Doctor en Ciencia e Ingeniería de Materiales - University of Bath - Reino Unido. Email: pardinilcp@fab.mil.br

Recibido: 28/02/19

Aceptado: 19/06/19

Las siglas y abreviaturas contenidas en el artículo corresponden a las del texto original en lengua portuguesa.

RESUMO

Na parte I deste trabalho foram apresentados o procedimento de preparação das amostras e conceituações importantes, como a ablação na tubeira do motor e também a de proteções térmicas ablativas e reirradiativas. Na parte II, (apresentada no presente trabalho), foi realizada, na condição pós-queima, a caracterização por estêreo microscopia, microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura (MEV) do compósito CRFC usado como inserto na tubeira do motor S43. A análise por microscopia óptica, realizada na região em torno da seção da garganta, mostrou que a erosão da amostra foi mais acentuada na superfície do que aquela observada nas regiões mais afastadas da passagem do fluxo de gases. A microscopia eletrônica de varredura, realizada na região em torno da seção da garganta, proporcionou uma análise mais aprofundada da morfologia do material compósito, permitindo identificar detalhes das varetas de reforço, como, por exemplo, os filamentos de fibras de carbono e, na matriz de carbono pirolítico, as diferentes lamelas depositadas por CVD.

Palavras-chave: Propulsão sólida. Material compósito. Inserto de tubeira. Inserto de CRFC.

1 INTRODUCCIÓN

Las protecciones térmicas son componentes de los vehículos espaciales que tienen la función de proteger las estructuras externas, metálicas o compuestas, de las tensiones termomecánicas y los flujos térmicos durante todas las etapas del vuelo. Estas demandas termomecánicas y flujos térmicos pueden derivarse tanto de fenómenos aerotermodinámicos externos como de fugas internas al motor del cohete. El estado del arte de los Sistemas de Protección Térmica (Thermal Protection System- TPS) para aplicaciones aeroespaciales se basa en materiales ablativos intrínsecos y ablativos reirradiativos. Para los TPS que utilizan materiales ablativos intrínsecos, la disipación de energía térmica se produce por la pérdida de masa y el cambio de fase del material. Estos materiales deben tener: resistencia a altas temperaturas, resistencia a la erosión, al choque térmico y al impacto, así como baja conductividad térmica y alto calor específico (SILVA, 2009). Según Gonçalves (2008) y Silva (2011), en los TPS que utilizan materiales ablativos reirradiativos, la disipación de energía térmica se produce a través del retorno al medio ambiente en forma de radiación de parte de la energía absorbida del flujo externo, y el resto se conduce a las regiones internas del material (un mecanismo relativamente más simple que el de los materiales ablativos intrínsecos). Además, estos materiales reirradiativos tienen una gran emisividad ($\epsilon > 0,8$) y una baja tasa de erosión en condiciones extremas del flujo incidente, lo que permite proteger las estructuras durante un largo período de tiempo. En esta clase de

materiales se puede enumerar la familia de compuestos de carbono reforzados con fibras de carbono (CRFC), compuestos de matriz híbrida de carbono/carburo de silicio (C/SiC) y compuestos de fibra de carburo de silicio y matriz de carburo de silicio (SiC/SiC).

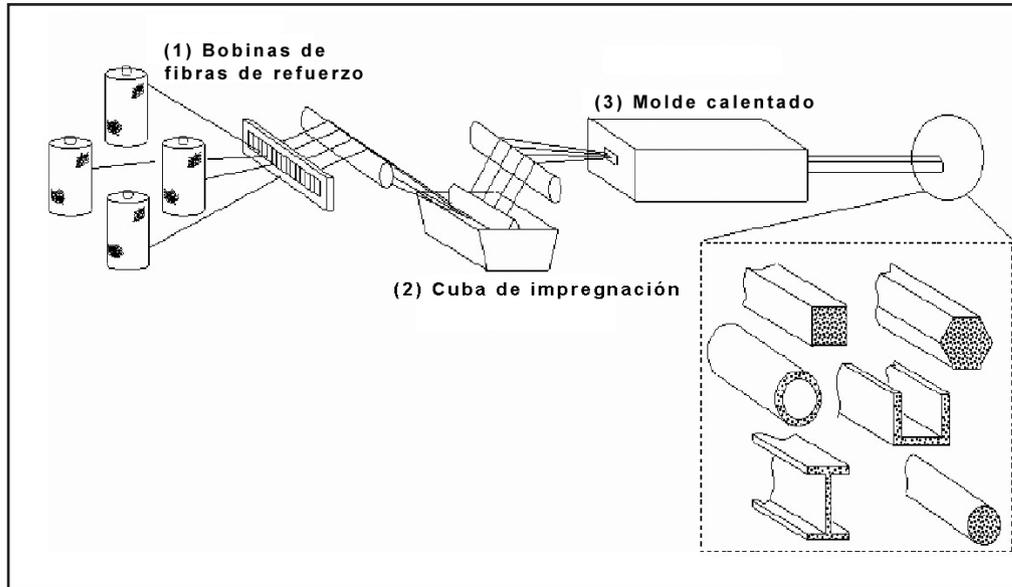
Ejemplos del uso de TPS en aplicaciones externas son los bordes de ataque, ojivas de reentrada y las envolturas de los tanques de combustible ubicados externamente a los vehículos espaciales. Las aplicaciones internas de TPS corresponden a insertos de boquilla de motor cohete (LEE, 1993; LI; HUANG; XU, 2017; RICCIO et al., 2017; SUTTON, 2006).

De acuerdo con Ribeiro, Gregori y Pardini (2008) el inserto de la boquilla del motor del cohete, típicamente representado por una boquilla de Laval, es un componente importante del sistema de propulsión de un vehículo de lanzamiento. En este subsistema, los gases resultantes de la combustión del propulsor alcanzan altas temperaturas (@ 2900°C) y son expandidos en la boquilla, por efecto de restricción en esta región, que tiene la función de propiciar el aumento de la velocidad de eyección (2500 m/s), para obtener el empuje deseado. Hasta el final de los años 50 los insertos de las boquillas de los motores de cohetes se fabricaban en grafito y tenían limitaciones en cuanto a las dimensiones y la uniformidad, es decir, los procesos de obtención de grafito ya no cumplían las geometrías y propiedades necesarias para las aplicaciones en motores de cohetes más grandes. En esta ocasión, los compuestos reforzados con fibra de carbono (CRFC), formados por matriz de carbono y fibras de carbono, vinieron a añadir importantes avances en la tecnología de preformas (arquitectura multidireccional de refuerzo) para compuestos. El uso de estas preformas permitió que la limitación de las dimensiones y de la geometría, y el uso de las fibras de carbono aseguró la resistencia mecánica y la tenacidad necesarias para garantizar un rendimiento satisfactorio del componente. Pardini, Gonçalves y Vieira (2002, p. 2163) citan que

[...] El número de direcciones de la preforma está directamente relacionado con la isotropía del material compuesto que se va a obtener, es decir, cuanto mayor sea el número de direcciones, más cerca de la isotropía estará el material.

Como la isotropía está directamente relacionada con el aumento de las direcciones de las fibras en la arquitectura de refuerzo, es habitual utilizar compuestos unidireccionales en forma de pernos o varillas que permiten la disposición del refuerzo en múltiples direcciones. Estos pernos o varillas se obtienen por el método de moldeo por pultrusión, como se ilustra en la Figura 1.

Figura 1 – Ejemplo esquemático del proceso de pultrusión para obtener perfiles y vigas de diferentes geometrías utilizando fibras unidireccionales de refuerzo.



Fuente: Levy Neto y Pardini (2016, p. 202).

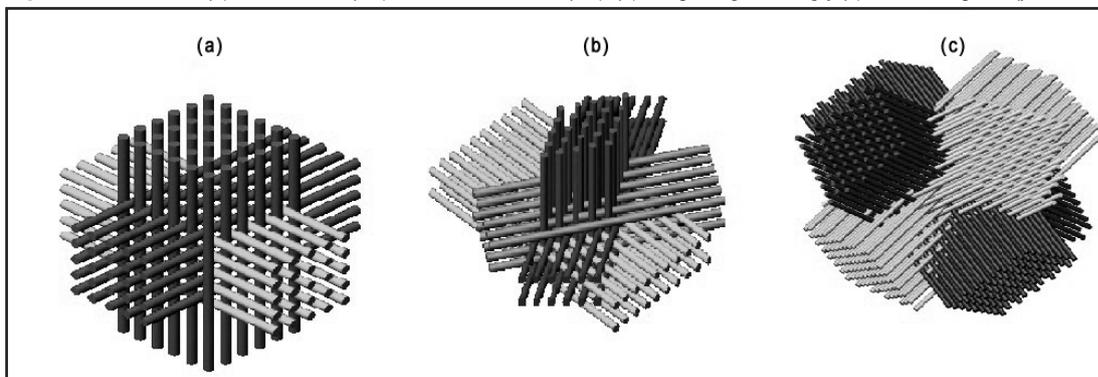
En este proceso, los cables de refuerzo en forma de mechas de fibra continua se impregnan en una cuba, donde la resina, previamente formulada y con la viscosidad adecuada, permite la impregnación. El parámetro de proceso más importante en este caso es la idoneidad del tiempo de gelificación de la resina, que debe ser estrictamente controlado, evitando el curado prematuro de la resina al entrar en el molde calentado. Después de la impregnación, el conjunto fibra/matriz polimérica entra en el molde, lo que dará una geometría al componente a obtener (LEVY NETO; PARDINI, 2016).

El proceso de pultrusión permite obtener, de forma continua, piezas compuestas con una geometría de sección transversal definida, como las formas circulares y hexagonales. De esta manera es posible obtener pernos o varillas delgadas de pequeño diámetro preestablecidos. Ribeiro (2006, p. 33) cita que “[...] el rango de diámetro adecuado para el uso de las preformas está entre 0,5

– 3,0 mm”. Estas varillas (pernos) corresponden a compuestos unidireccionales y, en los procesos de moldeo por pultrusión, tienen fracciones de volumen de fibra equivalentes al 65-70%.

Obteniendo los pernos o varillas es posible montar preformas con arquitectura de fibra multidireccional. Según Levy Neto y Pardini (2016, p. 155), tanto las estructuras con requisitos termoestructurales severos como las que requieren una mayor isotropía de propiedad pueden ser fabricadas con esta tecnología. En esta clase se agrupan las preformas tridireccionales ortogonales (3D), conforme muestra la Figura 2(a), preformas tetradireccionales (4D), en plano y piramidal, presentadas respectivamente en las Figuras 2(b) y (c), puede alcanzar hasta 11 direcciones diferentes (11D). Hay procesos modernos para obtener estas estructuras, pero implican altos costos debido a la inversión en equipo automatizado.

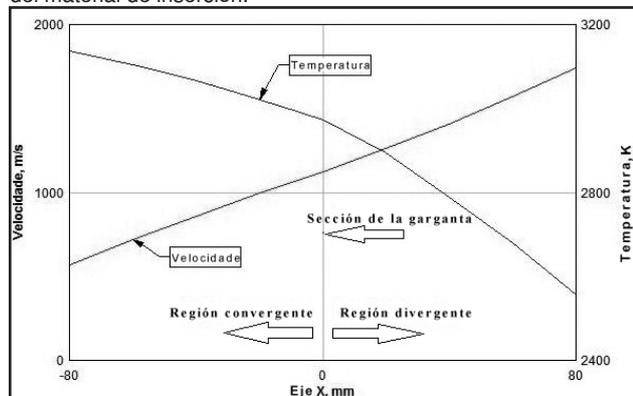
Figura 2 – Preformas: (a) tridireccional (3D), tetra-direccionales (4D); (b) ortogonal [Z, 60°,0°]; y (c) vértice-diagonal (piramidal).



Fuente: Levy Neto y Pardini (2016, (a) p.156; (b) e (c) p.157).

La variación del desgaste del material de inserción a lo largo del eje de salida del flujo de gas se produce debido a las diferencias en las características de temperatura y velocidad del flujo de gas, como se puede ver en los gráficos de la Figura 3.

Figura 3 – El perfil de temperatura y velocidad del gas a lo largo del material de inserción.



Fuente: El autor.

La Figura 3 muestra los perfiles de temperatura y velocidad del gas en las regiones convergentes y divergentes de la inserción de la boquilla. Se observa que tanto en la región convergente como en la divergente hay un aumento de la velocidad a lo largo de la longitud de la inserción desde las altas temperaturas ($\sim 3000\text{K}$) hasta las temperaturas cercanas al entorno. Entre las regiones convergentes y divergentes se encuentra la sección de la garganta, donde la combinación de alta presión, alta temperatura y alta velocidad de flujo sobre la superficie del material conduce a mayores efectos ablativos y erosivos.

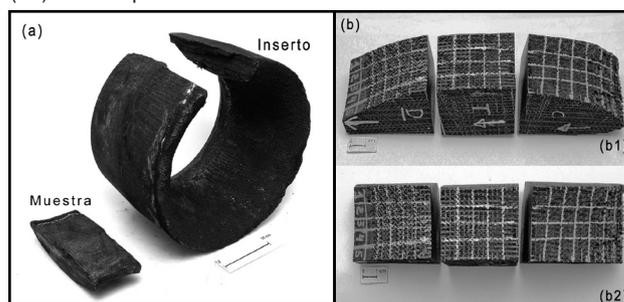
2 METODOLOGÍA

La evaluación de la superficie interna del inserto después de pasar el flujo de gases calientes de la quema del propulsor del motor S43 se realizó esencialmente mediante las técnicas de inspección visual, estereomicroscopía, microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido (MEV). Estos análisis son fundamentales para evaluar la correlación de las condiciones de ensayo y el comportamiento del material, para lo cual se realiza inicialmente la sección de determinadas regiones del componente/inserto. El principal efecto en la región de la garganta de la boquilla, debido al paso de los gases calientes de la combustión del propulsor, es el desgaste por abrasión, causando la remoción en la superficie y la quema del material. Para sistematizar el análisis, se tomó una muestra del inserto de la boquilla del motor S43, como se muestra en la Figura 4(a). En la Figura

4(b) se observa la subdivisión de la muestra en tres regiones para su posterior evaluación microscópica. Mientras tanto, conceptualmente, sólo hay dos regiones, la convergente y la divergente, como se presenta en la Figura 3. Además, está la sección de la garganta que, además de delimitar estas regiones, caracteriza la transición entre el derrame subsónico ($M < 1$) y el supersónico ($M > 1$). Junto a esta sección se espera una erosión más significativa debido a la conjunción de los efectos térmicos y mecánicos del derrame.

En la Figura 4(b1) se verifica visualmente, en perspectiva, la subdivisión de la muestra en tres regiones como previamente mencionado: divergente **D**, garganta **T** y convergente **C**. Además, como presentado en la Figura 4(b2), se dividió en cuadrantes la parte superior de las tres regiones de la muestra.

Figura 4 – Inserto y muestra de la boquilla del motor S43. (a) Muestra e Inserto; y (b) Muestra: (b1) Imagen en perspectiva y (b2) vista superior.

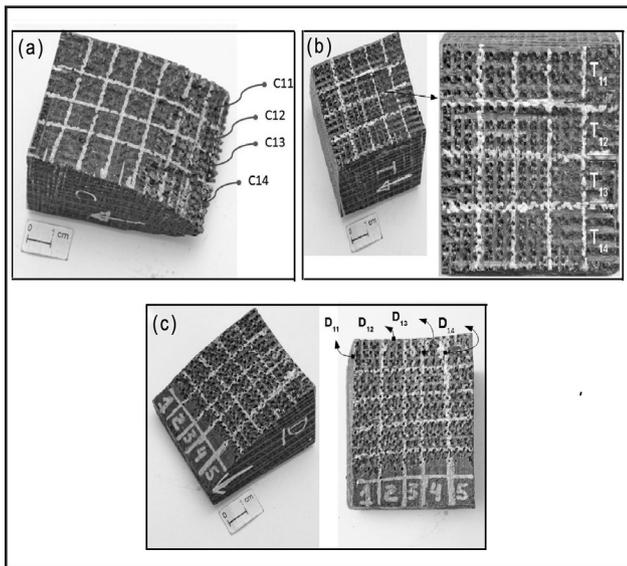


Fuente: El autor.

Los cuadrantes se caracterizan por unidades rectangulares de aproximadamente 1 cm^2 donde se acordó designar c_{ij} siendo i el i -ésimo cuadrante a lo largo de la sección transversal de la muestra del convergente y j la j -ésima columna a lo largo de la sección longitudinal de la muestra convergente, es decir, a lo largo de la longitud. Por lo tanto, en la Figura 5(a), c_{11} se refiere la primera línea y primera columna de la muestra, c_{21} se refiere la segunda línea y primera columna de la muestra. El mismo criterio fue adoptado para las muestras de la garganta, Figura 5(b) y divergente, Figura 5(c).

Específicamente para la muestra de garganta **T**, además de la estereomicroscopía, se realizaron análisis microestructurales por microscopía óptica, tanto en regiones cercanas como lejanas al paso del flujo de gas, de la quema del propulsor y, finalmente, análisis de superficie por MEV. Para el estudio por microscopía óptica se determinó una región perpendicular al cuadrante T34. En esta región, el relleno, lijado y pulido se hizo con el fin de registrar más tarde las imágenes en los lugares cercanos y lejanos al flujo de gases procedentes de la quema del propulsor.

Figura 5 – Imagen de la estratificación e identificación de las regiones de la muestra. (a) Convergente **C**; (b) Garganta **T**; e (c) Divergente **D**.



Fuente: El autor.

2.1 Estéreo microscopio

Las tres regiones de la muestra, divergente **D**, garganta **T** y convergente **C**, fueron examinadas bajo en estéreo microscopio Zeiss, modelo Discovery V8, con cámara digital ICc1(1,3 MP) acoplada y sistema de captura de imágenes compuesto por microcomputador y *software Axiovision* v 4.8. Para iluminación se utilizó el sistema VISILED © compuesto de anillo de iluminación Led y módulo de control, permitiendo la iluminación alterna de los *leds* y el ajuste de la intensidad luminosa.

2.2 Microscopia óptica

La muestra de la garganta fue examinada bajo un microscopio óptico, marca Carl Zeiss, modelo *Axiomager A2m*, por la técnica de luz reflejada utilizando cámara digital ICc3 (3MP) acoplada y sistema de captura de imágenes instalado en el Laboratorio de Ensayos de Materialografía (LMAT/AMR/IAE).

La preparación de los cuerpos de prueba, para examen por microscopia óptica, fue realizada siguiendo los procedimientos operativos del LMAT de acuerdo con los requisitos de la ASTM E3 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2017). En esta preparación

los cuerpos de prueba fueron seccionados con disco de corte diamantado, en cortadera metalográfica de Precisión BUHELER ISOMET BUHELER ISOMET 1000, con carga de 50 gf y rotación de 300 rpm sin refrigeración.

Después de seccionar, las muestras fueron rellanas en resina de poliéster. El procedimiento de preparación de la superficie de observación bajo el microscopio consistió en lijado con agua abrasiva SiC, con granulometría de 600 e 1200 *mesh*. Entre cada etapa de lijado, los cuerpos de prueba fueron rotados en 90°. Después de lijado, los cuerpos de prueba fueron pulidos en fieltro de lana sintética y pasta abrasiva de diamante con granulometrías de 3 μm y 1 μm . El pulido final se hizo en fieltro de lana y sílice coloidal con granulometría de 0,06 μm .

2.3 Análisis por MEV

Para los análisis por MEV se utilizó el microscopio electrónico MEV LEO 435VPi y detector de electrones secundarios (SE), con aplicación de tensión de 15 kV con el soporte de *software* INCA de la subdivisión de ensayos (AMR-E). El equipo está instalado en el Laboratorio de Ensayos de Microscopia Electrónica de Barrido (LMEV/ AMR/IAE).

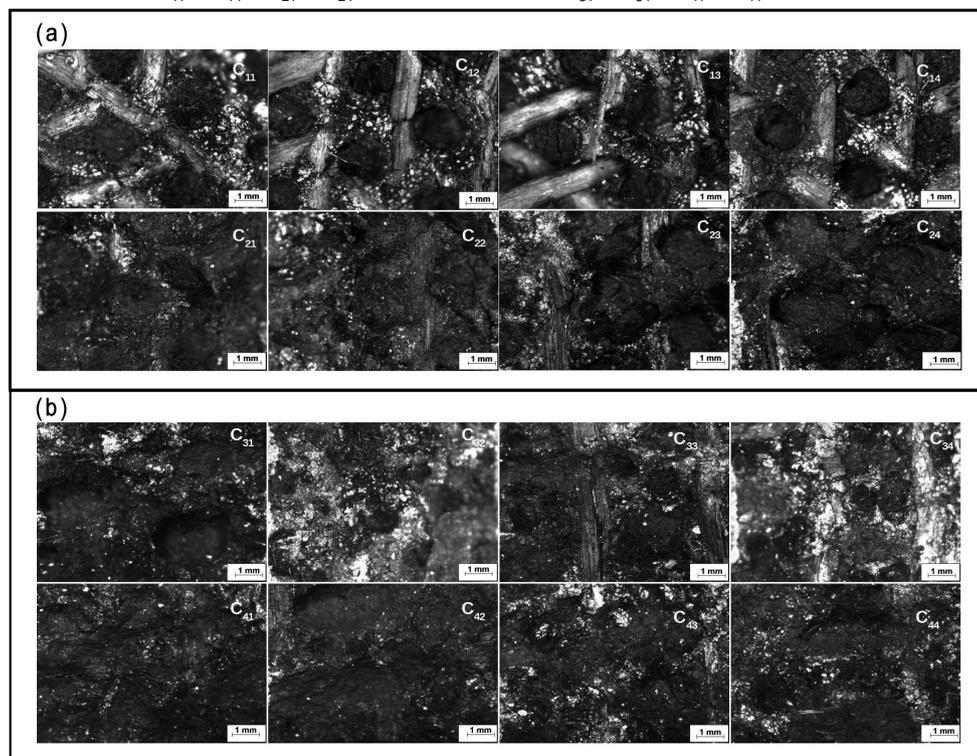
La utilización del MEV es una técnica complementaria de análisis de gran importancia para la identificación del mecanismo de desgaste, mediante la observación de la superficie del inserto a lo largo de su longitud. Los análisis se realizaron sin una preparación especial de la superficie.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Estereomicroscopía del convergente del inserto de la boquilla

La Figura 6 muestra una secuencia de imágenes obtenidas en el estéreo microscopio con un aumento de 16x de la superficie del material CRFC del convergente. Las imágenes fueron capturadas siguiendo la dirección de la salida de los gases.

Figura 6 – Estéreo micrográficas de los rangos 1 a 4 a lo largo de la superficie del convergente. (a) Rangos 1 y 2: C_{11} a C_{14} y C_{21} a C_{24} ; y (b) Rangos 3 y 4: C_{31} a C_{34} y C_{41} a C_{44} .



Fuente: El autor.

Se nota en los rangos C_{11} a C_{14} y C_{21} a C_{24} una fuerte erosión que forma irregularidades en la superficie atacada por el flujo de gases de la quema del propulsor, que muestra la superficie de las fibras parcialmente expuestas. Este flujo causa el desgaste de las regiones de la matriz y las varillas (fibras). Se notan también regiones que presentan aspecto de gris claro, que fueron térmicamente afectadas por el flujo de gases calentados y que corresponden a un residuo de combustión del material propulsor. En regiones entre C_{31} a C_{34} y C_{41} a C_{44} se nota una erosión más pronunciada en las varillas de refuerzo de fibra de carbono, especialmente aquellas perpendiculares al flujo de gas. También hay un aumento de la erosión en el área de las regiones de color gris claro.

En la Figura 7, se puede ver que el desgaste en las regiones de la varilla y en las regiones de la matriz fue uniforme, con menos efecto de erosión. Además, hay una mayor presencia de regiones de color gris claro, correspondientes a residuos de la combustión del material propulsor.

3.2 Estereomicroscopía de la garganta del inserto de la boquilla

En la región de la garganta, presentada en la Figura 8, debido a la mayor velocidad de paso de los gases,

el mecanismo de desgaste fue diferente al observado en la región convergente. Esta se caracteriza por un desgaste más intenso de la matriz de carbono, dejando las fibras expuestas. Se notan pocas regiones de color gris claro, asociadas con residuos de la combustión del material propulsor.

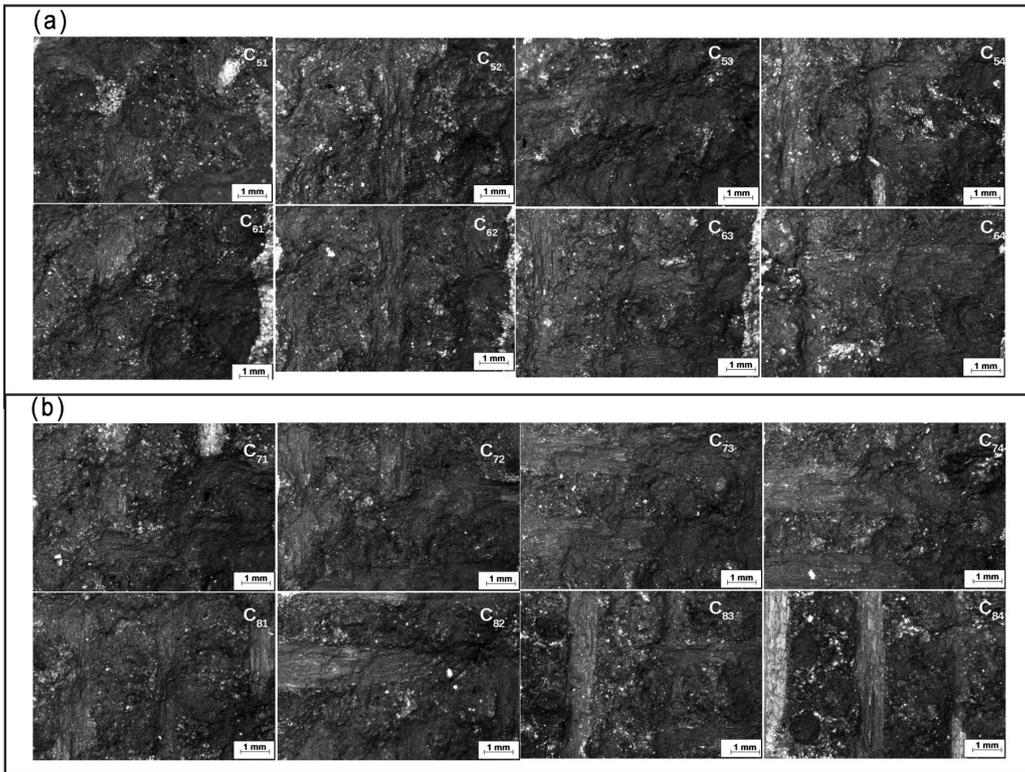
3.3 Estereomicroscopía del divergente del inserto de la boquilla

Se nota en la Figura 9 que, en las regiones D_{11} a D_{14} e D_{21} a D_{24} , en la salida de la garganta a la divergente, hubo un desgaste simultáneo de las regiones de las varillas (fibras) y la matriz carbonosa, siendo relativamente más acentuado que el observado en la región de la garganta. Sin embargo, en los rangos 3 y 4: D_{31} a D_{34} y D_{41} a D_{44} , hubo un predominio de desgaste en la matriz carbonosa.

3.4 Estéreo microscopía de la garganta en la posición adyacente y lejos del flujo de gas

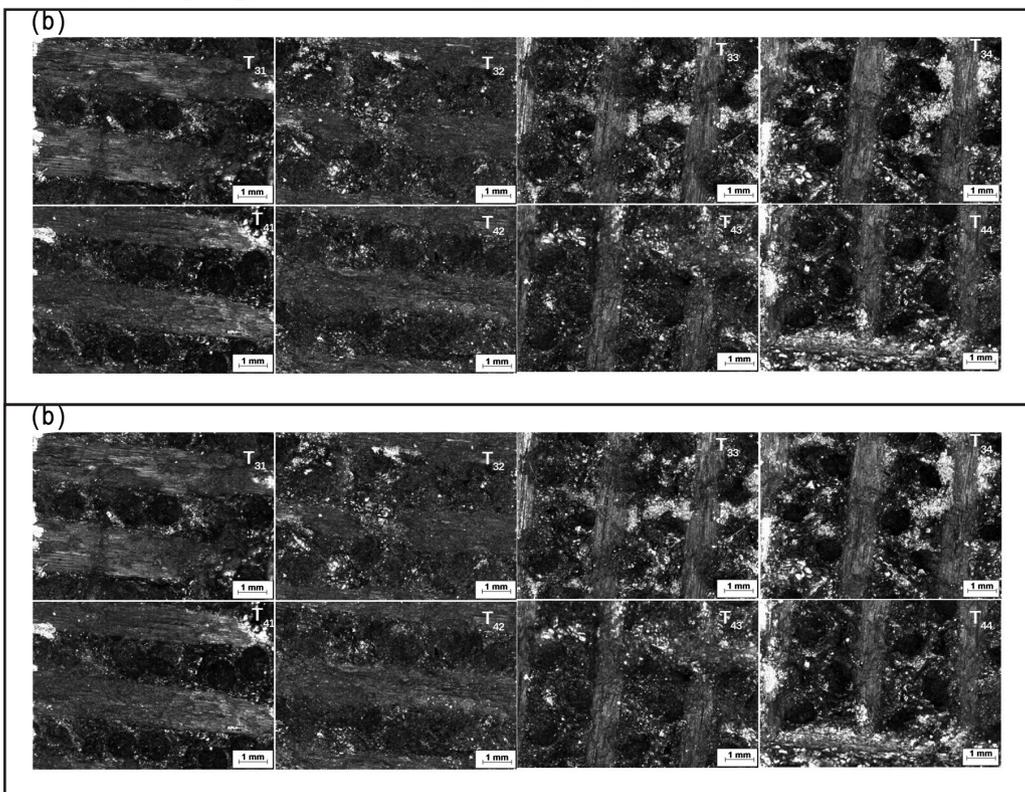
3.4.1 Posición adyacente al paso del flujo de gases en la garganta

Figura 7 – Estéreo micrografías de los rangos 5 a 8 a lo largo de la superficie del convergente. (a) Rangos 5 y 6: C₅₁ a C₅₄ y C₆₁ a C₆₄; y (b) Rangos 7 y 8: C₇₁ a C₇₄ y C₈₁ a C₈₄.



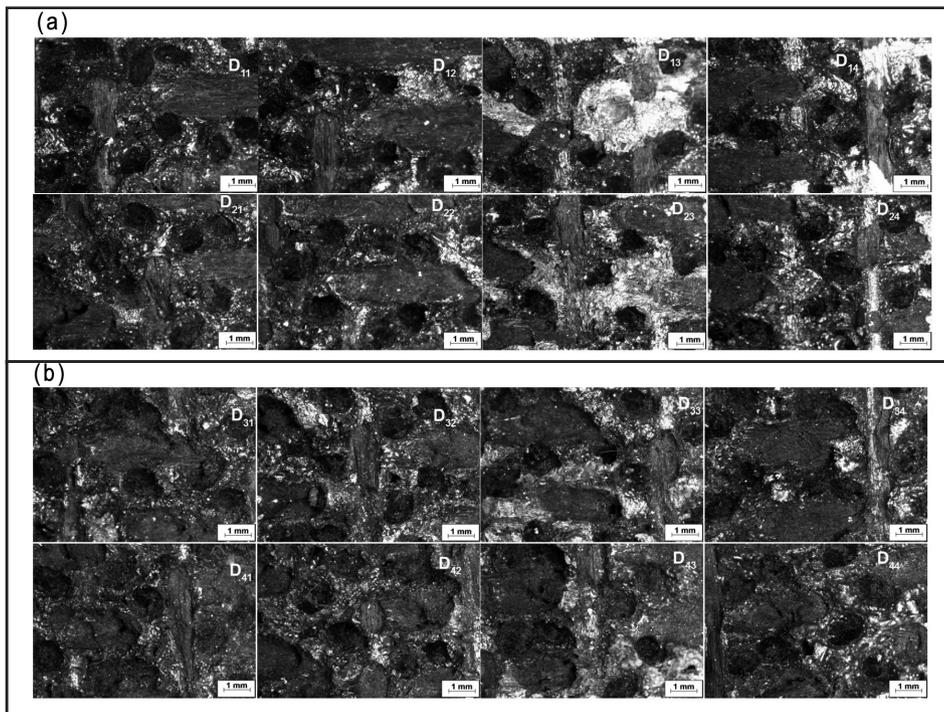
Fuente: El autor.

Figura 8 – Estéreo micrografías de los rangos 1 a 4 a lo largo de la superficie del garganta. (a) Rangos 1 y 2: T₁₁ a T₁₄ y T₂₁ a T₂₄; y (b) Rangos 3 y 4: T₃₁ a T₃₄ y T₄₁ a T₄₄.



Fuente: El autor.

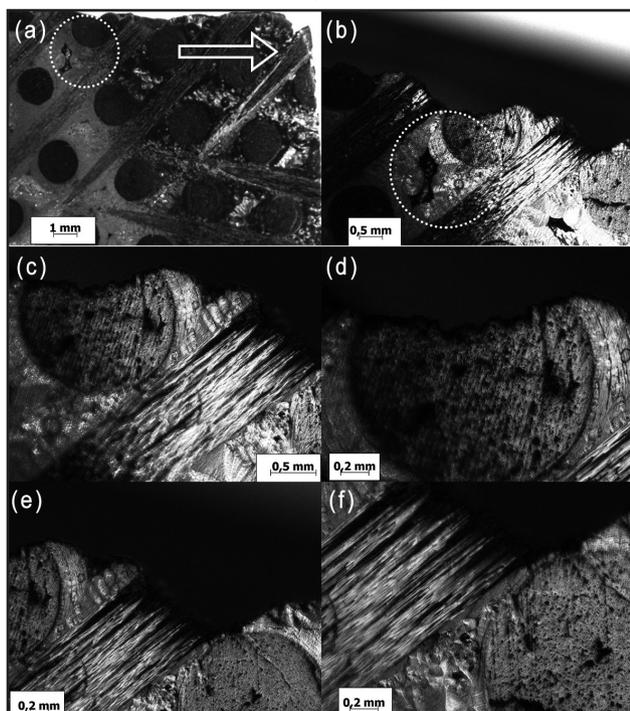
Figura 9 – Estéreo micrografías de los rangos 1 a 4 a lo largo de la superficie del divergente. (a) Rangos 1 y 2: D_{11} a D_{14} y D_{21} a D_{24} ; y (b) Rangos 3 y 4: D_{31} a D_{34} y D_{41} a D_{44} .



Fuente: El autor.

Se nota en la imagen de la Figura 10(a) los diferentes constituyentes del compuesto (fibras orientadas a 90° y $\pm 45^\circ$ en relación con el plan de la

Figura 10 – Estéreo micrografías obtenidas en una sección de muestra incrustada en la dirección perpendicular y en una posición adyacente al flujo de gas en la garganta.



Fuente: El autor.

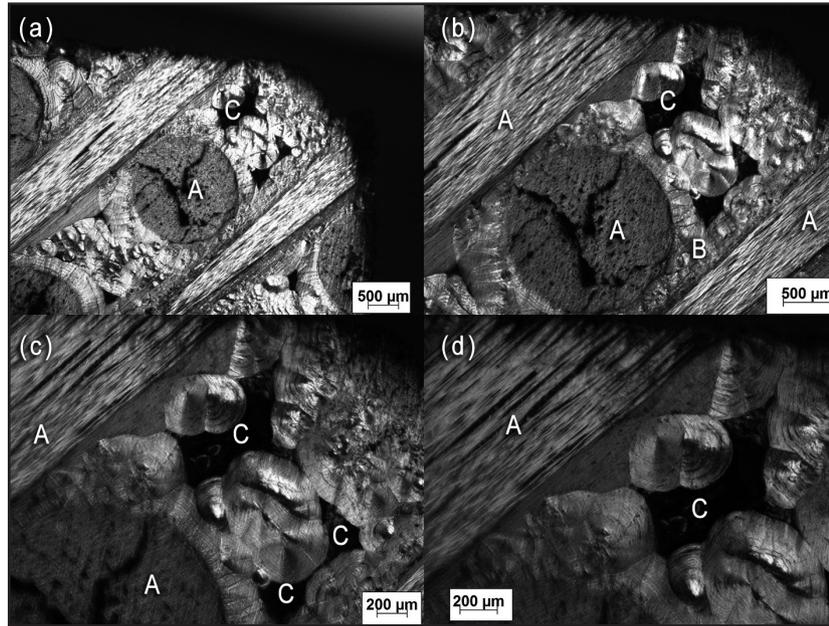
imagen, matriz y poros), donde una flecha indica la dirección del flujo de gases. En la imagen de la Figura 10(b) se muestra la ampliación de la región resaltada en la Figura 10(a), enfatizando la presencia de un poro. En las imágenes de las Figuras 10(c) a 10(f) se muestran ampliaciones de la Figura 10(b), destacando el desgaste erosivo en las fibras a 90° [Figuras 10(c) a 10(d)] y en las fibras a $\pm 45^\circ$ [Figura 10(c), Figuras 10(e) y 10(f)]. En general, la erosión de las fibras se ha producido en todas las direcciones, formando irregularidades en la superficie atacada por los gases, consumiendo parcialmente el material y exponiendo su superficie.

3.4.2 Posición alejada del flujo de gas de la garganta

En la secuencia de imágenes que se muestra en la Figura 11 observamos aspectos de las fibras multidireccionales, la matriz formada por depósitos de carbono pirolítico, obtenidos por la técnica de infiltración química en fase gaseosa (CVD/CVI) (1), fibras (2) y poros no llenados (3) en una región alejada del flujo de gas.

Comparando las imágenes de la Figura 11 con las presentadas en la Figura 10 es evidente la ausencia de efectos erosivos y ablativos tanto en las fibras como en la matriz en la posición alejada del flujo.

Figura 11 – Estéreo micrografías obtenidas en una sección de muestra incrustada en dirección perpendicular y en una posición adyacente al flujo de gas en la garganta.



Fuente: El autor.

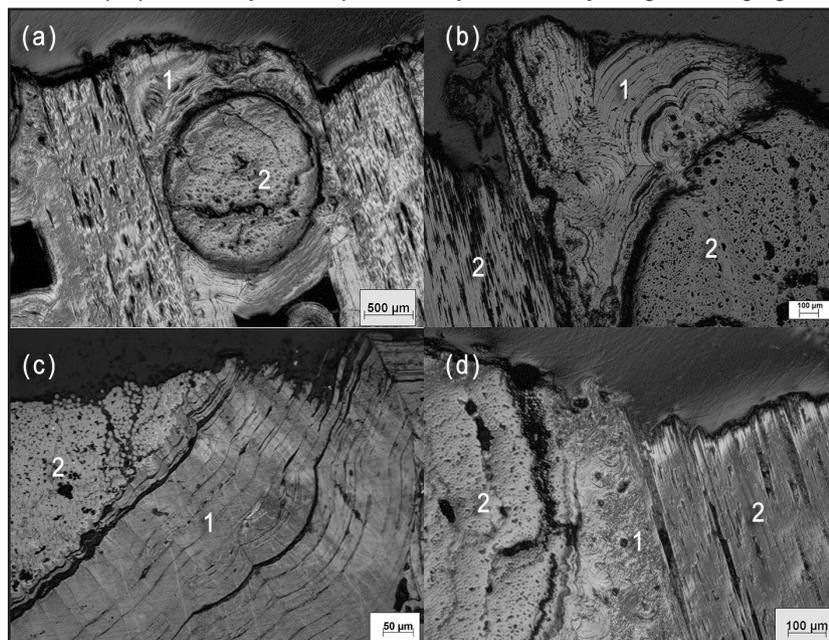
3.5 Microscopía óptica de la garganta en la posición adyacente y alejada del flujo de gases

3.5.1 Posición adyacente al flujo de gases en la garganta

Las siguientes imágenes de la Figura 12 se notan aspectos de refuerzo (varillas

unidireccionales), de la matriz formada por depósitos de carbono pirolítico (1) y fibras multidireccionales(2). Se evidencia en las Figuras 12(a) a Figura 12(d) la erosión de las fibras, formando irregularidades en la superficie atacada por los gases, consumiendo parcialmente el material y exponiendo su superficie.

Figura 12 – Micrografías obtenidas en una sección de muestra incrustada en la dirección perpendicular y en una posición adyacente al flujo de gas en la garganta.



Fuente: El autor.

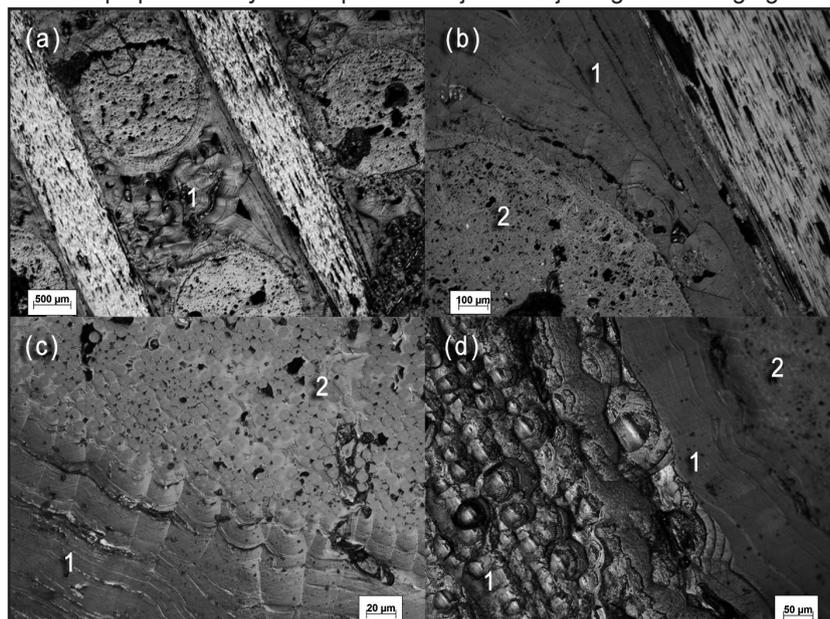
3.5.2 Posición alejada del flujo de gas en la garganta

En la secuencia de imágenes de la Figura 13, se observan claramente aspectos de la matriz formada por depósitos de carbono pirolítico (1). Se comprueba en la Figura 13(c) la presencia de estructuras cónicas seccionales longitudinales, propias de la formación del carbono, y en la Figura 13(d) las mismas estructuras cónicas, pero seccionadas transversalmente. Comparando las imágenes de la Figura 13 con las presentadas en la Figura 12 es evidente la ausencia de efectos erosivos y ablativos tanto en las fibras como en la matriz en la posición alejada del flujo de gases procedentes de la quema del propulsor.

3.6 MEV de la superficie de la garganta

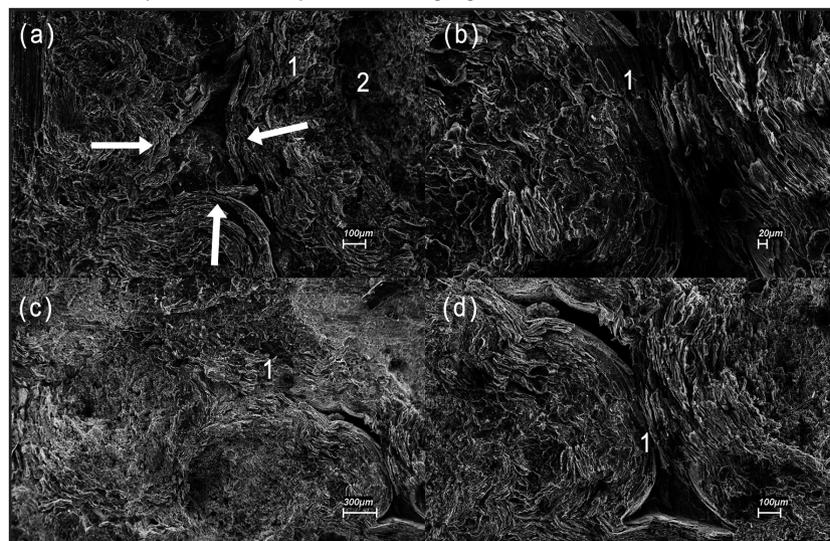
Las imágenes de la Figura 14 son similares a la que se muestra por Levy Neto y Pardini, (2016, p. 212). Se nota en la Figura 14(a), indicada por la flecha, una región de confluencia de la matriz de carbono pirolítico, resultante del proceso de densificación. En la región central de la Figura 14(a) a la Figura 14(d) se observan las láminas de carbono pirolítico obtenidas por el proceso CVI/CVD (1). Los refuerzos (varillas unidireccionales) que componen la preforma también pueden ser identificados (2) y, en la Figura 14(a), se observa que están orientados en diferentes direcciones e involucrados por la matriz de carbono.

Figura 13 – Micrografías obtenidas en una sección de muestra incrustada en la dirección perpendicular y en una posición alejada al flujo de gases en la garganta.



Fuente: El autor.

Figura 14 – Imágenes obtenidas por MEV en la dirección paralela al flujo de gases en diferentes puntos de la superficie de la garganta.



Fuente: El autor.

4 CONCLUSIONES

Las regiones cercanas a la sección de la garganta de un inserto de boquilla se analizaron usando técnicas de microscopía. Se presentaron los resultados de la estereoscopia realizada a lo largo de puntos en la superficie de una muestra del inserto en las regiones convergente, garganta y divergente. Se observó que el mecanismo de degradación del material se altera dependiendo de la región analizada. El desgaste es más acentuado en la región convergente, en comparación con la región divergente, aunque la velocidad de paso de los gases es menor en la región convergente, donde la temperatura de los gases es mayor, y el ángulo de incidencia del flujo de los gases de combustión sobre el material también es más grande que en la región divergente.

El análisis por microscopía óptica realizado en la región de la garganta mostró que la erosión de la muestra era más acentuada en la superficie y que, en las regiones más alejadas del paso del flujo de gas, no se observaron cambios significativos.

La microscopía electrónica de barrido, realizada en la sección de garganta, proporcionó un análisis más profundo de la morfología del material compuesto, permitiendo identificar detalles de las varillas de refuerzo, que consisten en filamentos de fibra de carbono y, en la matriz de carbono pirolítico, donde puede estar observar los diferentes cubreobjetos depositados por CVD/CVI.

Las diferentes técnicas de análisis empleadas permitieron identificar las características de erosión y sistematizar un procedimiento de análisis del comportamiento del material, a la vista de las condiciones de operación, que puede orientar los trabajos futuros.

REFERENCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E3-11**: Standard guide for preparation of metallographic specimens. Pensilvânia. 2017.

GONÇALVES, A. **Caracterização de materiais termoestruturais a base de compósitos de Carbono Reforçados com Fibras de Carbono (CRFC) e carbonos modificados com Carbetto de Silício (SiC)**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica e Aeronáutica) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, SP, 2008.

LEE, S. M. **Handbook of composite reinforcements**. Palo Alto: WILEY-VCH, 1993.

LEVY NETO, F.; PARDINI, L. C. **Compósitos estruturais: ciência e tecnologia**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2016. 418p.

LI, W.; HUANG, H.; XU, X. A coupled thermal/fluid/chemical/ablation method on surface ablation of charring composites, **Int. J. Heat Mass Transf.**, v. 109, p. 725-736, 2017.

PARDINI, L. C.; GONÇALVES, A.; VIEIRA, S. D. Preformas multi-direcionais para compósitos termoestruturais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 15., 2002, Natal. **Anais [...]**. Natal: CBCIMAT, 2002. p. 2161-2167.

RIBEIRO, J. L. P. **Predição de propriedades elásticas de compósitos termo estruturais**

com reforço multidirecional. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica e Aeronáutica) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos/SP, 2006. Disponível em: http://www.bdit.bibl.ita.br/tesesdigitais/lista_resumo.php?num_tese=62825. Acesso em: 6 jul. 2018.

RIBEIRO, J. L. P.; GREGORI, M. L.; PARDINI, L. C. Predição das propriedades elásticas de compósitos termoestruturais com reforço multidirecional. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 13, n. 1, jan./mar. 2008.

RICCIO, A. *et al.* Optimum design of ablative thermal protection systems for atmospheric entry vehicle. **Appl. Therm. Eng.**, v. 119, p. 541-552, 2017.

SILVA, R. J. **Plasma térmico para ablação de materiais utilizados como escudo de proteção térmica em sistemas aeroespaciais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica e Aeronáutica) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2011. Disponível em: http://www.bdit.bibl.ita.br/tesesdigitais/lista_resumo.php?num_tese=62019. Acesso em: 6 jul. 2018.

SILVA, W. G. **Qualificação de materiais utilizados em sistemas de proteção térmica para veículos espaciais**. Tese (Mestrado em Física dos Plasmas) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São Jose dos Campos, 2009.

SUTTON, G. W. The initial development of ablation heat protection: an historical perspective, **Sp. Chron.**, v. 59, p. 16-28, 2006.