

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

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

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

Ronald Izidoro Reis <sup>I</sup>

Wilson Kiyoshi Shimote <sup>II</sup>

Christian Frederico de Avila Von Dollinger <sup>III</sup>

Luiz Cláudio Pardini <sup>IV</sup>

## 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 estéreo 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.

## 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 e Espaço – (IAE) – São José dos Campos/SP – Brasil. Doutor em Engenharia Metalúrgica e de Minas pela Universidade Federal de Minas Gerais. *E-mail:* ronaldrir@fab.mil.br

II. Instituto de Aeronáutica e Espaço – (IAE) – São José dos Campos/SP – Brasil. Doutor em Ciências Térmicas pela École Nationale Supérieure de Mécanique et d'Aérotechnique - ENSMA França. *E-mail:* wilsonwks@fab.mil.br

III. Instituto de Aeronáutica e Espaço – (IAE) – São José dos Campos/SP – Brasil. Doutor em Ciência e Engenharia dos Materiais pela Universidade Federal de São Carlos. *E-mail:* christiancfavd@fab.mil.br

IV. Instituto de Aeronáutica e Espaço – (IAE) – São José dos Campos/SP – Brasil. Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais - University of Bath - Reino Unido. *E-mail:* pardinilcp@fab.mil.br

Recebido: 28/02/19

Aceito: 19/06/19

## 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 estereo microscopia, microscopia óptica y microscopia electrónica de barrido (MEV) del compuesto CRFC usado como un inserto en la boquilla del motor S43. El análisis de microscopia 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 microscopia 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.*

## 1 INTRODUÇÃO

As proteções térmicas são componentes dos veículos espaciais que têm a função de proteger as estruturas externas, metálicas ou de material compósito, de solicitações termomecânicas e fluxos térmicos durante todas as etapas do voo. Essas solicitações termomecânicas e fluxos térmicos podem ser oriundos tanto de fenômenos aerotermodinâmicos externos quanto de escoamento interno ao motor foguete. O estado da arte dos Sistemas de Proteção Térmica (*Thermal Protection System- TPS*) para aplicações aeroespaciais é baseado em materiais ablativos intrínsecos e ablativos re-irradiativos. Para os **TPS** que utilizam materiais ablativos intrínsecos a dissipação da energia térmica ocorre pela perda de massa e pela mudança de fase do material. Esses materiais devem apresentar: resistência às temperaturas elevadas, resistência à erosão, choque térmico e impacto, além de baixa condutividade térmica e elevado calor específico (SILVA, 2009). Segundo Gonçalves (2008) e Silva (2011), nos **TPS** que utilizam materiais ablativos reirradiativos, a dissipação da energia térmica ocorre por meio do retorno ao ambiente na forma de radiação de parte da energia absorvida do fluxo externo, e o restante é conduzido para regiões internas do material (um mecanismo relativamente mais simples que o dos materiais ablativos intrínsecos). Ademais, estes

materiais re-irradiativos possuem grande emissividade ( $\epsilon > 0,8$ ) e baixa taxa de erosão sob condições extremas do fluxo incidente, permitindo proteger estruturas por longo período. Nessa classe de materiais podem-se elencar a família dos compósitos de carbono reforçado com fibras de carbono (CRFC), compósitos com matriz híbrida de carbono/carbeto de silício (C/SiC) e os compósitos de fibras de carbeto de silício e matriz de carbeto de silício (SiC/SiC).

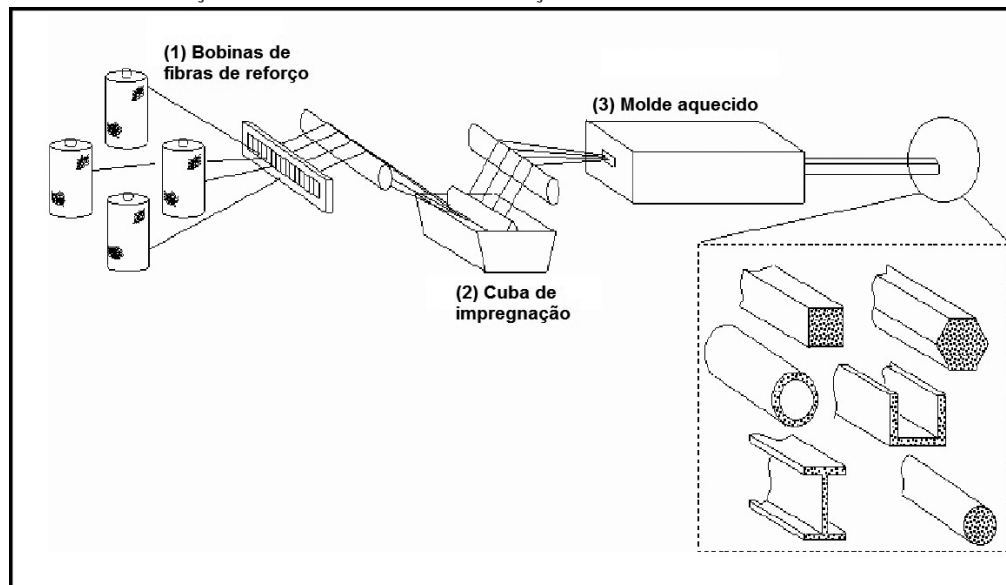
Exemplos de uso de **TPS** em aplicações externas são bordas de ataque, ogivas de reentrada e envelopes de tanques de combustível localizados externamente aos veículos espaciais. As aplicações internas de **TPS** correspondem a insertos de tubeira de motor foguete (RICCIO et al., 2017; LEE, 1993; LI; HUANG; XU, 2017 e SUTTON, 2006).

De acordo com Ribeiro; Gregori, Pardini (2008) o inserto de tubeira de motor foguete, representado tipicamente por um bocal de Laval, é um componente importante de um sistema propulsor de veículos lançadores. Nesse subsistema, os gases que resultam da queima do propelente atingem altas temperaturas (@ 2900°C) e são expandidos na tubeira, por efeito de estricção nessa região, que tem por função propiciar o aumento da velocidade de ejeção (2500 m/s), objetivando obter o empuxo desejado. Até o final da década de 1950 os insertos de tubeira de motor foguete eram manufaturados em grafite e apresentavam limitações nas dimensões e na uniformidade, ou seja, os processos de obtenção de grafites já não atendiam as geometrias e propriedades necessárias para aplicações em motores foguetes de maior porte. Nesta ocasião surgem os compósitos de carbono reforçado com fibras de carbono (CRFC), formados a partir de uma matriz carbonosa e fibras de carbono, que vieram agregar avanços significativos na tecnologia de preformas (arquitetura multidirecional do reforço) para compósitos. A utilização destas preformas permitiu que a limitação das dimensões e da geometria fosse suplantada, ademais o uso de fibras de carbono garantia a resistência mecânica e a tenacidade necessárias para assegurar o desempenho satisfatório do componente. Pardini; Gonçalves e Vieira (2002, p. 2163) citam que

[...] O número de direções da preforma está diretamente ligado à isotropia do material compósito a ser obtido, ou seja, quanto maior o número de direções mais próximo da isotropia estará o material.

Como a isotropia é diretamente atrelada ao aumento de direções de fibras na arquitetura de reforço, é usual a utilização de compósitos unidirecionais na forma de pinos, ou varetas, que permitem a disposição do reforço em multi-direções. A obtenção desse pinos, ou varetas, é realizada pelo método de moldagem por pultrusão, conforme ilustrado na Figura 1.

**Figura 1** – Exemplo esquemático do processo de pultrusão para obtenção de perfis e vigas de geometrias diversas com utilização de fibras unidirecionais de reforço.



Fonte: Levy Neto e Pardini (2016, p. 202).

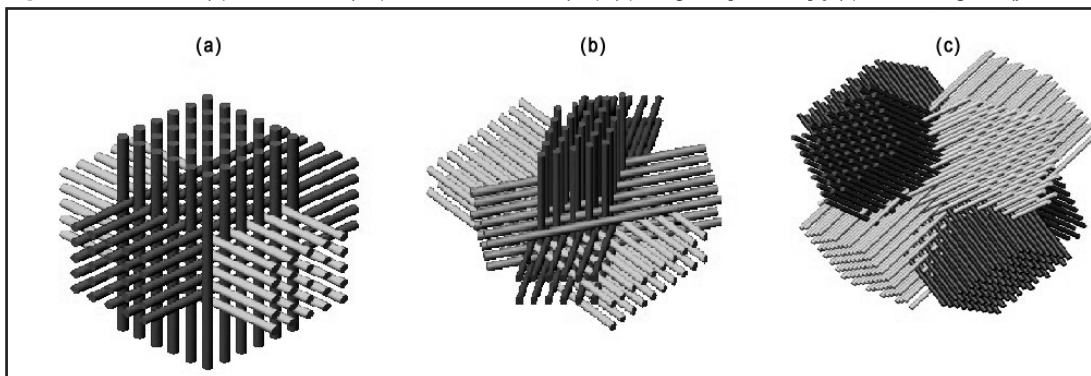
Nesse processo os cabos de reforço na forma de mechas de fibras contínuas são impregnados em uma cuba, onde a resina, previamente formulada e com viscosidade adequada, permite a impregnação. O parâmetro de processo mais importante nesse caso é a adequação do tempo de gel da resina, que deve ser rigidamente controlado, evitando a cura prematura da mesma ao adentrar o molde aquecido. Após impregnação, o conjunto fibra/matriz polimérica adentra o molde que vai conferir uma geometria ao componente que se deseja obter (LEVY NETO; PARDINI, 2016, p. 202).

O processo de pultrusão permite obter, de forma contínua, peças em compósito com geometria de seção transversal definida, como as formas circulares e sextavadas. Dessa forma é possível a obtenção de pinos, ou varetas, delgadas de pequeno diâmetro pré-enrijecidas. Ribeiro (2006, p.33) cita que “[...] a faixa de diâmetro adequada para uso em preforma situa-se entre 0,5 –

3,0 mm”. Essas varetas (pinos) são correspondentes a compósitos unidirecionais, e em processos de moldagem por pultrusão, apresentam frações em volume de fibras equivalentes a 65-70%.

Com a obtenção dos pinos, ou varetas, é possível a montagem de preformas com arquitetura de fibras multidirecionais. Segundo Levy Neto e Pardini (2016, p. 155), tanto as estruturas com requisitos termoestruturais severos quanto as que necessitam de maior isotropia de propriedades podem ser manufaturadas com essa tecnologia. Nessa classe se agrupam as preformas tridirecionais ortogonais (3D), conforme mostra a Figura 2(a), preformas tetradirecionais (4D), no plano e piramidais, apresentadas respectivamente nas Figuras 2(b) e (c), podendo atingir até 11 direções distintas (11D). Há processos modernos para obter essas estruturas mas que, no entanto, envolvem custo elevado devido ao investimento em equipamentos automatizados.

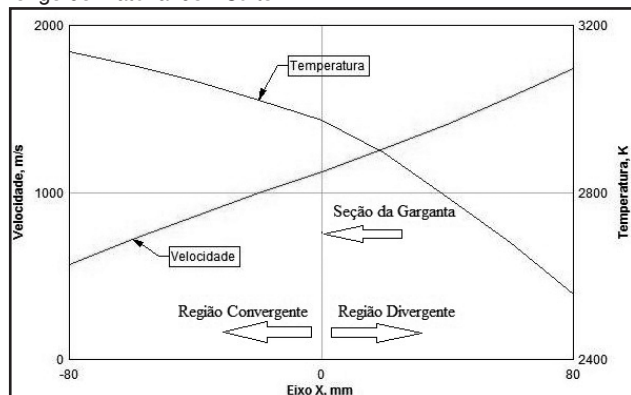
**Figura 2** – Preformas: (a) tridireccional (3D), tetra-direccional (4D); (b) ortogonal [Z, 60°,0°]; y (c) vértice-diagonal (piramidal).



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

A variação no desgaste do material do inserto ao longo do eixo de saída do fluxo de gases ocorre devido às diferenças nas características de temperatura e velocidade dos gases do escoamento, como pode ser visto nos gráficos da Figura 3.

**Figura 3** – Perfil de temperatura e de velocidade dos gases ao longo do material do inserto.



Fonte: O autor.

A Figura 3 apresenta os perfis de temperatura e velocidade dos gases nas regiões convergente e divergente do inserto da tubeira. Observa-se nesta que tanto na região convergente quanto na divergente há um aumento de velocidade ao longo do comprimento do inserto desde temperaturas elevadas ( $\sim 3000\text{K}$ ) até temperaturas próximas da ambiente. Entre as regiões convergente e divergente há a seção da garganta onde a combinação de alta pressão, alta temperatura e alta velocidade do escoamento sobre a superfície do material, levam em consequência a maiores efeitos ablativos e erosivos.

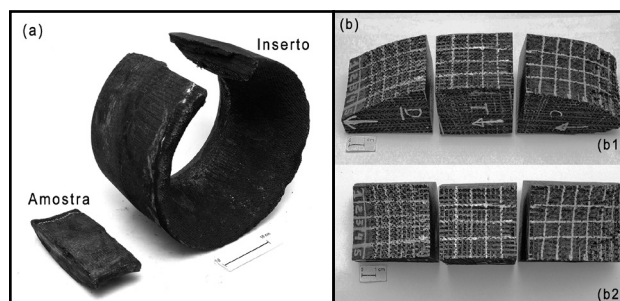
## 2 METODOLOGIA

A avaliação da superfície interna do inserto após passagem do fluxo de gases quentes oriundos da queima do propelente do motor S43 foi realizada essencialmente pelas técnicas de inspeção visual, estereomicroscopia, microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Essas análises são fundamentais para avaliar a correlação das condições de ensaio e o comportamento do material, para este fim, faz-se inicialmente a secção de regiões determinadas do componente/inserto. O efeito principal na região da garganta da tubeira, decorrente da passagem dos gases quentes oriundos da queima do propelente, é o desgaste por abrasão, causando remoção na superfície e queima do material. Para sistematizar a análise foi retirada uma amostra do inserto da tubeira do motor S43, como mostra a Figura 4(a). Na Figura 4(b) observa-se a subdivisão da amostra em três regiões para posterior avaliação microscópica. Entretanto,

conceitualmente, existem apenas duas regiões, quais sejam, a convergente e divergente, como apresentado na Figura 3. Ademais, tem-se a seção da garganta que além de delimitar essas regiões caracteriza a transição entre o escoamento subsônico ( $M < 1$ ) e supersônico ( $M > 1$ ). Próximo a esta seção espera-se uma erosão mais significativa devido à conjugação dos efeitos térmicos e mecânicos do escoamento.

Na Figura 4(b1) verifica-se visualmente, em perspectiva, a subdivisão da amostra em três regiões como previamente mencionado: divergente **D**, garganta **T** e convergente **C**. Ademais, como apresentado na Figura 4(b2), dividiu-se em quadrantes a face superior das três regiões da amostra.

**Figura 4** – Inserto e amostra da tubeira do motor S43. (a) Amostra e Inserto; e (b) Amostra: (b1) Imagem em perspectiva e (b2) vista superior.

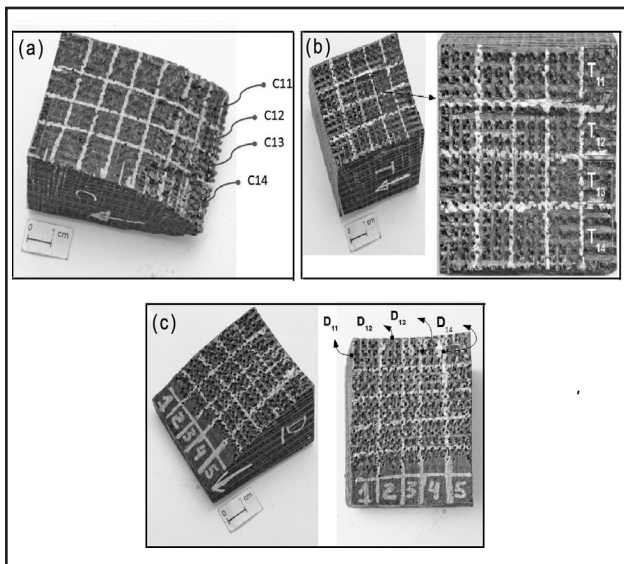


Fonte: O autor.

Os quadrantes são caracterizados por unidades retangulares de aproximadamente  $1\text{ cm}^2$  onde se convencionou designar  $c_{ij}$  sendo  $i$  o  $i$ -ésimo quadrante ao longo da seção transversal da amostra do convergente e  $j$  a  $j$ -ésima coluna ao longo da seção longitudinal da amostra do convergente, ou seja, ao longo do comprimento. Portanto, na Figura 5(a),  $c_{11}$  se refere a primeira linha e primeira coluna da amostra,  $c_{21}$  se refere a segunda linha e primeira coluna da amostra. O mesmo critério foi adotado para as amostras da garganta, Figura 5(b) e divergente, Figura 5(c).

Especificamente para a amostra da garganta **T** além da estereomicroscopia foram realizadas análises microestruturais por microscopia óptica, tanto em regiões próximas quanto distantes à passagem do fluxo de gases, provenientes da queima do propelente e, por último, análise da superfície por MEV. Para o estudo por microscopia óptica foi determinada uma região perpendicular ao quadrante  $T_{34}$ . Nesta, fez-se o embutimento, lixamento e polimento para posteriormente registrar as imagens nos locais próximos e afastados ao fluxo de gases oriundos da queima do propelente.

**Figura 5** – Imagem da estratificação e identificação das regiões da amostra. (a) Convergente **C**; (b) Garganta **T**; e (c) Divergente **D**.



Fonte: O autor.

## 2.1 Estéreo microscópio

As três regiões da amostra, divergente **D**, garganta **T** e convergente **C**, foram examinadas em estéreo microscópio Zeiss, modelo Discovery V8, com câmera digital ICc1(1,3 MP) acoplada e sistema de captura de imagens composto por microcomputador e *software Axiovision v 4.8*. Para iluminação foi utilizado o sistema VISILED © composto de anel de iluminação Led e módulo de controle, permitindo o acendimento alternado dos *leds* e ajuste da intensidade luminosa.

## 2.2 Microscopia óptica

A amostra da garganta foi examinada em microscópio óptico, marca Carl Zeiss, modelo *Axiomager A2m*, pela técnica de luz refletida utilizando câmera digital ICc3 (3MP) acoplada e sistema de captura de imagens instalado no Laboratório de Ensaio de Metalografia (LMAT/AMR/IAE).

A preparação dos corpos de prova, para exame por microscopia óptica, foi realizada seguindo os procedimentos operacionais do LMAT de acordo com os requisitos da ASTM E3 (*AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS*, 2017). Nessa preparação os

corpos de prova foram seccionados com disco de corte diamantado, em cortadeira metalográfica de Precisão BUHELER ISOMET 1000, com carga de 50 gf e rotação de 300 rpm sem refrigeração.

Após seccionamento, as amostras foram embutidas em resina poliéster. O procedimento de preparo da superfície de observação no microscópio constituiu-se de lixamento em lixa d'água com abrasivo SiC, com granulometria de 600 e 1200 *mesh*. Entre cada etapa de lixamento, os corpos de prova foram rotacionados em 90°. Após lixamento, os corpos de prova foram polidos em feltro de lã sintética e pasta abrasiva de diamante com granulometrias de 3 µm e 1 µm. O polimento final de acabamento foi realizado em feltro de lã e sílica coloidal com granulometria de 0,06 µm.

## 2.3 Análises por MEV

Para as análises por MEV utilizou-se o microscópio eletrônico MEV LEO 435VPi e detector de elétrons secundário (SE), com aplicação de tensão de 15 kV com o suporte do *software INCA* da subdivisão de ensaios (AMR-E). O equipamento está instalado no Laboratório de Ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura (LMEV/AMR/IAE).

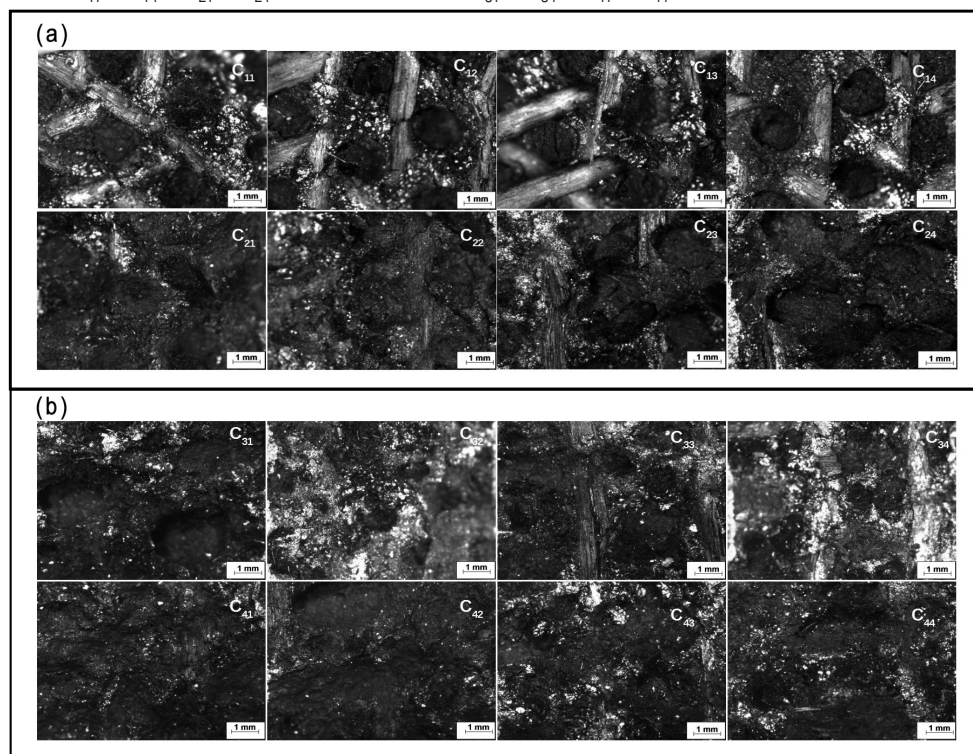
A utilização do MEV é uma técnica complementar de análise de grande importância para a identificação do mecanismo de desgaste, por meio da observação da superfície do inserto ao longo de seu comprimento. As análises foram realizadas sem preparação especial das superfícies.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 Estereomicroscopia do convergente do inserto da tubeira

A Figura 6 apresenta uma sequência de imagens obtidas no estéreo microscópio com ampliação de 16x da superfície do material CRFC do convergente. As imagens foram capturadas seguindo a direção da saída do fluxo de gases.

**Figura 6** – Estéreo micrografias das faixas 1 a 4 ao longo da superfície do convergente. (a) Faixas 1 e 2: C<sub>11</sub> a C<sub>14</sub> e C<sub>21</sub> a C<sub>24</sub>; e (b) Faixas 3 e 4: C<sub>31</sub> a C<sub>34</sub> e C<sub>41</sub> a C<sub>44</sub>.



Fonte: O autor.

Observa-se nas faixas C<sub>11</sub> a C<sub>14</sub> e C<sub>21</sub> a C<sub>24</sub> forte erosão formando irregularidades na superfície atacada pelo fluxo de gases provenientes da queima do propelente, o que mostra a superfície das fibras parcialmente expostas. Esse fluxo provoca desgaste de regiões da matriz e varetas (fibras). Notam-se também regiões que apresentam aspecto de cinza claro, que foram termicamente afetadas pelo fluxo de gases aquecidos e correspondem a um resíduo de combustão do material do propelente. Nas regiões compreendidas entre C<sub>31</sub> a C<sub>34</sub> e C<sub>41</sub> a C<sub>44</sub> percebe-se uma erosão mais acentuada nas varetas de reforço de fibras de carbono, principalmente aquelas perpendiculares ao fluxo de gases. Nota-se também um aumento da erosão na área das regiões cinza claro.

Na Figura 7, observa-se que o desgaste nas regiões de varetas e nas regiões de matriz foi uniforme, ocorrendo menor efeito erosivo. Além disso, ocorre uma presença maior de regiões cinza claro, correspondentes a resíduos oriundos da combustão do material do propelente.

### 3.2 Estereomicroscopia da garganta do inserto da tubeira

Na região da garganta, apresentada na Figura 8, devido à maior velocidade de passagem dos gases, o

mecanismo de desgaste foi diferente do observado na região do convergente. Este é caracterizado por um desgaste mais intenso na matriz de carbono, deixando as fibras expostas. Notam-se poucas regiões em cinza claro, associadas a resíduos da combustão do material do propelente.

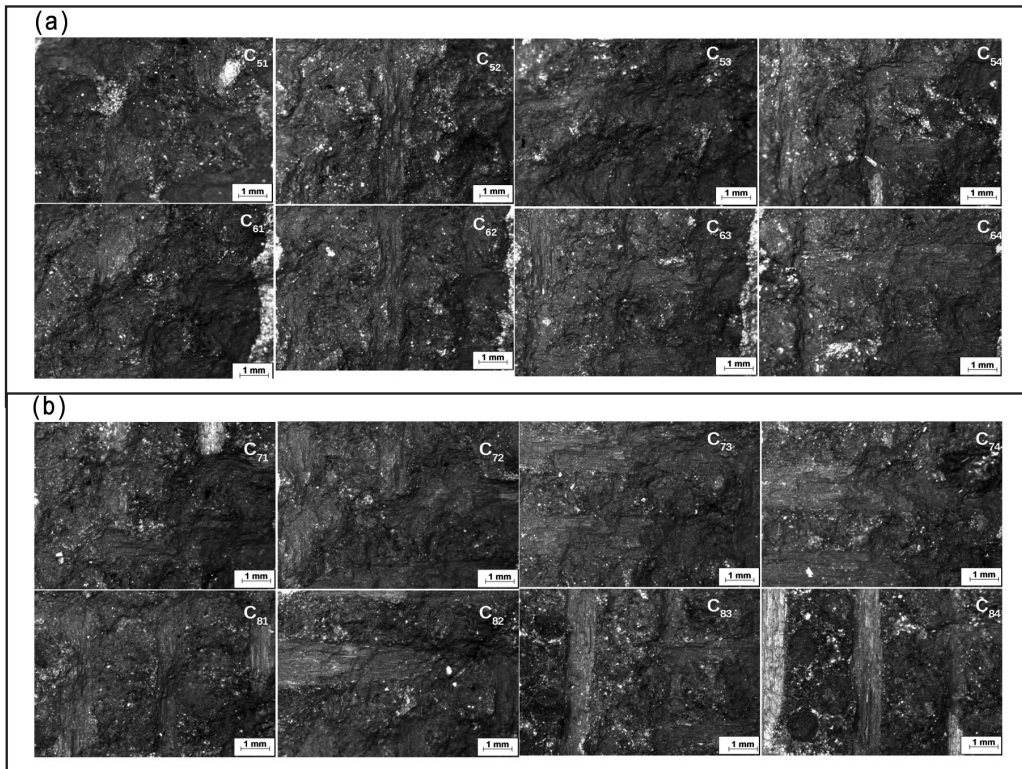
### 3.3 Estereomicroscopia do divergente do inserto da tubeira

Observa-se na Figura 9 que, nas regiões D<sub>11</sub> a D14 e D21 a D24, na saída da garganta para o divergente, ocorreu um desgaste simultâneo de regiões de varetas (fibras) e da matriz carbonosa, sendo relativamente mais acentuado do que o observado na região da garganta. Entretanto, nas faixas 3 e 4: D<sub>31</sub> a D<sub>34</sub> e D<sub>41</sub> a D<sub>44</sub>, houve a predominância do desgaste na matriz carbonosa.

### 3.4 Estéreo microscopia da garganta na posição adjacente e afastada do fluxo de gases

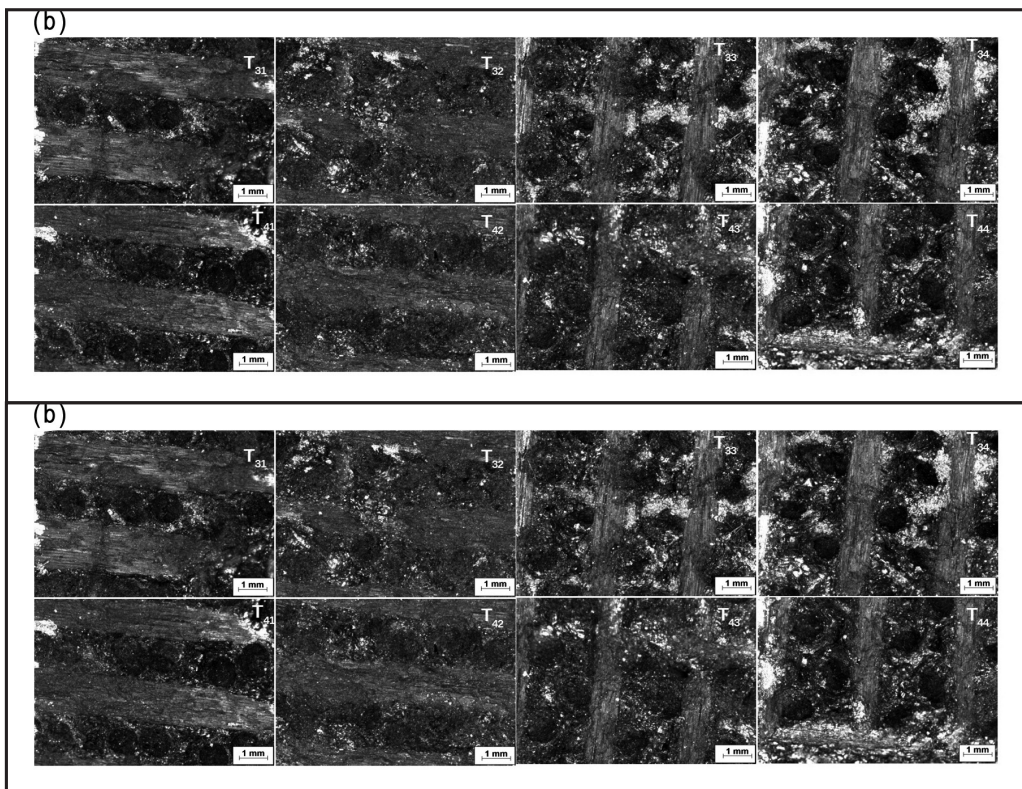
#### 3.4.1 Posição adjacente à passagem do fluxo de gases na garganta

**Figura 7** – Estéreo micrografias das faixas 5 a 8 ao longo da superfície do convergente. (a) Faixas 5 e 6: C<sub>51</sub> a C<sub>54</sub> e C<sub>61</sub> a C<sub>64</sub>; e (b) Faixas 7 e 8: C<sub>71</sub> a C<sub>74</sub> e C<sub>81</sub> a C<sub>84</sub>.



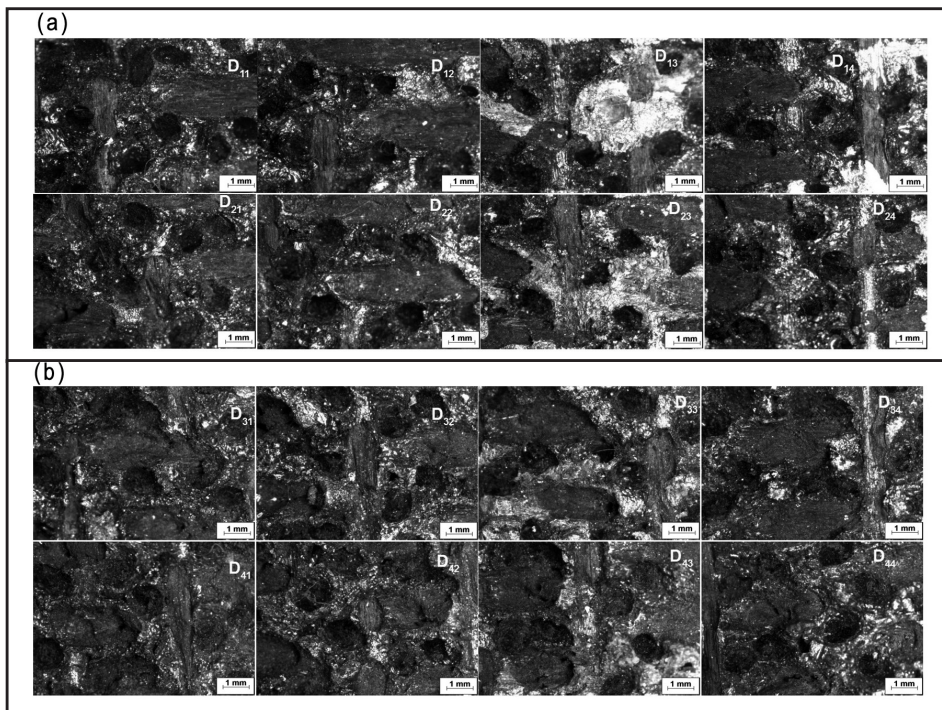
Fonte: O autor.

**Figura 8** – Estéreo micrografias das faixas 1 a 4 ao longo da superfície da garganta. (a) Faixas 1 e 2: T<sub>11</sub> a T<sub>14</sub> e T<sub>21</sub> a T<sub>24</sub>; e (b) Faixas 3 e 4: T<sub>31</sub> a T<sub>34</sub> e T<sub>41</sub> a T<sub>44</sub>.



Fonte: O autor.

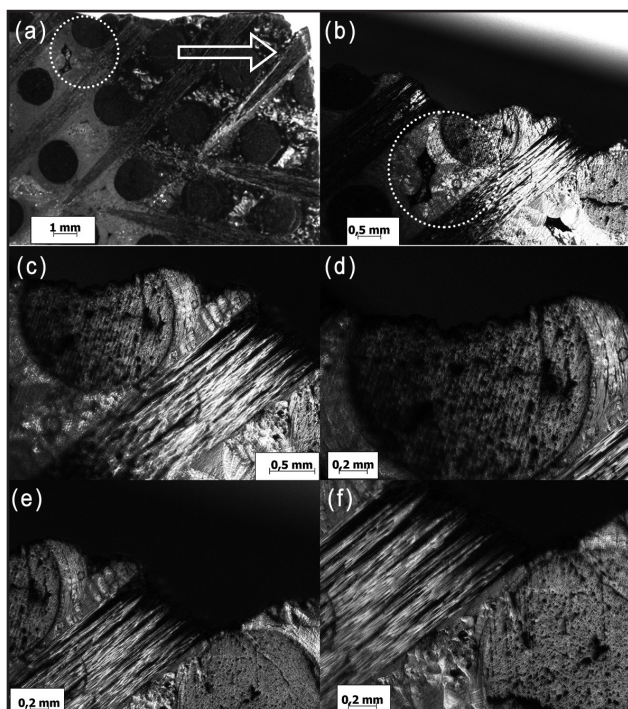
**Figura 9** – Estéreo micrografias das faixas 1 a 4 ao longo da superfície do divergente. (a) Faixas 1 e 2: D<sub>11</sub> a D<sub>14</sub> e D<sub>21</sub> a D<sub>24</sub>; e (b) Faixas 3 e 4: D<sub>31</sub> a D<sub>34</sub> e D<sub>41</sub> a D<sub>44</sub>.



Fonte: O autor.

Observa-se na imagem da Figura 10(a) os diferentes constituintes do compósito (fibras orientadas a 90° e ±45° em relação ao plano da

**Figura 10** – Estéreo micrografias obtidas numa seção de amostra embutida na direção perpendicular e numa posição adjacente ao fluxo de gases na garganta.



Fonte: O autor.

imagem, matriz e poros), onde uma seta indica a direção do fluxo de gases. Na imagem da Figura 10(b) é mostrada a ampliação da região destacada na Figura 10(a), ressaltando a presença de um poro. Nas imagens das Figuras 10(c) a 10(f) são mostradas ampliações da Figura 10(b), destacando o desgaste erosivo nas fibras a 90° [Figuras 10(c) a 10(d)] e nas fibras a ± 45° [Figura 10(c), Figuras 10(e) e 10(f)]. De uma forma geral ocorreu em todas as direções uma erosão das fibras, formando irregularidades na superfície atacada pelos gases, consumindo parcialmente o material e expondo sua superfície.

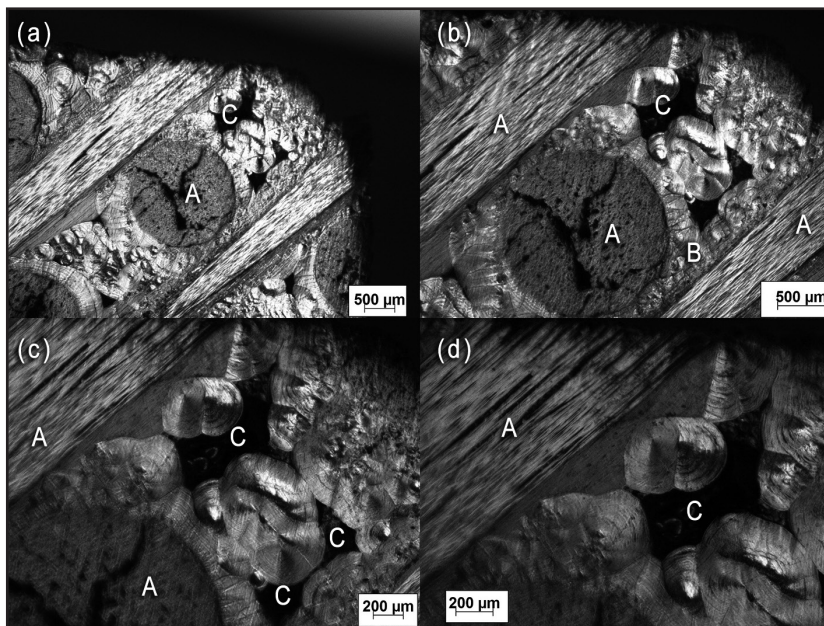
### 3.4.2 Posição afastada do fluxo de gases na garganta

Na sequência de imagens mostradas na Figura 11 observam-se aspectos das fibras multidirecionais, a matriz formada por depósitos de carbono pirolítico, obtidos pela técnica de infiltração química em fase gasosa (CVD/CVI) (1), fibras (2) e poros não preenchidos (3) numa região afastada do fluxo de gases.

Comparando-se as imagens da Figura 11 com aquelas apresentadas na Figura 10 nota-se claramente a ausência de efeitos erosivos e ablativos tanto nas fibras quanto na matriz na posição afastada do fluxo.



**Figura 11** – Estéreo micrografias obtidas numa seção de amostra embutida na direção perpendicular e numa posição adjacente ao fluxo de gases na garganta.



Fonte: O autor.

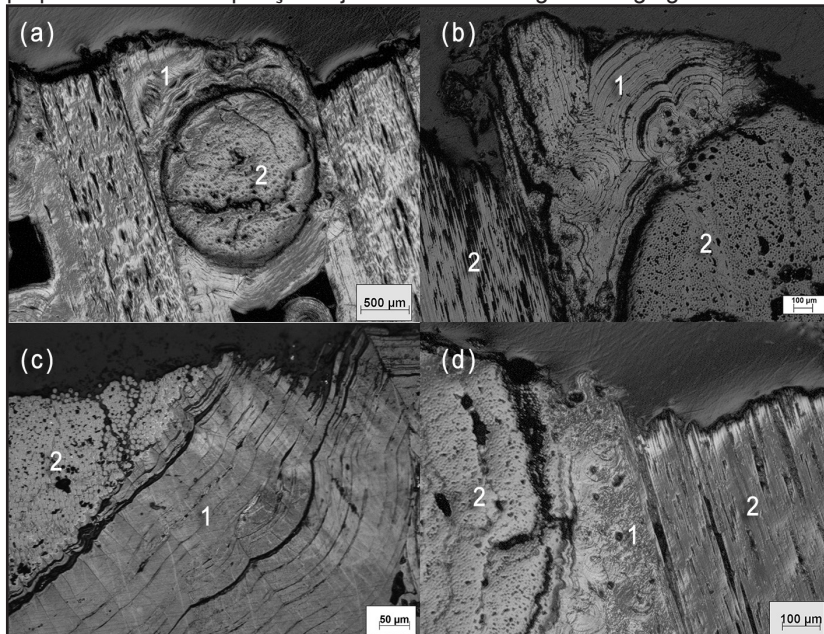
### 3.5 Microscopia óptica da garganta na posição adjacente e afastada do fluxo de gases

#### 3.5.1 Posição adjacente ao fluxo de gases na garganta

Na sequência de imagens da Figura 12 observam-se aspectos do reforço (varetas

unidirecionais), da matriz formada por depósitos de carbono pirolítico (1) e fibras multidirecionais (2). Fica evidenciada nas Figuras 12(a) a Figura 12(d) a erosão das fibras, formando irregularidades na superfície atacada pelos gases, consumindo parcialmente o material e expondo sua superfície.

**Figura 12** – Micrografias obtidas numa seção de amostra embutida na direção perpendicular e numa posição adjacente ao fluxo de gases na garganta.



Fonte: O autor.

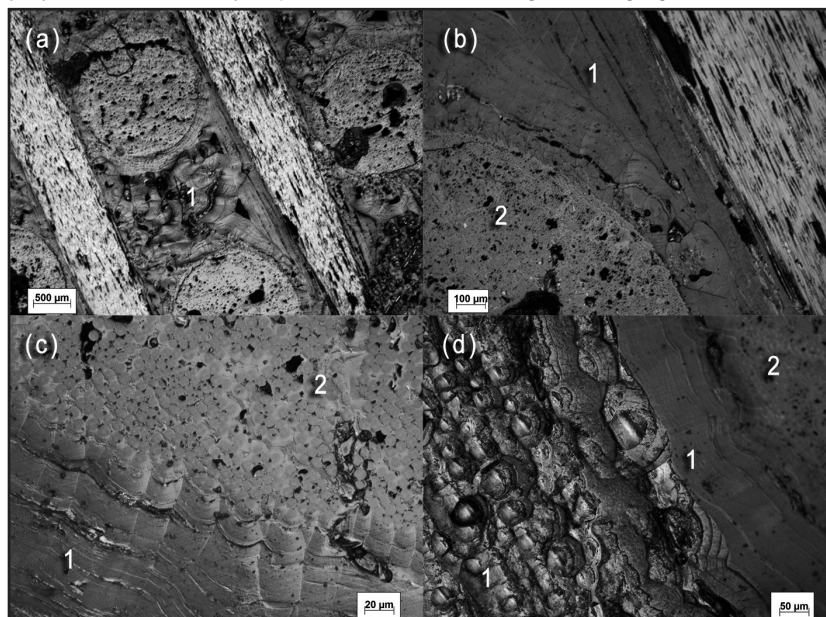
### 3.5.2 Posição afastada ao fluxo de gases na garganta

Na sequência de imagens da Figura 13 observam-se claramente aspectos da matriz formada por depósitos de carbono pirolítico (1). Verifica-se na Figura 13(c) a presença de estruturas cônicas seccionadas longitudinalmente, próprias da formação do carbono, e na Figura 13(d) as mesmas estruturas cônicas, porém seccionadas transversalmente. Comparando-se as imagens da Figura 13 com aquelas apresentadas na Figura 12 nota-se claramente a ausência de efeitos erosivos e ablativos tanto nas fibras quanto na matriz na posição afastada do fluxo de gases provenientes da queima do propelente.

### 3.6 MEV da superfície da garganta

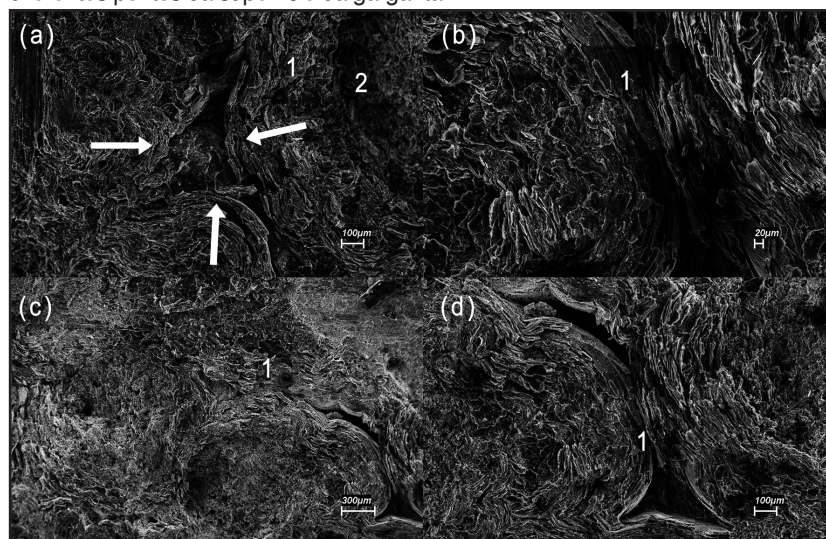
As imagens da Figura 14 são semelhantes àquela apresentada por Levy Neto e Pardini, (2016, p. 212). Observa-se na Figura 14(a), indicada pela seta, uma região de confluência de matriz de carbonos pirolíticos, resultante do processo de densificação. Na região central da Figura 14(a) à Figura 14(d) são observadas lamelas de carbono pirolítico, obtidas pelo processo CVI/CVD (1). Os reforços (varetas unidirecionais) que compõem a preforma também podem ser identificados (2) e, na Figura 14(a), percebe-se que estão orientados em diferentes direções e envolvidos pela matriz carbonosa.

**Figura 13** – Micrografias obtidas numa seção de amostra embutida na direção perpendicular e numa posição afastada ao fluxo de gases na garganta.



Fonte: O autor.

**Figura 14** – Imagens obtidas por MEV na direção paralela ao fluxo de gases em diferentes pontos da superfície da garganta.



Fonte: O autor.

## 4 CONCLUSÕES

Regiões próximas da seção de garganta de um inserto tubeira foram analisadas por técnicas de microscopia. Foram apresentados resultados de estereoscopia realizada ao longo de pontos na superfície de uma amostra do inserto nas regiões do convergente, garganta e divergente. Observou-se que o mecanismo de degradação do material é alterado em função da região analisada. O desgaste é mais acentuado na região convergente, quando comparado com a região divergente, apesar de a velocidade de passagem dos gases ser menor na região convergente, onde a temperatura dos gases é maior, e o ângulo de incidência do fluxo de gases de combustão sobre o material ser também maior que na região divergente.

A análise por microscopia óptica realizada na região da seção da garganta mostrou que a erosão da amostra foi mais acentuada na superfície e que, nas regiões mais afastadas à passagem do fluxo de gases, não se observaram mudanças significativas.

A microscopia eletrônica de varredura, realizada na seção da garganta, proporcionou uma análise mais aprofundada da morfologia do material compósito, permitindo identificar detalhes das varetas de reforço, constituídas de filamentos de fibras de carbono e, na matriz de carbono pirolítico, onde pode-se observar as diferentes lamelas depositadas por CVD/CVI.

As diferentes técnicas de análise utilizadas permitiram identificar as características de erosão e sistematizar um procedimento de análise do comportamento do material, frente às condições de operação, que podem nortear trabalhos futuros.

## REFERÊNCIAS

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](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](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 José dos Campos, 2009.

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