

Análise da ocorrência de desgaste por fretting em varetas combustíveis nucleares de Zr-1Nb-Sn-0.1Fe

Analysis of fretting wear occurrence on Zr-1Nb-1Sn-0.1Fe nuclear fuel rods

DOI:10.34117/bjdv7n3-669

Recebimento dos originais: 25/02/2021

Aceitação para publicação: 25/03/2021

Filipi Gil Cardoso

Mestrado em Engenharia Mecânica
Universidade Federal Fluminense (Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda)
Avenida dos Trabalhadores, 420 - Vila Santa Cecília, Volta Redonda – RJ, Brasil
E-mail: filipicardoso@id.uff.br

Daniele de Azevedo Baêta

Doutorado em Engenharia Metalúrgica
Universidade Federal Fluminense (Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda)
Avenida dos Trabalhadores, 420, Vila Santa Cecília, Volta Redonda, RJ, Brasil
E-mail: danbaeta@hotmail.com

Dionísio José Rodrigues da Costa

Doutorado em Engenharia Metalúrgica
Universidade Federal Fluminense (Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda)
Avenida dos Trabalhadores, 420, Vila Santa Cecília, Volta Redonda, RJ, Brasil
E-mail: dionisiojoserodriguesdacosta@hotmail.com

Neil de Medeiros

Doutorado em Engenharia Metalúrgica
Universidade Federal Fluminense (Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda)
Avenida dos Trabalhadores, 420, Vila Santa Cecília, Volta Redonda, RJ, Brasil
E-mail : neilmedeiros@id.uff.br

RESUMO

Estudos mostraram que o *fretting*, uma espécie de atrito acelerado por vibração devido ao fluxo de refrigerante, é a principal causa de falhas das varetas dos elementos combustíveis. No presente trabalho estudou-se o comportamento de varetas combustíveis fabricados a partir da liga Zr-1Nb-1Sn-0,1Fe, submetidas a ensaios físicos que visam reproduzir a ocorrência de *fretting*. Para isso, pretende-se realizar análises microestrutural via microscopia óptica (MO) e eletrônica de varredura (MEV) e testes de desgaste sobre tal liga nas condições como recebido em diferentes posições da grade espaçadora. Os ensaios físicos para a ocorrência de *fretting* foram realizados através de um protótipo disponível no laboratório de Conformação e Tratamentos Termomecânicos da EEIMVR/UFF. Esse equipamento foi operado na frequência de 30 Hz por períodos de 24

horas, induzindo deslocamentos horizontais aos tubos em relação à grade espaçadora também fabricada a partir da liga Zr-1Nb-1Sn-0,1Fe. As regiões externas da grade foram aquelas que apresentaram maior desgaste devido a rigidez imposta ao sistema nessas regiões. As imagens das regiões afetadas mostraram que o relevo apresentou regiões de crateras e picos ocasionados por arrancamento de material. Além disso, nas regiões desbastadas sem arrancamento, ficou claro que há início de propagação de trincas, que ao longo do tempo levará a fraturas por arrancamento.

Palavras-chave: Elementos combustíveis, caracterização microestrutural, desgaste por fretting, liga Zr-1Nb-1Sn-0,1Fe.

ABSTRACT

Studies have shown that fretting, a kind of vibration-accelerated friction due to refrigerant flow, is the leading cause of fuel element rod failures. Uranium storage tubes are made of zirconium-based alloys, which have high corrosion resistance and neutron transparency. In the present work we studied the behavior of fuel rods made from Zr-1Nb-1Sn-0,1Fe alloy, submitted to physical tests aiming to reproduce the occurrence of fretting. For this, it is intended to perform microstructural analysis via optical microscopy (MO) and scanning electron (SEM) and wear tests on such alloy under the conditions as received at different positions of the spacer grid. The physical tests for the occurrence of fretting was carried out through equipment available at the EEIMVR / UFF Conformation and Thermomechanical Treatments laboratory. This equipment was initially operated at a frequency of 30 Hz for periods of 24 hours, inducing horizontal displacements to the tubes in relation to the spacer grid also manufactured from the alloy Zr-1Nb-1Sn-0,1Fe. The external regions of the grid were those that showed the greatest wear due to the rigidity imposed on the system in these regions. The images of the affected regions showed that the relief presented regions of craters and peaks caused by material pullout. In addition, in the non-pullout roughened regions, it is clear that crack propagation begins, which over time will lead to pullout fractures.

Keywords: Fuel elements, microstructural characterization, fretting wear, Zr-1Nb-1Sn-0,1Fe alloy.

1 INTRODUÇÃO

O elemento combustível é um dos principais componentes de uma instalação nuclear. Este é responsável por armazenar o urânio no vaso de pressão para que ocorra a fissão nuclear, transferir o calor gerado para o líquido refrigerante e por fim reter os produtos da fissão. Sua fabricação consiste na inserção das pastilhas de Urânio em tubos de ligas de zircônio, em seguida são soldadas em suas extremidades. Essas varetas são alocadas em estruturas metálicas especiais destinadas a suportarem as varetas, os chamados esqueletos dos elementos combustíveis, que são compostos de tubos de instrumentação, tubos guia e um conjunto de grades com funções estruturais e termo

hidráulicas. Por fim, são montados dois bocais nas extremidades do elemento combustível. (SOARES et al, 2021).

Um dos fenômenos de falha mais comum encontrado em elementos combustíveis dos reatores PWR (Pressurized Water Reactor) é o chamado *fretting* (WOLTER, R, 2006). Este, consiste no desgaste que ocorre entre duas superfícies em contato, com movimento relativo oscilatório de pequena amplitude (ATTIA, M. H.,2006). Ele pode ser causado devido à vibração induzida por fluxo do fluido durante o tempo de operação do reator (KIM, K. T. 2009). A vareta combustível é sustentada na vertical por uma série de grades espaçadoras, onde em cada célula há duas molas e quatro batentes, distante 90 graus entre si. A mola exerce uma força elástica contra a parede da vareta, dando assim a sustentação para mantê-las na posição desejada. Nesses pontos de contato é a região que aparece o *fretting*. A origem desses desgastes pode ter relação com o projeto do elemento combustível, fabricação, condições operacionais do reator e locais de montagem do combustível no núcleo. No entanto, existem alguns fatores que, quando combinados, maximizam a ocorrência do *fretting*. Ou seja, durante a operação do reator, a pré-carga da mola tende a relaxar, fazendo com que a força normal diminua com o tempo. Essa perda de força pode estar relacionada com o desalinhamento axial de células da grade espaçadora, ângulo de contato do terminal da haste da mola com o combustível, curvaturas induzidas por gravidade e velocidade de montagem de carga da barra de combustível. Estudos mostraram que, quanto menor essa carga, menor a perda de força da mola (Kim K. T. 2009), (Kim K. T. 2010). Sabe-se também que o *fretting* possui maior probabilidade de ocorrer em regiões que ficam mais distantes dos pontos de ancoragem provocados pelos tubos guias. Isso se explica pois, nessas regiões, a grade fica mais suscetível aos efeitos de vibração provocados por pequenas deformações (Kim K. T.2010). A vibração, provocada pela circulação do fluxo refrigerante no reator, pode ser representada por uma oscilação linear e unidirecional induzida por uma cames sob rotação constante. Assim, espera-se simular o desgaste na vareta sob um certo número de ciclos de dano. O objetivo desse estudo é, a partir de um protótipo, induzir movimentos entre a grade espaçadora e a vareta com amplitude e frequência constante, em diversas posições da grade e posteriormente avaliar a variação volumétrica das áreas de dano aplicando-se um índice de similaridade entre imagens 3D, obtida por microscópio confocal. A partir do desgaste gerado, caracterizar microestruturalmente essas regiões através de microscopia óptica e eletrônica de varredura.

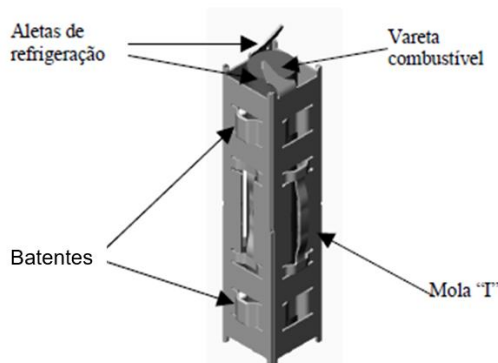
2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 MATERIAL

O material utilizado no presente trabalho, para a investigação de ocorrência de fretting, foi varetas combustíveis fabricadas a partir de uma liga Zr-1Nb-1Sn-0,1Fe com 1000mm de comprimento, 9,13mm de diâmetro externo e 7,83mm de diâmetro interno, fornecidas pelas Indústrias Nucleares do Brasil S.A. (INB). As varetas fornecidas eram todas novas, sem ranhuras predefinidas. Para os ensaios de fretting foram cortadas um total de sete amostras com aproximadamente 50mm de comprimento. A Tabela 01 mostra a composição química típica (% em peso) da liga Zr-1Nb-1Sn-0,1Fe.

A grade espaçadora, possui 256 células, é fabricada com mesma liga de zircônio da vareta, é quadrada com lados de 200 mm e 60 mm de espessura. As células onde são posicionadas as varetas possuem duas molas e quatro batentes, vide Figura 1. Esses apoios estão igualmente posicionados e espaçados, radialmente, (90° entre si), em cada célula.

Figura 1- Exemplo da célula dentro da grade espaçadora



Fonte: (SONG et al., 2007)

As composições químicas e as propriedades mecânicas da liga de zircônio utilizada na fabricação da VCN (vareta combustivel nuclear) e da grade espaçadora, assim como as características da célula da grade espaçadora estão resumidas na Tab. 1.

Tabela 1. Composição Química e Propriedades mecânicas da liga de zircônio e célula da grade espaçadora.

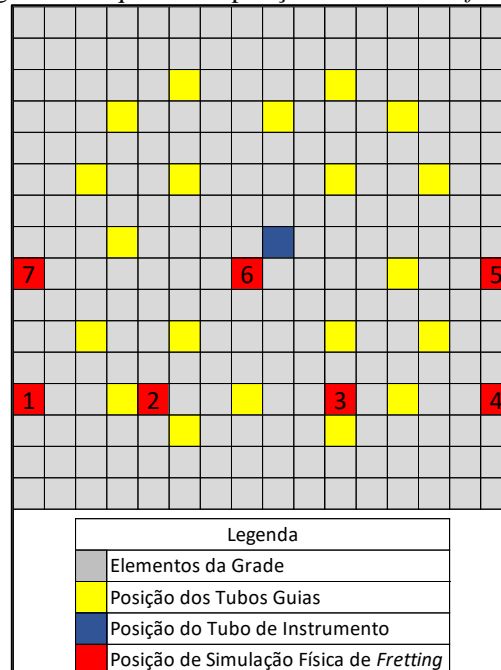
Propriedades Mecânicas					
Coefficiente de Atrito	Coefficiente de Poisson	Limite de Resistência a Tração (MPa)	Força de resistência da Célula (N)	Rigidez da Célula* (N/mm)	
0,5	0,31	520	30,7	82,3	
Composição Química (%)					
Zr	Nb	Sn	Fe	Al	O
97,75/ 97,45	1,02 – 1,05	0,90 – 1,11	0,22 – 0,23	0,02 – 0,03	0,10 – 0,14

2.2 MÉTODOS

2.2.1 Células da grade espaçadora analisadas

As posições de interesse para realizar o ensaio buscam regiões com maior e menor rigidez devido as características de concepção da grade. Na Figura 3, as células vermelhas representam as posições que foram feitos os ensaios.

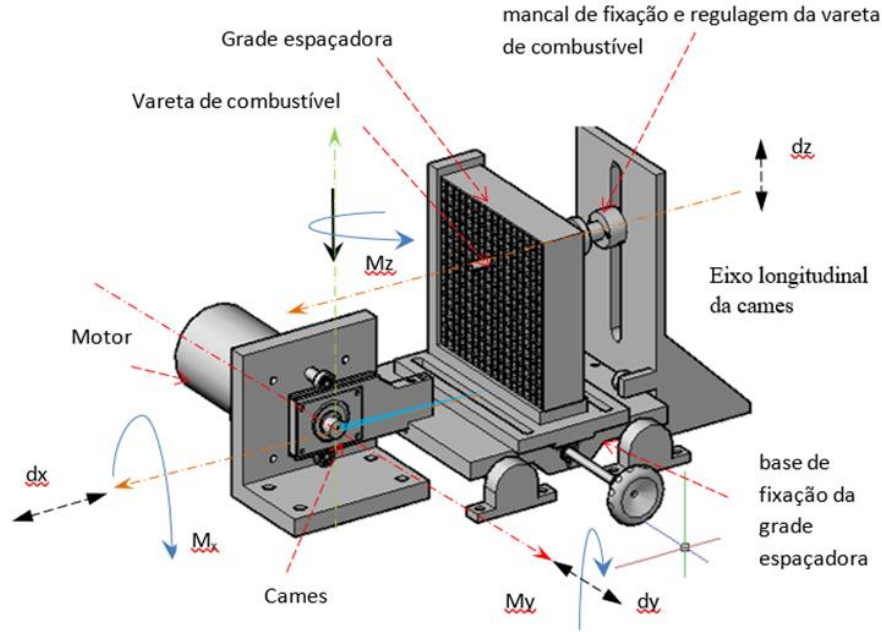
Figura 3 - Esquema das posições de ensaio de *fretting*.



2.2.2 Dispositivo para ensaios de desgaste por fretting

O funcionamento do protótipo se assemelha ao mecanismo biela-manivela. Ele foi projetado para produzir um movimento cíclico oscilatório perpendicular entre a vareta e a grade espaçadora com amplitude máxima de 0,07mm. A máquina possui o princípio de eixo descentralizado que, através do movimento rotacional do motor, imprime um movimento cíclico linear a mesa, gerando assim a oscilação para a ocorrência do *fretting*. O equipamento possui um motor de 220 V, 60 Hz e 0,5 cv, ligado a um inversor de frequência da marca Weg, modelo CFW100. A fim de garantir ar para refrigeração do sistema, existe também um ventilador de 220 V, 60 Hz e 1550 rpm. Ele possui dois sistemas móveis que permitem mudar a posição de ensaio tanto na vertical quanto na horizontal. A Figura 2 mostra um esquema do protótipo.

Figura 2 - Detalhes do protótipo desenvolvido para ensaios de *fretting*.



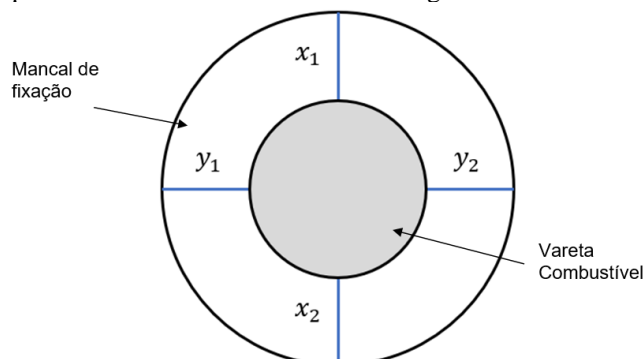
Onde dx , dy , e dz representam os deslocamentos nas direções x , y e z , respectivamente, ao passo que, M_x , M_y e M_z retratam as rotações em torno dos eixos x , y e z , respectivamente. O movimento do mancal de fixação da vareta combustível se dá na direção do eixo Z . Já o movimento da base de fixação da grade espaçadora se dá na direção do eixo Y . Essas duas são responsáveis pelo desalinhamento da grade em relação a vareta e mudança da posição de ensaio. Já o movimento oscilatório imprimido pelo motor a fim de induzir movimento relativo constante entre a grade e a vareta se dá na direção do eixo X .

2.2.3 Posicionamento das amostras de vareta combustível na grade espaçadora

Para produzir um desgaste uniforme nos 6 pontos de contato (duas molas e quatro batentes) da vareta na célula da grade, foram utilizados dois métodos de alinhamento: inicialmente montou-se a vareta combustível dentro da célula da grade, de modo que a única atuação de forças presente fosse a força elástica das duas molas e a força de reação dos quatro batentes. Assim, a vareta estaria totalmente alinhada à célula. Antes de travar a vareta no mancal de fixação estando o sistema ainda sem atuação de forças externas a célula, foram realizadas duas medidas via parquímetro distante 90° entre si. Com isso, via teoria de círculos concêntricos, espera-se garantir a continuidade do alinhamento da vareta dentro da célula da grade uma vez que x deverá ser igual a y , onde x e y são as

distâncias entre as extremidades externas da vareta e do mancal. O valor esperado para x e y é 16,67mm. A Figura 4 exemplifica a teoria de círculos concêntricos.

Figura 4 - Esquema de alinhamento da vareta com a grade e o mancal do equipamento.



Além dos mais, para minimizar o desalinhamento, foi utilizado o sistema de leitura de dados por strain-gages para auxiliar a montagem do dispositivo de ensaio de fretting. Esses, são transdutores capazes de medir a deformação mecânica em um dado corpo de prova. Assim, foram montados dois componentes distantes 90° entre si na base do mancal de fixação da vareta e estando a grade de leitura paralela ao deslocamento da grade. Para a leitura dos sinais dos strain-gages, foi utilizado o sistema Catman.

Os testes de desgaste foram realizados sem lubrificação a uma temperatura ambiente com umidade relativa de 50-60% durante 24 horas. O movimento oscilatório ocorreu com uma taxa de aquisição de dados de 50 Hz. Após, as amostras foram acusticamente limpas, em acetona, por 5 min e seca em ar comprimido para análise microscópica.

2.2.4 Topologia da região de desgaste por fretting e estimativa de volume

A caracterização 3D das regiões afetadas se dá pela leitura das regiões afetadas pelo equipamento confocal. O Métodos de detecção de pixels, por processo analítico, para avaliação da variação topográfica permitiu, identificar as transformações físicas da área superficial pontual após aplicação de carregamento constante de Pam e Pac. Este processo arremeteu considerações sobre a assinatura textural local da área de desgaste. Foram produzidas imagens digitais 3D (ID3D) de cada área de desgaste e seus respectivos arquivos.dat. As coordenadas de posição de cada pixel foram obtidas através do software da LEIKA para microscópio confocal interferométrico modelo LEIKA DCM3D a partir de uma área padrão ($A = 1,27 \times 0,98$ mm).

O índice de similaridade estrutural, ISI, levou em consideração, além da estrutura (e), a influência da luminescência (l) e do contraste (c) da ID3D. São fatores da equação que auxiliam na avaliação da distorção estrutural. Estes três fatores fundamentaram o conceito matemático, que foi aplicado à análise, considerando uma analogia com a equação apresentada por Wang et al., para avaliação do índice de similaridade da imagem (ISI). Com base na medida estrutural de distorção de uma expressão adimensional, foi possível estabelecer uma variação volumétrica (Δv) ao longo do tempo para cada amostra, conforme mostrado nas Eqs. (1-2).

$$ISI = \left[l(A_{adj}, A_{pdj}) \right] \left[c(A_{adj}, A_{pdj}) \right] \left[e(A_{adj}, A_{pdj}) \right] \quad (1)$$

$$\Delta v = \left[\int_1^N dA_{adj} \cdot h_{ap_{ji}} - \int_1^N dA_{ap_{ji}} \cdot h_{ap_{ji}} \right] \leftrightarrow dA = \frac{A}{N} \quad (2)$$

Onde $f(e)$ = é uma função matemática, adimensional, de correlação estrutural que determina o grau de interdependência entre duas funções de mesma natureza, $f(l)$ = é uma medida da densidade da intensidade, adimensional, de uma luz refletida numa dada direção e está relacionada com a variação das alturas topográficas nas áreas de deformação, $f(c)$ = é uma função relacionada com a medida, adimensional, de dispersão de medidas de rugosidade, A_{ad} = conjunto de medidas das coordenadas para imagem analisada, A_{pd} = conjunto de medidas de coordenadas para imagem padrão, dA_{ad} = área representada por cada pixel, h_{ap} = altura topográfica correspondente a cada pixel.

Uma vez obtido um padrão de altura de desgaste foi possível estimar a perda de volume dessas regiões dentro da área padrão de leitura do confocal.

Para as marcas que excederam as dimensões padrão, foi realizado uma medição da área real através de uma ampliação da imagem em microscópio e uma posterior estimativa da área através do software ImageJ e feita uma extrapolação do volume considerando a constância da altura lida na área de leitura do VCN.

A região de desgaste escolhida para aplicar esse método foi o contato da mola com a vareta, uma vez que essa região é central, o que minimiza os efeitos do desalinhamento da vareta dentro da grade espaçadora e irá permitir uma melhor comparação entre as diferentes posições.

2.2.5 Caracterização microestrutural

A fim de se analisar as características do material e a natureza do desgaste da zona afetada, a região foi avaliada por meio das técnicas de Microscopia Ótica, MO, e Eletrônica de Varredura, MEV. Antes da realização das imagens nesses equipamentos, foi necessário retirar possíveis materiais depositados dentro da região de desgaste. Para isso as amostras foram limpas em uma máquina ultrassom de limpeza Unique, modelo Ultraclean por cinco minutos mergulhadas em acetona.

Para as análises via microscopia óptica foi utilizado um microscópio modelo Olympus GX71 com ampliação 100x. Para a obtenção de imagens via MEV foi-se utilizado o detector de elétrons secundário modelo Jeol JSM - 5800 LV. Os parâmetros de operação utilizados foram voltagem de 20 kV, WD de 9,5 mm e ampliações de 500x e 1000x. Para essa mesma imagem, a amostra foi cortada em retângulos ao longo da seção longitudinal dos tubos e em seguida prensada até tornar-se plana. Após lixá-la nas sequências de lixa de SiC: 220-4000, a amostra foi polida em solução de alumina de 1 μ m e ácido oxálico, na proporção 4:1. A amostra foi atacada quimicamente com uma solução de H₂O + HNO₃ + HF, na proporção 10:9:1. Já para a imagem da microestrutura da amostra como recebida, foi utilizado o mesmo equipamento MEV, com os parâmetros de operação: voltagem de 15 kV, WD de 6,0mm e aumento de 1000x.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O resultado experimental mostrou que, sob as mesmas condições de montagem das amostras na grade espaçadora, o desalinhamento provocado pelos erros ainda teve influência do desgaste.

A Figura 5a e 5b apresentam, respectivamente, as regiões esperadas e o real obtido da ocorrência de *fretting* nas posições de ensaio à 0°. Nessa posição, o contato da vareta combustível com a grade se dá pelos dois batentes, um em cada extremidade. Nelas, fica claro que houve diferença entre as amostras. Os CP1 e CP7 foram as que apresentaram maiores áreas afetadas, mas com marcações somente em um lado da amostra. O CP2 também apresentou marcas somente de um lado, mas com área afetada menor do que as anteriores. Os CP3, CP4 CP5 e CP6 apresentaram desgastes em ambos os lados da vareta, mas com marcas pequenas.

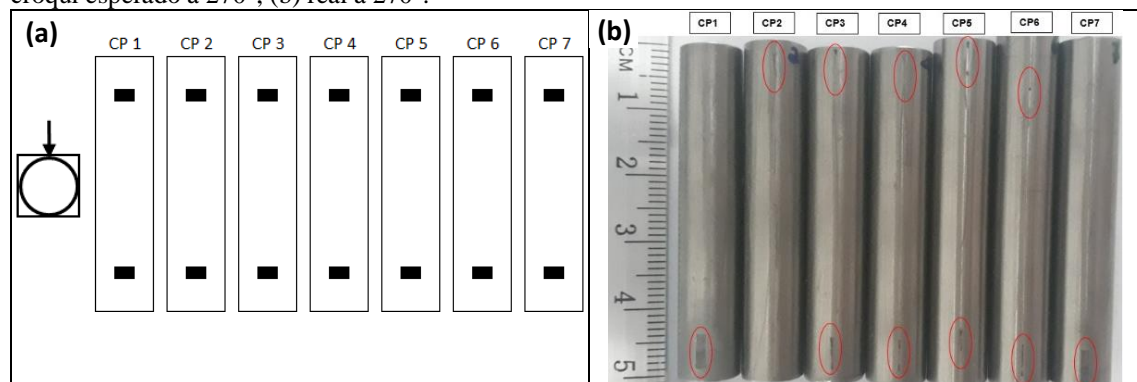
A Figura 5c e 5d apresentam, respectivamente, as regiões esperadas e o real obtido da ocorrência de *fretting* nas posições de ensaio à 90°. Nesta, os CP1, CP2, CP6 e CP7 continuam apoiados em dois batentes mas, os CP3, CP4 e CP5 passam a ficar apoiados

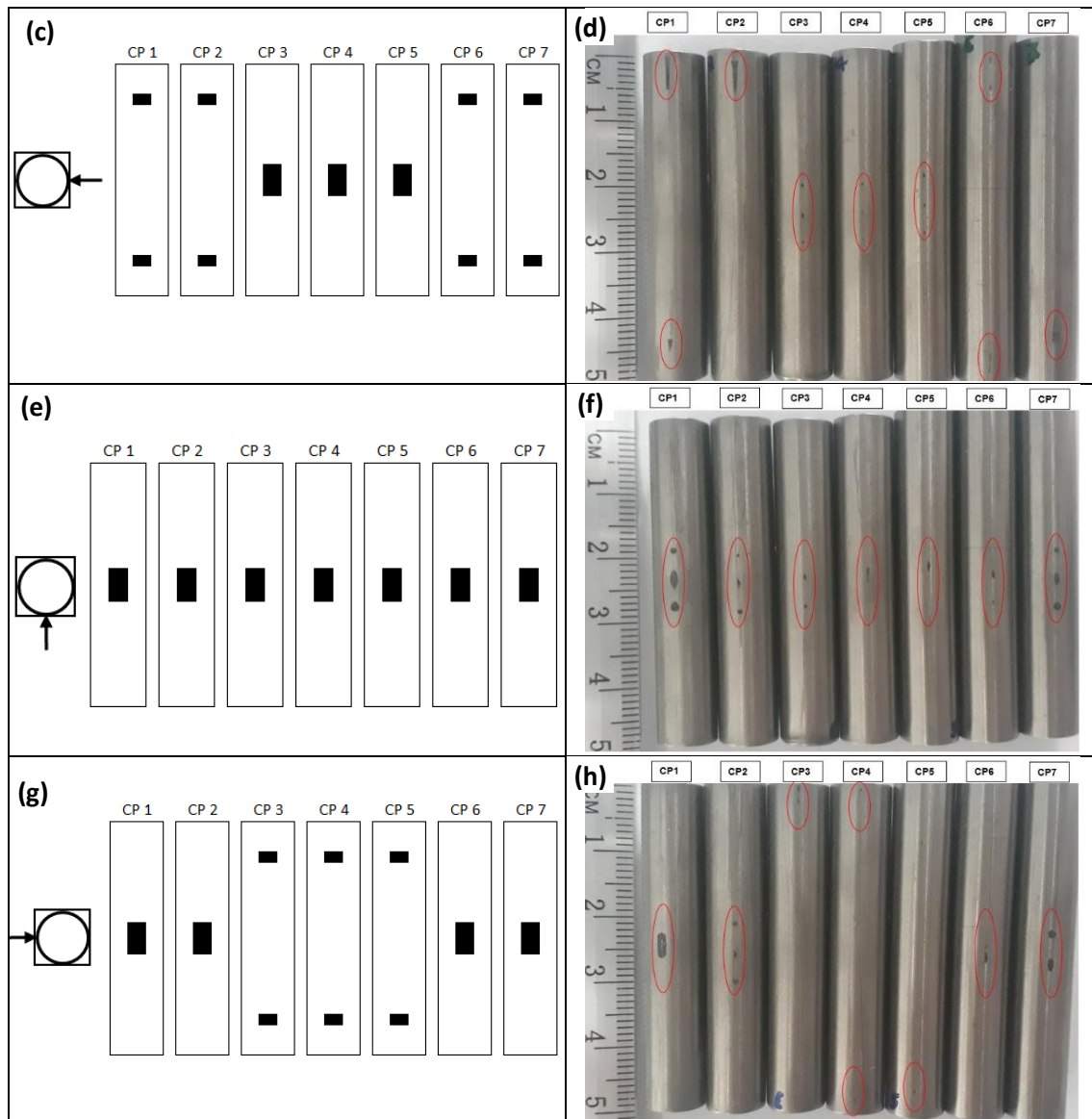
na mola, que está centralizada no corpo de prova. Novamente, há consideráveis diferenças de desgastes entre as amostras. O CP1 apresentou desgaste em ambos os batentes, com destaque para o tamanho da marca apresentada nas duas regiões de contato. O CP2 e CP7 apresentaram um desgaste acentuado em apenas um batente. O CP6 apresentou um desgaste uniforme entre os dois batentes, no entanto com uma área superficial de desgaste menor que apresentado nas outras amostras. Já no CP3, CP4 e CP5, as marcas foram ocasionadas pelas molas sendo possível perceber um desgaste uniforme entre os três e com todos eles apresentando três pontos de contato da mola.

A Figura 5e e 5f são apresentadas as posições de ensaio a 180°, sendo, respectivamente, o esperado e o real ensaiado. Nessa posição, o contato da vareta combustível com a grade se dá pelas molas, levando à um desgaste central no corpo de prova. As amostras CP1, CP7 e CP2 apresentaram, respectivamente, a maior área desgastada e com três marcas da mola. As amostras CP3 e CP6 apresentam somente duas marcas da mola enquanto o CP4 e CP5 apresentaram apenas uma marca.

Na Figura 5g e 5h, são apresentadas as posições de estudo à 270°. Nessa, o CP1, CP2, CP6 e CP7 estavam apoiadas em molas, o que irá ocasionar uma marca central. Já os CP3, CP4 e CP5 estavam apoiados em batentes o que irá ocasionar marcas nas extremidades. Nos contatos com a mola, os CP1 e CP7 apresentam maiores marcas, seguido do CP2 e CP6. O primeiro, teve uma grade área afetada em apenas um ponto, o que sugere um deslocamento linear com amplitude grande, mas sem profundidade da marca. Nos contatos com os batentes, o CP3 e CP5 apresentou desgaste apenas em um lado da amostra, ao passo que o CP4 apresentou duas marcas, porém com desgaste visual pequeno.

Figura 05 - Desgaste ocorrido nas amostras durante os ensaios pelos batentes e molas: (a) croqui esperado à 0°, (b) real à 0°, (c) croqui esperado à 90°, (d) real à 90°, (e) croqui esperado à 180°, (f) real à 180°, (g) croqui esperado à 270°, (h) real à 270°.





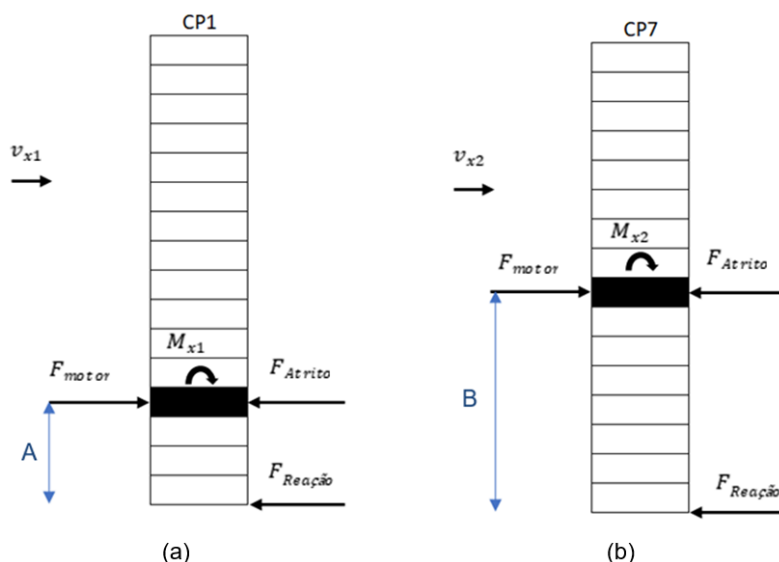
Ficou evidenciado que a posição de 180°, onde todos os corpos de prova estavam apoiados na mola, tiveram os desgastes mais uniformes entre as sete amostras. Isso justifica-se pois todos os contatos são centrais o que diminui o efeito do desalinhamento na montagem.

Sob a ótica de desgaste, nos 6 pontos de apoio da amostra (duas molas e quatro batentes) os corpos de prova 1 e 7 apresentaram maiores desgastes. Em condições reais de trabalho, a grade possui maior rigidez no centro, devido à presença dos tubos guias. Assim, as extremidades ficam mais livres a movimentos oscilatórios vibratórios de natureza elástica. Com isso, há uma maior probabilidade de ocorrência de *fretting* nessas regiões, o que foi observado nos ensaios.

As amostras CP1 e CP7, mesmo estando na extremidade esquerda, ainda apresentaram uma diferença de desgaste entre si. Isso pode ser explicado devido a

diferença de altura entre as amostras, onde o momento aplicado ao conjunto no CP7 é maior do que no CP1, $M_{x2} > M_{x1}$. A Figura 6 exemplifica isso devido a diferença de altura, representado pelas letras A e B, onde B é maior que A. Esse momento fletor que a grade está submetida irá absorver parte do movimento, fazendo um desgaste menor na amostra.

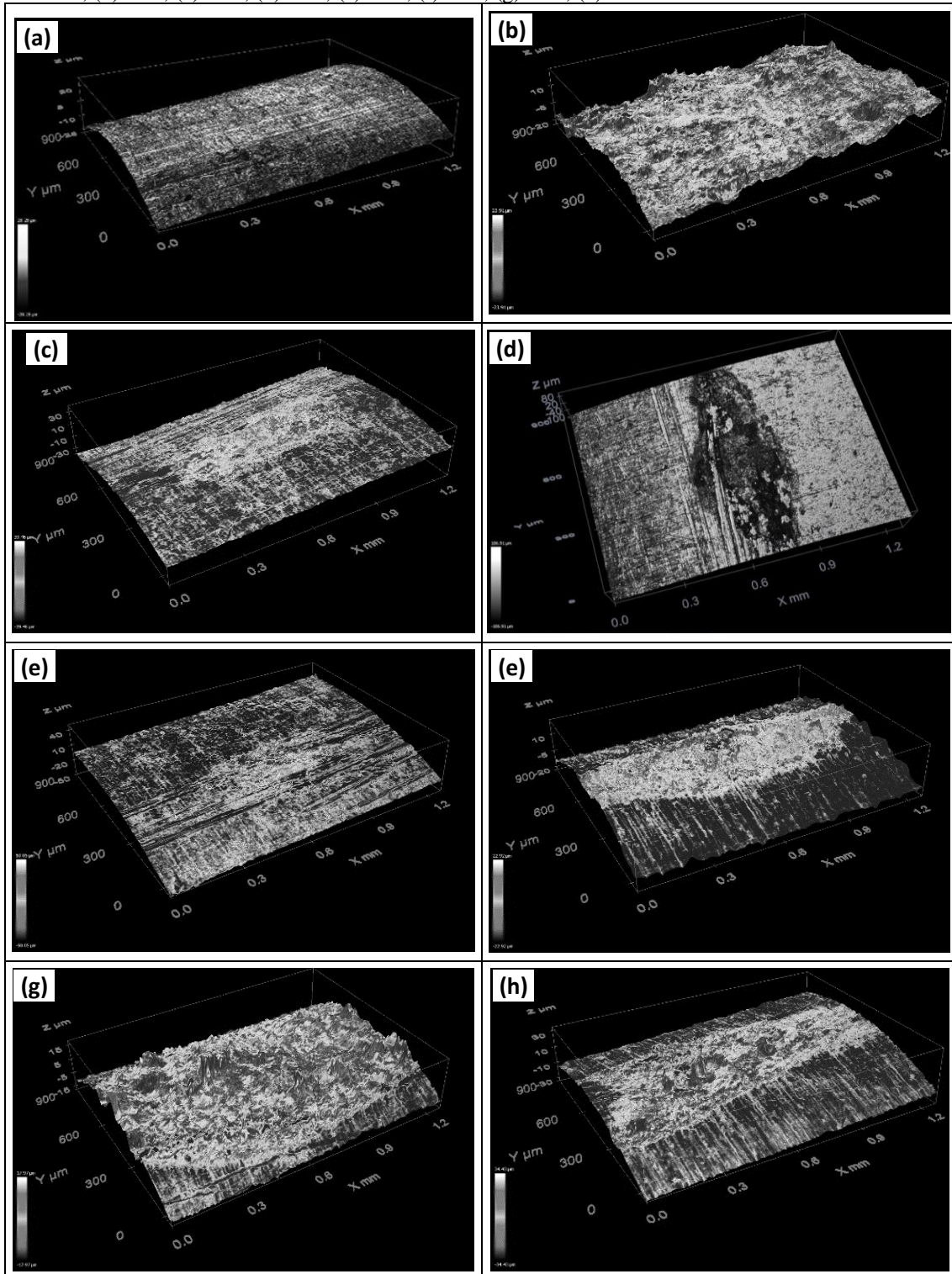
Figura 6 - Diagramas de corpo livre e identificação de carregamentos e velocidades: (a) CP1 e (b) CP7.



Onde, v_{x1} é velocidade de deslocamento da amostra 1, v_{x2} é a velocidade de deslocamento da amostra 7, F_{motor} é a força imprimida pelo motor, F_{Atrito} é a força total de atrito que a mola e os batentes imprimem no tubo, $F_{Reação}$ é a força de reação oriunda da mesa, M_{x1} é o momento resultante no primeiro cenário de ensaio, M_{x2} é o momento resultante no sétimo cenário de ensaio, A e B são as distâncias entre a base da mesa e o local de ensaio. Em condições reais de operação, esse efeito não está presente.

Uma vez constatada a região da grade que apresentou maior desgaste, mostrou-se oportuno fazer uma análise da área desgastada na parte central da mola da grade espaçadora a fim de estimar a perda de volume nessa região. A posição escolhida foi aquela apresentada a 180°, como mostrado na Fig. 5, por ter tido um desgaste uniforme, todas as amostras estarem sujeitas a mesma condição de contato (mola) e pelo fato de o contato da vareta com a grade ser central, o que irá reduzir a influência do desalinhamento da amostra. A Figura 7 mostra as imagens em três dimensões e por meio da técnica de microscopia confocal, a natureza do desgaste atribuído às amostras durante os ensaios pelas molas da grade espaçadora. As análises foram feitas para uma área padrão de 1,27 mm por 0,98 mm.

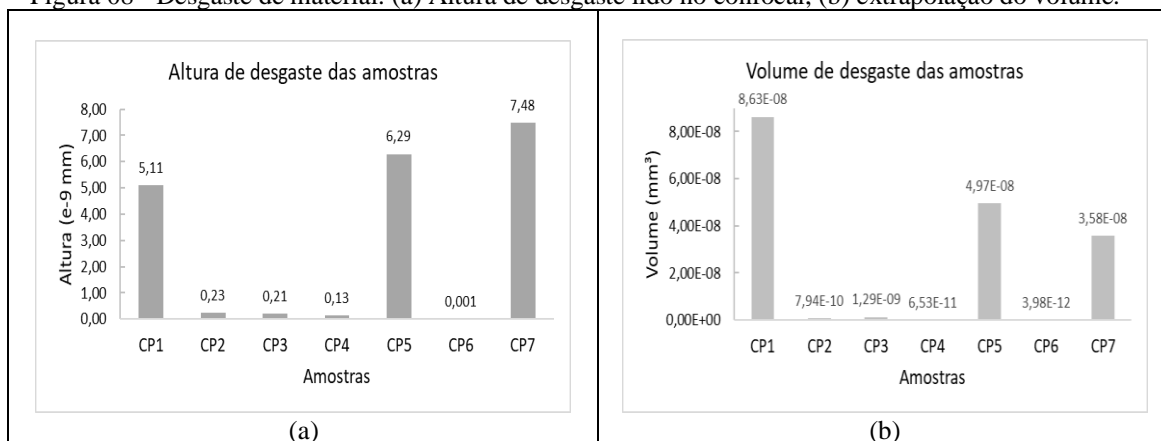
Figura 7 - Caracterização do desgaste por *fretting* na interface de contato vareta-mola. (a) condição como recebido, (b) CP1, (c) CP2, (d) CP3, (e) CP4, (f) CP5, (g) CP6, (h) CP7



A Figura 8a apresenta de forma gráfica a média de altura de desgaste lido através de imagem por confocal na área padrão. Já Figura 8b apresenta e o volume perdido de material após a extrapolação da área real de desgaste. Esses resultados corroboram com a Fig. 5 onde os maiores desgastes ocorreram nas amostras 1 e 7. A amostra 5, apesar de

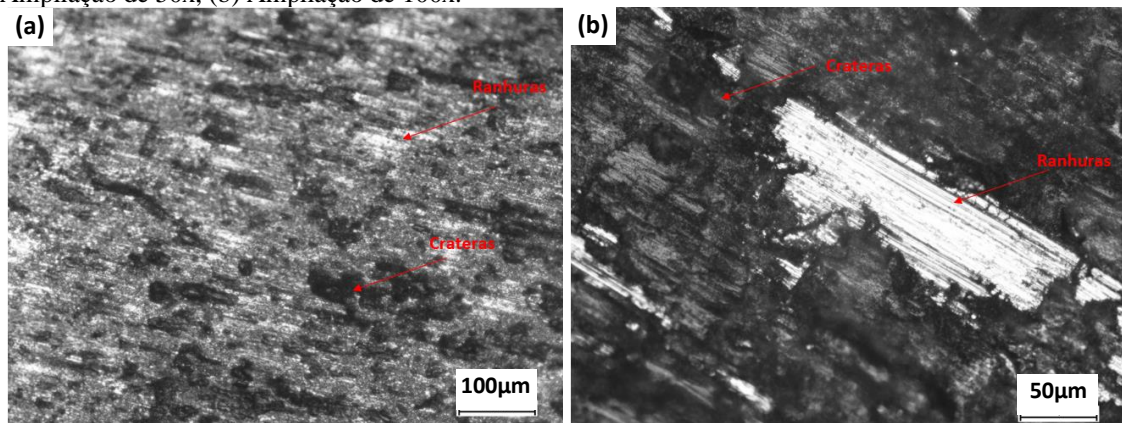
mostrar um desgaste visual pequeno, teve bastante arrancamento de material ao passo que a amostra 6 teve uma zona afetada considerável através das imagens do confocal mas a altura de desgaste foi pequena, o que sugere que o material foi apenas deslocado e não arrancado. Com isso, fica constado que as células da borda da grade estão mais suscetíveis ao desgaste.

Figura 08 - Desgaste de material: (a) Altura de desgaste lido no confocal, (b) extrapolação do volume.



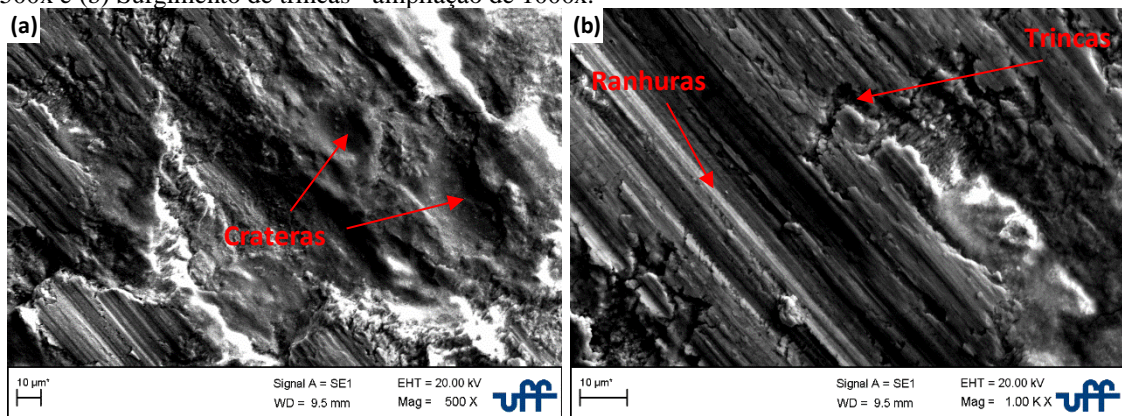
A fim de caracterizar a zona afetada, foi escolhido a amostra CP1 no contato central com a mola, a 180°, por apresentar maior área desgastada. A Figura 9 mostra a região de desgaste provocado pela mola da célula da grade espaçadora. Pode-se notar uma característica porosa, dando à região características de picos e vales. Isso corrobora com o observado pela caracterização tridimensional apresentado anteriormente na Fig. 7. Na Figura 9b, onde há uma ampliação maior, a análise sugere que o desgaste é feito em algumas regiões por desbaste de pequenas partículas em ranhuras e em outras regiões por uma espécie de arrancamento de partículas maiores. Essa análise sugere que a ocorrência de fretting causa um aumento da rugosidade do material por arrancamentos e não uma redução dessa propriedade por um polimento.

Figura 9 - Região de desgaste mostrado em MO no contato da mola com o CP1 na posição de 180°. (a) Ampliação de 50x, (b) Ampliação de 100x.



Na região de desgaste da mola no CP1 na posição de 180°, as imagens obtidas por MEV, no modo de elétrons secundários, confirmam as evidências relatadas pelas fotos de MO. A Figura 10a foi obtida com um aumento de 500x. Seu foco foi realizado nas crateras, que se apresentam com uma superfície rugosa além de sugerir que se predominam na região afetada. Já a Figura 10b foi obtida com uma ampliação de 1000x. Nela é possível ver que, nas regiões de desgaste por ranhuras, há um certo polimento da região como também há um início de propagação de trincas. Essas trincas aparecem devido à presença da força de atrito entre a mola e a vareta, que irá gerar um cisalhamento no material e por fim levar a um arrancamento da liga, gerando assim as crateras vistas na Figura 10a.

Figura 10 - Micrografias da região de desgaste obtidas via MEV: (a) Ocorrência de crateras-ampliação de 500x e (b) Surgimento de trincas - ampliação de 1000x.



4 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou como linha guia o mecanismo de falha por fretting em varetas combustíveis de liga Zr-1Nb-1Sn-0,1Fe, em uma grade espaçadora. Os ensaios físicos, através de um protótipo, para indução do desgaste foram bem-sucedidos e apresentou as marcas e as perdas de volume encontradas em estudos anteriores. Assim, o CP1, CP5 e CP7 apresentaram, respectivamente, uma maior perda de volume e área superficial. O CP2, CP3 e CP6 apresentaram características de área superficial afetada, porém com pouca perda de volume. Já o CP4 não apresentou significativas zonas afetadas tão pouca perda de volume. Esses resultados obtidos levam a conclusão que as regiões externas na grade estão mais suscetíveis a ocorrência de fretting, uma vez que são menos rígidas devido a presença dos tubos guias no interior da grade. Além disso, devido as características de fabricação da máquina de ensaio, foi possível verificar que a grade está sujeita a momentos fletores, o que reduz os deslocamentos lineares entre o tubo e a grade em regiões mais alta. Com isso, a presença de regiões de fretting tendem a diminuir, partindo do referencial inferior para o superior. Portanto, a posição de ensaio 1, é a região que mais apresenta tendência de ocorrência do desgaste.

As imagens em três dimensões das zonas afetadas mostram que essas regiões apresentam um relevo acidentado, com microrregiões de cratera e outras de pico, o que sugere que o material sofre arrancamento de partículas.

As imagens por MO corroboram as afirmações feitas mediante as imagens em três dimensões. No entanto, foi possível identificar regiões que o desgaste ocorreu por desbaste e não por arrancamento. Essa região, inclusive, é facilmente identificada por apresentar característica de cor e brilho diferente das demais.

Quando se analisou as imagens por MEV, foi possível identificar a natureza das regiões de cratera. Além disso, ficou claro que essas regiões desbastadas estão sujeitas a trincas. Conforme o ensaio de fretting continua, essas trincas de propagam e levam ao arrancamento do material.

REFERÊNCIAS

- WOLTER, R., Performance do combustível de Angra I e II e performance mundial. 1 SITEC, Angra dos Reis – RJ, 2006.
- ATTIA, M. H. On the fretting wear mechanism of Zr Alloys, *Tribology International* 39, p. 1320-1326, 2006.
- KIM, K. T. the study on grid-to-rod fretting wear models for PWR fuel, *Nuclear Engineering and Design* 239, p. 2820-2824, 2009
- BLAU P. J. A multi-stage wear model for grid-to-rod fretting of nuclear fuel rods. *International Journal on the Science and Technology of Friction Lubrication and Wear* 313, p. 89-96, 2014.
- Kim K. T. The effect of fuel rod loading speed on spacer grid spring force, *Nuclear Engineering and Design* 240, p. 2884-2889, 2010.
- SONG, K., KIM S., Determination of the Optimum Welding Parameters for a Laser Welded Spacer Assembly for PWRs. *JLMN - Journal of Laser Micro/Nanoengineering*, Vol. 2, no. 1, 2007.
- Zheng JF, Luo J, Mo JL, Peng JF, Jin XS, Zhu MH. Fretting wear behaviors of a railway axle steel. *Tribol Int* 2010;43:906–11.
- Lee Y-H, Kim H-K. Fretting wear behavior of a nuclear fuel rod under a simulated primary coolant condition. *Wear* 2013;301:569–74.
- Z. Wang, A. C. Bovik, “A universal image quality index,” *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 9, pp. 81–84, Mar, 2002.
- Z. Wang, A. C. Bovik, H. R. Sheikh, E. P. Simoncelli, “Image quality assessment: from error visibility to structural similarity,” *IEEE Trans. on Image Processing*, Vol. 13, No.4; 2004.
- Z. Wang, Ligang Lu and Alan C. Bovik, “Video Quality Assessment Based on structural. Distortion Measurement”, *signal processing: image communication*, vol. 19, no. 1; 2004.
- K. Mallikarjuna, K. S. Prasad, M. V. Subramanyam,” *Image Compression and Reconstruction using Discrete Rajan Transform Based Spectral Sparsing*”, *I.J. Image, Graphics and Signal Processing*, 1, pp 59-67; 2016.
- SOARES, A. R., LAMAS, W. Q., CAMARGO, J. R. Ensaio e avaliação por líquidos penetrantes em placas de bocais de elementos combustíveis na área nuclear. *Brazilian Journal of Development*, Curitiba, v.7, n.1, p.3101-3112 jan. 2021.