

## DESENVOLVIMENTO DE UM EQUIPAMENTO PARA ENSAIO DE FADIGA TÉRMICA

*Ayrton de Sá Brandim  
Orlando José Sarria Hernández  
Nelson Guedes de Alcântara  
Claudemiro Bolfarini  
Ronaldo Pinheiro da Rocha Paranhos*

### Resumo

O trabalho apresenta o desenvolvimento de um equipamento para a realização do ensaio de fadiga térmica com o objetivo de avaliar o comportamento de materiais metálicos quando submetidos à fadiga térmica. Durante o desenvolvimento do equipamento foram executados vários testes para a concepção final da porta-amostra, da geometria e forma do corpo-de-prova e dos parâmetros para a execução do ensaio de fadiga térmica. Acertado a parametrização do equipamento executou-se uma série de ensaios de fadiga térmica em vários materiais. Os resultados obtidos das medições de temperatura tanto interna quanto externa para mostrar a ausência de gradientes térmicos através do diâmetro da amostra e do carregamento imposto pelas tensões térmicas foram captados pelo software fadiga térmica garantindo a confiabilidade e reprodutibilidade dos resultados. As tensões térmicas geradas durante os ciclos de temperatura foram monitoradas por uma célula de carga colocada em uma das amostras ensaiadas. A degradação, a deterioração e a falência dos materiais ensaiados foram acompanhadas dentro de determinadas faixas de ciclos de ensaios de fadiga térmica.

**Palavras-chave:** Fadiga térmica; Ensaio de fadiga térmica.

### DEVELOPMENT OF AN EQUIPMENT FOR THERMAL FATIGUE TESTING

#### Abstract

This work presents the development of an equipment for thermal fatigue testing with the objective to evaluate the behaviour of metallic materials when subjected to thermal fatigue. During the development of the equipment, several tests have been carried out in order to define the final conception of the sample holder, the geometry of the sample and parameters to be used in the thermal fatigue test. Once the set up conditions of the equipment was defined, thermal fatigue tests were carried out. The obtained results for the temperature measurements inside and outside specimens show the absence of thermal gradients toward the diameter of the specimens. Thermal tensions loading data were obtained via a thermal fatigue software, which prove to generate reliable and reproducible results. Thermal tensions generated during temperature cycles were data logged by a load cell inserted in one of the specimen tested. Degradation, deterioration and failure of the materials tested were evaluated for some range of cycles of the thermal fatigue test.

**Key words:** Thermal fatigue; Thermal fatigue test.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica apresentada na 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ*

<sup>2</sup> *LMO-CEFETPI. Praça da Liberdade 1597, Centro/Norte; 64000-040, [ayrton@cefetpi.br](mailto:ayrton@cefetpi.br)*

<sup>3</sup> *CCDM/UFSCar. Rod. Washington Luis, Km 235, CEP 13565-905, São Carlos – SP, CP 147*

<sup>4</sup> *DEMa-CCDM-UFSCar. Rod. Washington Luis, Km 235, CEP 13565-905, São Carlos – SP, CP 147, [nelson@power.ufscar.br](mailto:nelson@power.ufscar.br)*

<sup>5</sup> *DEMa-CCDM-UFSCar. Rod. Washington Luis, Km 235, CEP 13565-905, São Carlos – SP, CP 147, e-mail: [cbolfa@power.ufscar.br](mailto:cbolfa@power.ufscar.br)*

<sup>6</sup> *LAMAV-UENF. Av. Alberto Lamargo, 2000 – Horto – Campos dos Goytacazes – RJ, CEP: 28015-620, e-mail: [rparanhos@terra.com.br](mailto:rparanhos@terra.com.br)*

## INTRODUÇÃO

Fadiga térmica é por definição, um processo de aplicação repetitiva de ciclos térmicos, durante a qual os níveis de tensões e deformações são resultantes exclusivamente dos gradientes de temperatura entre os valores máximo e mínimo sem haver intervenção de cargas mecânicas. A falha resultante dos elementos deve ser entendida como um estado de disfuncionalidade, incluindo a ruptura como um caso extremo, ou a ocorrência de trincas por fadiga térmica na superfície do material.

A resistência do metal, quanto à fadiga térmica, se por um lado é muito importante para suportar a falha por fadiga térmica para diversas aplicações, por outro lado é uma propriedade muito difícil de determinar experimentalmente, pois o comportamento em serviço é influenciado por um número de fatores que são difíceis de reprodução em laboratório.<sup>(1-2)</sup>

As condições reais de carregamento térmico em serviço de estruturas e componentes de máquinas não podem sempre ser simuladas com precisão nos laboratórios, embora, seja claro, que a simulação dos ciclos térmicos deve ser tão precisa quanto possível e o modelo usado durante o ensaio deverá assemelhar-se ao máximo às características críticas do componente, oferecendo confiança nas respostas das questões concernentes à vida em serviço do elemento ensaiado, e para identificar os fatores que influenciam na sua durabilidade.

Os ensaios experimentais são realizados para estimar, com a maior precisão possível, a vida em serviço de um componente fabricado de um material dado, quando esse está sendo ou for usado nas condições industriais para o qual foi indicado, sendo necessário ter algum critério prático para identificar o final da vida útil de um componente. A escolha do critério depende do material, das condições de operação e da função que o componente deve desenvolver. Na prática, o critério deve ser simples para ser aplicado nos laboratórios e no campo e não permitir interpretações ambíguas dos resultados. Em consequência, o número de ciclos térmicos para a ocorrência da primeira trinca visível é freqüentemente utilizada como a medida da resistência a fadiga térmica, isto é, o tempo de vida útil do componente.<sup>(1,3)</sup>

Em alguns materiais, especialmente se o ciclo de fadiga térmica causa substancial deformação, o instante no qual uma única trinca ocorre torna-se de difícil à identificação, assim como a presença de uma rede de finas trincas na superfície pode aparecer quase simultaneamente. Em tais casos o critério adotado é a ocorrência de um pequeno número de trincas superficiais, e é evidente que para componentes importantes, qualquer que seja o critério, o exame das trincas deve ser minucioso e todas as especificações devem ser rigorosamente observadas.<sup>(1)</sup>

## PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A característica essencial do equipamento desenvolvido é a imposição de uma completa restrição longitudinal do corpo de prova, provocando tensões e deformação térmicas obtidas a partir de sucessivos choques térmicos, produto de aquecimento e resfriamento da amostra, existindo ainda a possibilidade da aplicação de cargas de tração ou compressão sobre as amostras, o equipamento de fadiga

térmica é apresentado na Figura 1. Este equipamento possui um sistema de monitoramento de temperatura com termopar e/ou termômetro infravermelho, controle de carga aplicada ou gerada durante o ensaio e controle eletrônico da rotação da mesa.



**Figura 1.** Equipamento de fadiga térmica.

O movimento da mesa giratória é proporcionado por esferas que estão alojadas sobre a mesa fixa, livre de quaisquer interferências, a uma velocidade constante, proporcionada pelo conjunto motor-redutor-inversor de frequência. Sobre a mesa giratória estão posicionadas as portas-amostra, onde por meio de um parafuso com porca e contra porca colocada na parte superior pode ser aplicada, ou carga de tração, ou de compressão, ou apenas uma completa restrição da mesma.

O desenvolvimento da tensão térmica cíclica sobre o corpo de prova é propiciado pelo aquecimento da amostra, até uma temperatura máxima e logo em seguida, resfriada até uma temperatura mínima, previamente determinada.

O corpo de prova a ser ensaiado é submetido a restrição e tensões induzidas termicamente sendo muito importante a obtenção de uma distribuição radial de temperatura no corpo de prova durante o ciclo térmico imposto. A variação radial da temperatura durante o aquecimento e resfriamento deve ser minimizada para reduzir tensões térmicas secundárias produzidas por transferência de calor radial.

Durante o ensaio, o corpo de prova alcança a sua temperatura máxima no centro da mesma, num comprimento de aproximadamente de 10 -12 mm, sendo menor esta temperatura nos seus extremos, portanto, o efeito da temperatura nos extremos provocado pela mudança de diâmetro não é considerado.

O aquecimento da amostra apesar de ser realizado bruscamente é efetuado de forma gradual. Primeiramente a amostra é aquecida num primeiro estágio e em seguida é aquecida num segundo estágio, alcançando assim a temperatura máxima desejada. Com este preaquecimento garante-se que o centro do corpo de prova é aquecido até uma temperatura muito próxima a da superfície, diminuindo os gradientes térmicos na seção transversal e evitando diferenças na microestrutura do material. A taxa de aquecimento medida no centro do corpo de prova é de aproximadamente 110°C/seg. Durante o resfriamento a amostra permanece um período de tempo suficiente para garantir que seja total e homogêaneamente resfriada, obtendo com isto uma taxa de resfriamento de aproximadamente 85°C/seg.

O corpo de prova selecionado para ser usado no equipamento apresenta uma geometria cilíndrica com  $\Phi_{\text{mínimo}} = 3,0$  mm para garantir a captação dos dados referente à temperatura e com o objetivo de evitar cantos que provoquem concentração de tensões. Em função do estado de total restrição do corpo-de-prova, o mesmo não pode contrair ou expandir-se livremente quando submetido às variações bruscas de temperatura, surgem tensões térmicas devido ao gradiente de temperatura que podem comprometer a estabilidade do corpo-de-prova durante o ensaio de fadiga térmica. Assim sendo, foi calculada a tensão térmica para condições críticas,  $\Delta T = 650^{\circ}\text{C}$ , para vários tipos de materiais, obtendo-se, no caso do aço inoxidável martensítico  $\sigma_{\text{térmica}} \cong 150\text{MPa}$ . Para conferir a possível existência de flambagem foi calculada a tensão crítica de flambagem e comparada com a tensão térmica, obtendo-se um valor de  $\sigma_{\text{crítica}} \cong 1150\text{MPa}$ . Como  $\sigma_{\text{térmica}} < \sigma_{\text{crítica}}$  foi garantido a ausência da flambagem durante os ensaios. O detalhe deste corpo de prova é mostrado na Figura 2 com as dimensões em mm.

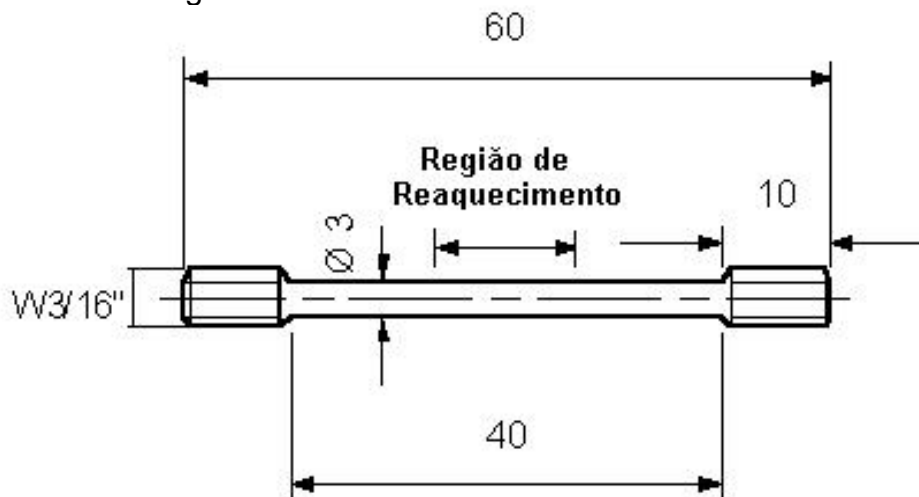


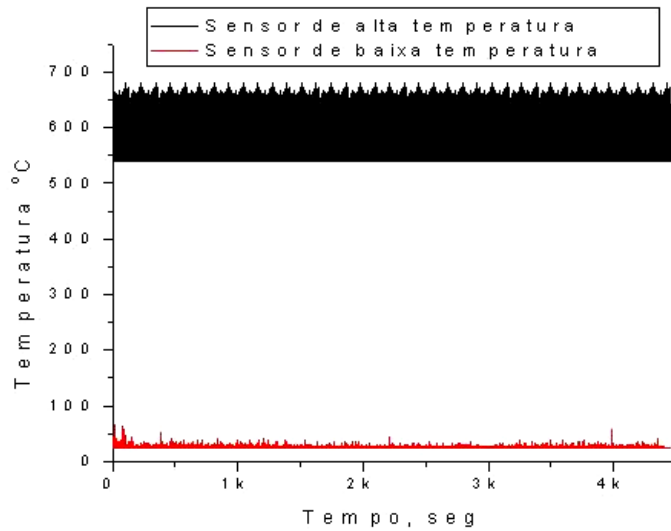
Figura 2. Detalhe do corpo de prova.

## RESULTADOS

A seguir apresentam-se os resultados das variáveis medidas durante o ensaio de fadiga térmica.

### a) Temperatura do Ensaio

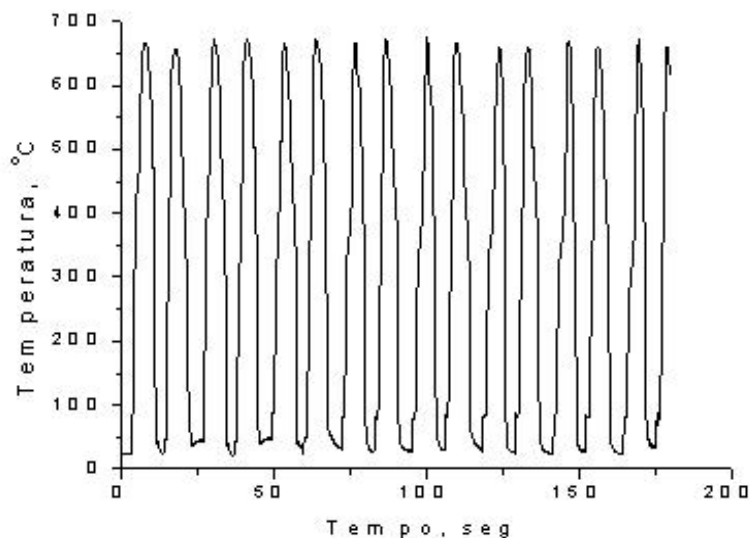
Com o objetivo de garantir a reprodutibilidade e confiabilidade dos resultados foram realizados ensaios em vários tipos de materiais em determinadas condições de temperatura. A seguir apresenta-se um dos resultados com  $T_{\text{máxima}}$  na faixa de  $600 - 700^{\circ}\text{C}$  e  $T_{\text{mínima}}$  na faixa de  $20 - 50^{\circ}\text{C}$ . A Figura 3 apresenta um gráfico da temperatura medida na superfície da amostra durante vários ciclos térmicos.



**Figura 3.** Temperatura externa da amostra durante vários ciclos térmicos.

Como pode ser observado na Figura 3, a temperatura máxima durante o ensaio variou numa faixa de 600 a 700°C, sendo que a temperatura mínima alcançada variou entre 30 e 60°C. Quanto maior for a diferença entre os valores máximo e mínimo de temperatura, mais severos são os ciclos térmicos durante os ensaios.

Com o objetivo de confirmar a não existência de possíveis gradientes térmicos na seção transversal da amostra, e garantir maior uniformidade na microestrutura, mediu-se a temperatura interna do corpo de prova. Foi observado que a diferença entre os valores de temperatura externa e interna não é significativa, conforme apresentado na Figura 4.



**Figura 4.** Temperatura interna da amostra durante o ensaio de fadiga térmica.

Da Figura 4, observa-se a mudança brusca de temperatura no interior da amostra num pequeno intervalo de tempo, sendo que estes sucessivos choques térmicos geram fadiga térmica e consequentemente trincas térmicas.

## b) Variação da Carga Durante o Ensaio de Fadiga Térmica

Durante o ensaio de fadiga térmica a amostra experimenta uma tensão de compressão durante o aquecimento e tensão de tração durante o resfriamento, ou seja, as tensões apresentam-se fora de fase com relação à temperatura, provocado por uma expansão e contração do volume num estado de total restrição. A Figura 5 mostra a variação das tensões provocada pela variação da temperatura, durante um ciclo no ensaio de fadiga térmica.

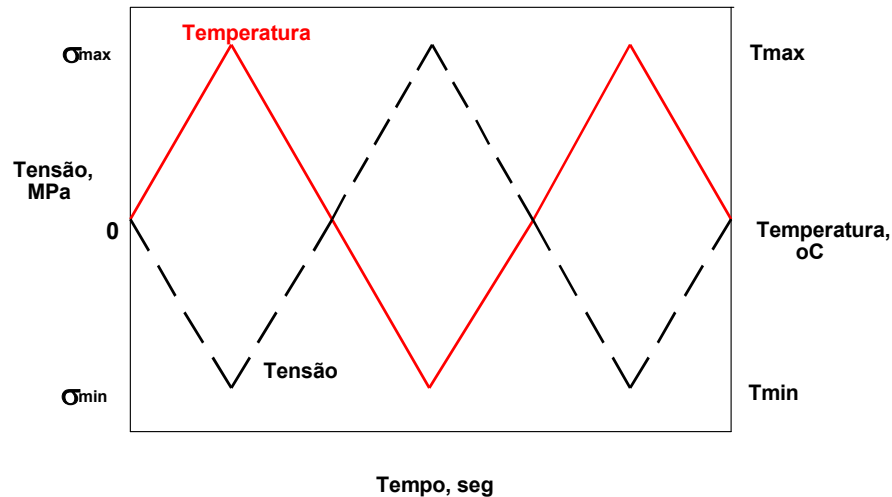


Figura 5 – Esquema mostrando a relação entre temperatura, tensão e tempo durante os primeiros ciclos do ensaio de fadiga térmica.

Durante a execução do ensaio, devido à restrição da amostra, uma tensão de compressão é aplicada na mesma quando a temperatura aumenta desde  $T_0$  até  $T_{max}$ . Posteriormente uma tensão de tração é aplicada entre  $T_{max}$  e  $T_{min}$  com uma tensão máxima de tração ( $\sigma_{max}$ ) em  $T_{min}$  causada pela diminuição da temperatura.

Na Figura 6 apresenta-se uma curva obtida durante os ensaios, mostrando a variação das tensões geradas durante os ciclos térmicos impostos.

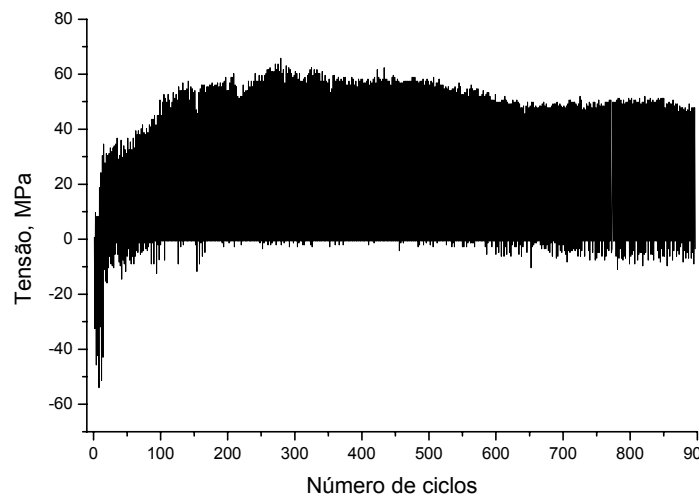


Figura 6. Variação da tensão na amostra durante os ciclos térmicos para os corpos-de-prova ensaiados.

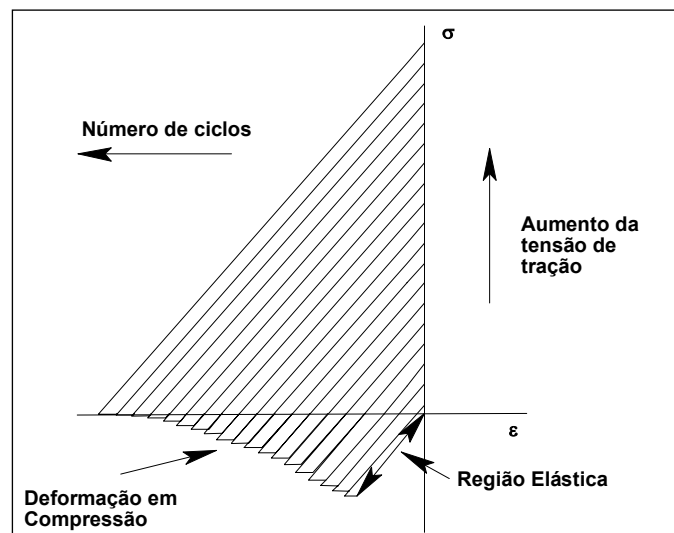
Na Figura 6 observa-se que durante os primeiros ciclos térmicos o comportamento do material apresenta-se elástico, ou seja, quando a temperatura aumenta a amostra experimenta uma tensão de compressão, posteriormente quando a temperatura é diminuída a tensão volta até valores próximos de zero. Estes primeiros ciclos são caracterizados por apresentarem uma alta tensão de compressão e mínima tensão de tração.

Quando o número de ciclos continua a aumentar, a amostra sofre deformação plástica em compressão quando aquecida até a temperatura máxima, diminuindo o seu comprimento, sendo que, quando esta é resfriada até a temperatura mínima e pelo fato de estar restrita nos seus extremos surge uma tensão de tração. A mudança do comportamento do material se deve ao efeito que ocorre nos metais que são submetidos a carga e descarga em sentidos opostos (compressão seguido por tração ou tração seguida por compressão), sendo que a tensão de escoamento na recarga é muito menor que a tensão alcançada no final da primeira carga e pode ser ainda menor que a tensão de escoamento inicial. Este efeito é chamado de efeito Bauschinger.<sup>(4)</sup>

Para ciclos posteriores esta tensão de tração continua aumentando pelo mesmo mecanismo mencionado anteriormente, sendo que, quando se atinge aproximadamente 50 ciclos esta tensão de tração apresenta-se estável, provavelmente devido a que após uma considerável deformação plástica (em compressão) é dificultada a redistribuição das discordâncias para uma carga inversa e a deformação causada pelo efeito Bauschinger aproxima-se de zero.

Os valores das tensões obtidos durante os ensaios são baixos, pois a temperatura máxima da amostra obtém-se no centro da mesma, aproximadamente num comprimento de 10 mm, causando, portanto, uma tensão e deformação localizada, o que provoca um menor valor da tensão com relação se toda a amostra fosse submetida à mesma temperatura.

A Figura 7 apresenta a evolução da variação das tensões e deformação cíclica ocorrida nas amostras estudadas para os primeiros ciclos da fadiga térmica.



**Figura 7.** Esquema da variação tensão – deformação para as amostras ensaiadas.

A Figura 7 apresenta graficamente o exposto anteriormente, isto é, quando a amostra é aquecida até a temperatura máxima ocorre tensão de compressão, que para os primeiros ciclos, permanece na região elástica e quando a amostra é resfriada a tensão volta a zero. Para ciclos posteriores ocorre deformação plástica em compressão pelo fato das tensões atingirem a tensão de escoamento, sendo que durante o resfriamento a tensão de tração aumenta por causa do encurtamento da amostra, até atingir um valor máximo e permanecer estável durante todo o ensaio.

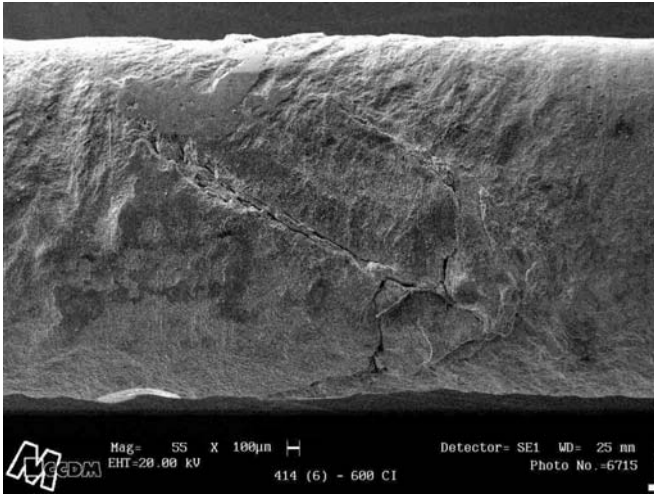
### **C) Trincas Térmicas e Deterioração Superficial**

O efeito da ciclagem térmica propicia o desenvolvimento das trincas térmicas acompanhadas por uma intensa e severa deterioração superficial sobre o material após ser submetido ao ensaio de fadiga térmica. A deterioração é resultante da combinação de oxidação, corrosão e erosão pela ação da chama durante o aquecimento. O efeito do ataque corrosivo atua como força motriz, para a iniciação ou como sítios para o desenvolvimento de trincas térmicas do material após o ensaio de fadiga térmica. A Figura 8 (a) e (b) apresenta a deterioração e trincamento superficial, respectivamente.

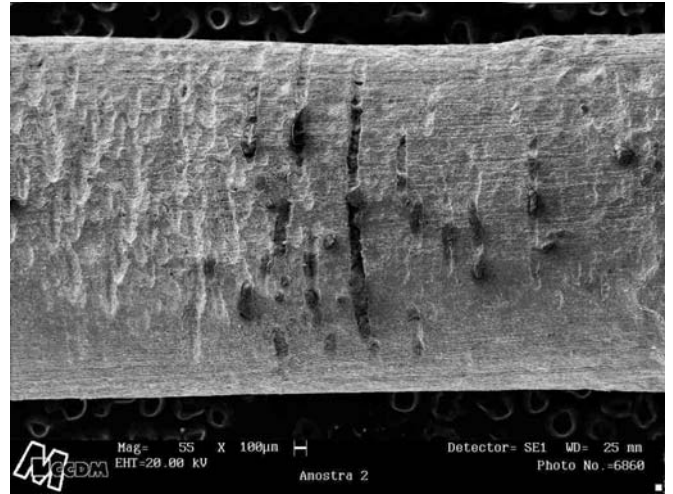
Os sítios de iniciação das trincas foram observadas nas regiões superficiais pelo seccionamento dos corpos de prova no seu sentido longitudinal sobre as regiões ensaiadas. Foram observadas duas condições consideradas fundamentais, o início de trincas superficiais a partir do produto da corrosão, bem caracterizado pela Figura 8 (c) e o seu desenvolvendo perpendicular à superfície, observado na Figura 8 (d). Essa última condição bem característica de fadiga térmica conforme os autores Weroniski et al.,<sup>(1)</sup> e Lee.<sup>(5)</sup>

Durante o ensaio de fadiga térmica observou-se que o número de trincas, bem como a sua profundidade aumenta com o número de ciclos de fadiga térmica. Isto se deve provavelmente por causa da intensa deformação plástica localizada sobre a região de reaquecimento, alteração estrutural dos materiais e da mudança da condição de carregamento sobre o corpo de prova, como mostra a Figura 9 que apresenta os materiais na iminência da ruptura após o ensaio de fadiga térmica. Segundo LEE et al.<sup>(5)</sup> o aumento da densidade de trincas de fadiga térmicas se deve pela condição de carregamento de tração sobre o corpo de prova.

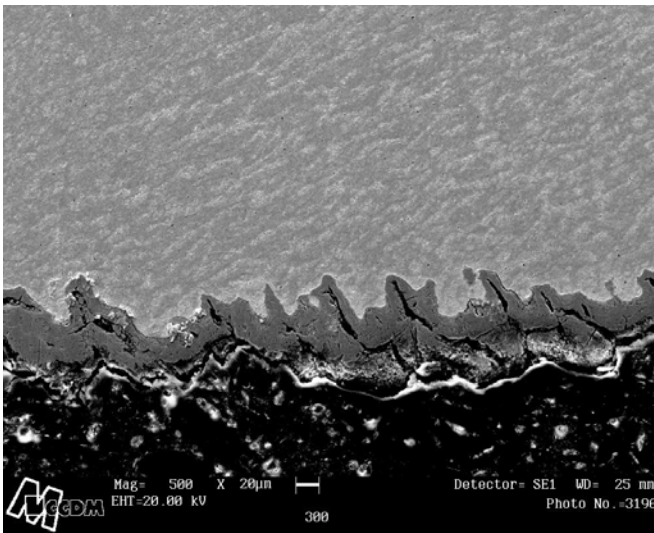




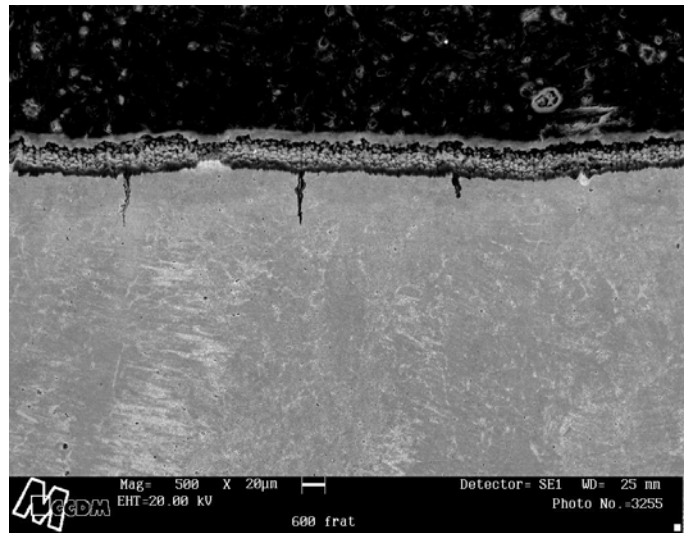
a)



b)

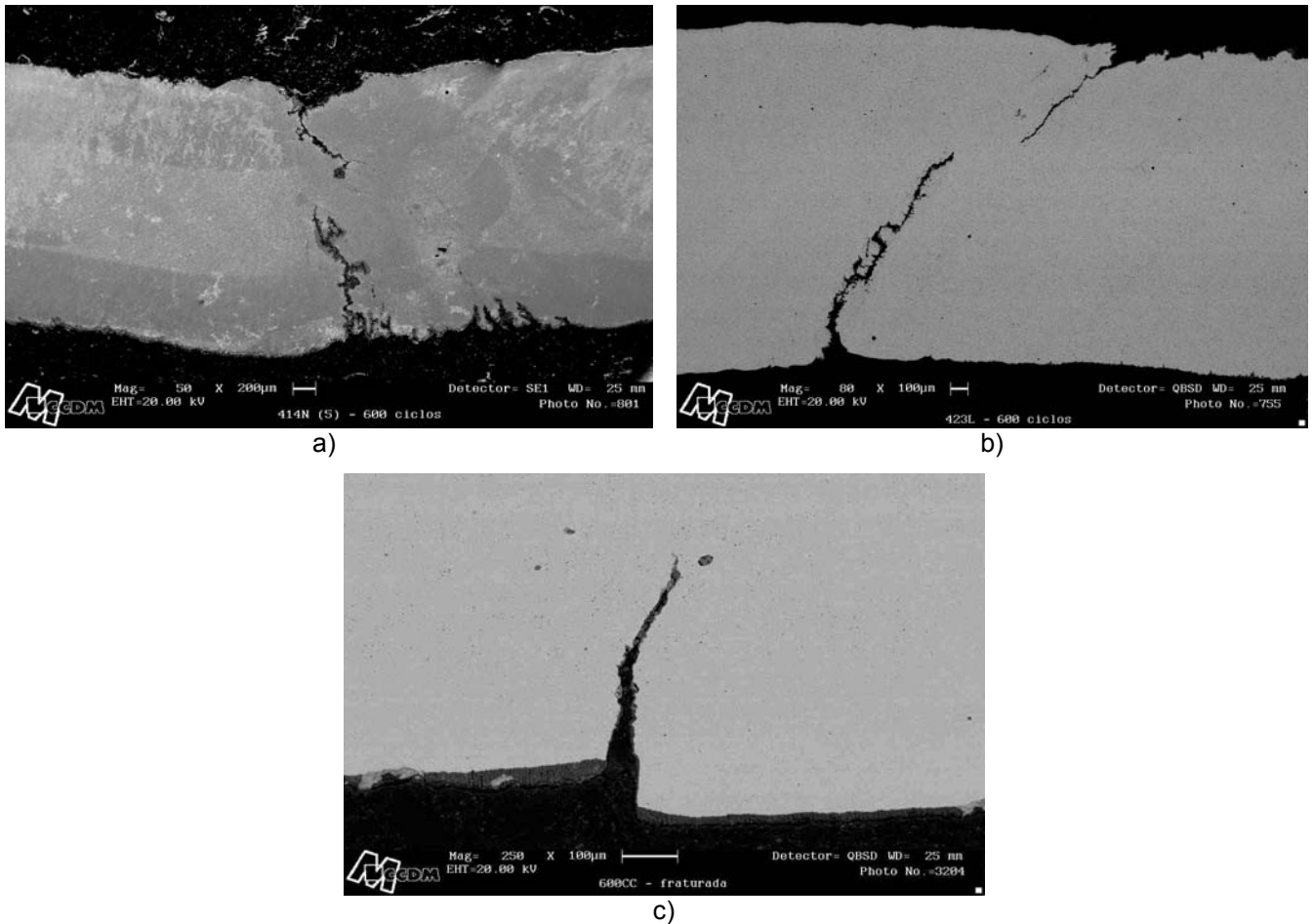


c)



d)

**Figura 8.** Micrografias apresentando trincas térmicas sobre a superfície dos materiais.



**Figura 9.** Revestimentos na iminência da fratura a 600 ciclos de fadiga térmica.

## CONCLUSÕES

Como resultado do desenvolvimento de um equipamento de ensaio de fadiga térmica para avaliação do comportamento mecânico e microestrutural de materiais metálicos, pode-se extrair as seguintes conclusões:

1. O equipamento de fadiga térmica desenvolvido no DEMa – Laboratório de Soldagem, mostrou-se adequado para a simulação da fadiga térmica em materiais metálicos;
2. A geometria do corpo de prova selecionada mostrou-se adequada para o estudo da fadiga térmica em condição de restrição total.
3. Durante o ensaio de fadiga térmica, ocorre amaciamento cíclico, causando a diminuição da tensão de compressão, aumentando a tensão de tração, o que resulta no aumento da tensão média, que reduzirá a vida útil à fadiga térmica na condição de restrição total.
4. A presença de uma forte oxidação superficial, favorece o início do trincamento no material devido a que atua como concentrador de tensões em regiões com menor resistência à oxidação. O crescimento desta trinca deve-se principalmente ao efeito das tensões cíclicas provocadas pelos ciclos térmicos do que o efeito da oxidação.

## **Agradecimentos**

Os autores agradecem a CAPES, CNPq e a FAPESP pelo apoio financeiro para o desenvolvimento deste trabalho e a Soudage.

## **REFERÊNCIAS**

- 1 WERONSKI A.; HEJWOWSKI, T. **Thermal Fatigue of Metals**. 1. ed. Editor: Pergamon Press. 1991. pp. 366.
- 2 COFFIN, L.F.; SCHENECTADY, N.Y. A Study of Effects of Cyclic Thermal Stress on a Ductile Metal. **Transactions of the ASME**. August, 1954. p. 931-950.
- 3 HORN, B.D & FRANCIS, E.D. – Criteria for Selection of Weld Surfaced Rolls for Continuous Caster Application. **MWSP Conference Proceeding, ISS – AIME**. Cleveland Ohio, 1986. p. 267 – 271.
- 4 DORN, J. E. **Mechanical Behavior of Materials at Elevated Temperatures**. McGraw Hill. 1961. pp. 386.
- 5 LEE, S. & KIM, H. & RYU, H. J. SHIN, K. Correlation of Microstructure and Thermal Fatigue Property of Three Work Rolls. **Metallurgical and Materials Transactions A**. Vol. 28A, December. 1997. pp. 2595-2608.