

OCORRÊNCIAS DE TRINCAS DE FADIGA TÉRMICA E SUAS RELAÇÕES COM OXIDAÇÃO*

Ana Paola Villalva Braga¹
Luiz Gustavo Del Bianchi da Silva Lima²

Resumo

Fadiga térmica é um modo de fadiga por aplicação cíclica de tensões de origem térmica, devido a contrações e dilatações térmicas do material. Componentes sujeitos a fadiga térmica são, na maior parte, partes de motores a combustão ou ferramentas da indústria de conformação mecânica a quente, que são componentes que também estão submetidos a ambientes oxidantes. Embora a literatura disponível sobre conformação mecânica disponha de grande número de trabalhos relacionados à fadiga térmica em cilindros de laminação a quente, poucos autores abordam como esse tipo de dano é influenciado por algumas características do processo - em especial a oxidação. Este trabalho volta a atenção para ensaios laboratoriais de fadiga térmica e para cilindros de laminação de tiras a quente. Variaram-se, além das condições de ciclagem térmica e atmosfera, a microestrutura do aço ferramenta. Puderam ser observadas três formações distintas de trincas, formadas em estágios diferentes da evolução do dano de fadiga térmica. Através do acompanhamento do fenômeno desde o início da sua formação até o dano da ferramenta propriamente dito, foi possível constatar que o surgimento de trincas de fadiga térmica inicia-se em pontos de concentração de tensões na superfície, que podem ser carbonetos primários, interfaces ou pontos de oxidação preferencial, que geram regiões mais susceptíveis a falha durante a etapa de resfriamento da ferramenta. Resultados de modelamento matemático em escala microscópica confirmaram os efeitos concentradores de tensões causados por entalhes na superfície, tanto na presença quanto na ausência de óxidos preenchendo as cavidades dos entalhes.

Palavras-chave: Fadiga térmica; Laminação; Oxidação; Aço ferramenta

OCURRENCE OF THERMAL FATIGUE CRACKS AND THEIR RELATION WITH OXIDATION

Abstract

Thermal fatigue is a mode of fatigue by cyclical application of thermal stresses due to thermal contractions and expansions of the material. Components subject to thermal fatigue are mostly parts of combustion engines or tools for the hot forming industry, which are components that are also subjected to oxidizing environments. Although the available literature on metalforming has a large number of works related to thermal fatigue in hot rolling rolls, few authors discuss how this type of damage is influenced by some characteristics of the process - specially the oxidation. This paper draws attention to thermal fatigue laboratory tests and to hot strip rolling rolls. In addition to the thermal cycling and atmospheric conditions, the microstructure of the tool steel was varied. Three distinct formations of cracks could be observed, formed at different stages of the evolution of thermal fatigue damage. Through the monitoring of the phenomenon from the beginning of its formation to the damage of the tool itself, it was possible to verify that the appearance of thermal fatigue cracks starts at points of surface stress risers, such as primary carbides, interfaces or

preferential oxidation spots, which generate regions more susceptible to failure during the tool cooling step. Results of mathematical modeling on microscopic scale confirmed the stress rising effects caused by notches on the surface, both in the presence and absence of oxides filling the cavities.

Keywords: Thermal fatigue; Rolling; Oxidation; Tool steel

¹ *Engenheira de materiais, doutora, pesquisadora, Laboratório de Processos Metalúrgicos, Instituto de Pesquisas Tecnológicas, São Paulo, SP, Brasil.*

² *Engenheiro mecânico, mestre, Laboratório de Fenômenos de Superfície, Escola Politécnica da USP, São Paulo, SP, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

1.1 Fadiga térmica

Fadiga térmica é um processo de origem e crescimento de dano em partes de equipamentos e componentes devido a mudanças na energia interna causadas por múltiplas mudanças de temperatura. Brandim et al. definem fadiga térmica como “um processo de aplicação repetitiva de ciclos térmicos, durante o qual tensões e deformações são resultantes exclusivamente da imposição de gradientes de temperatura sem a aplicação de cargas mecânicas”. [1]

Basicamente, a fadiga térmica é produzida em conjunto pelas mudanças cíclicas ou periódicas de temperatura e por uma restrição completa ou parcial da deformação térmica. A restrição pode ser devida a fatores externos ou internos. As restrições externas produzem forças que agem sobre um componente que é alternadamente aquecido e resfriado, enquanto as restrições internas podem resultar de gradientes de temperatura, anisotropia estrutural ou de diferentes coeficientes de expansão em grãos ou fases adjacentes. [2]

As falhas por fadiga térmica podem ser encontradas em discos de freio, palhetas de turbina, pistões e cabeçotes de cilindros em motores por combustão interna, cilindros para conformação a quente de aço, matrizes de forjamento, rodas ferroviárias, componentes de fornos e moldes usados para moldagem de vidro ou metal. Como as indústrias buscam sempre aumento de produtividade e os cálculos de projeto de ferramenta auxiliados por simulação computacional são cada vez mais precisos e presentes para evitar falhas mecânicas, a fadiga térmica pode se tornar o modo de falha dominante nos componentes, visto que a temperatura de operação e os gradientes térmicos se tornam mais severos e a vida útil esperada aumenta. [3]

1.2 Ocorrências de fadiga térmica

Durante a operação, as ferramentas como matrizes de forjamento, cilindros de laminação e moldes de injeção de alumínio são expostas a uma combinação de múltiplos modos de impacto [4]. Os aços ferramenta, especialmente os utilizados nas ferramentas para conformação a quente, inevitavelmente, falharão em algum momento pelo modo de dano que se desenvolver mais rápido [5,6]. Um dos parâmetros essenciais de uma ferramenta ou um componente é a sua vida em serviço, que descreve o número de componentes produzidos com a ferramenta antes da sua falha. A vida em serviço pode ser melhorada pelo uso de materiais que exibam boa estabilidade térmica e alta tenacidade mesmo em altas temperaturas [7]. A falha ocorrerá de maneira mais lenta, ou mais rápida, dependendo de diversos fatores que se definem desde o projeto de manufatura e finalmente pelas condições de operação [5].

A troca de calor na laminação a quente é função dos parâmetros de processo, dos materiais de cilindro e chapa, da refrigeração aplicada aos cilindros e das características do meio interfacial no arco de contato [8,9]. Em especial, as temperaturas obtidas no cilindro são influenciadas pelos seguintes parâmetros de processo: velocidade de rotação do cilindro, redução de espessura por passe, raio do cilindro e temperatura inicial da chapa. Maiores temperaturas no cilindro ao final do arco de contato com a chapa estão relacionadas a menores velocidades de rotação, maior redução por passe, maior raio do cilindro e maior temperatura inicial da chapa – no caso da temperatura da chapa, por ser a condução o mecanismo principal de transferência de calor para o cilindro [10], e nos demais para aumentarem o tempo de contato entre os corpos.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Materiais e métodos

Três materiais foram avaliados quanto aos efeitos de ciclos térmicos sobre a microestrutura. Os materiais são aços ferramenta utilizados em aplicações diversas: (a) AÇO_1: AISI H13, aço ferramenta para trabalho a quente, cuja microestrutura é composta de martensita revenida e carbonetos secundários precipitados durante o revenimento; (b) AÇO_2: um aço ferramenta em desenvolvimento pelo IPT, cuja microestrutura tem matriz de composição química e fases semelhantes ao aço H13, com adição nióbio e titânio para a formação de carbonetos primários de nióbio (NbC) de forma poligonal; e (c) AÇO_3: um aço rápido comercialmente utilizado em cilindros de laminação a quente, com carbonetos primários majoritariamente dos tipos M_7C_3 , e MC sobre uma matriz de martensita revenida. A Figura 1 mostra a microestrutura dos três materiais estudados, onde se nota que a principal diferença entre eles são o tipo, quantidade e morfologia dos carbonetos.

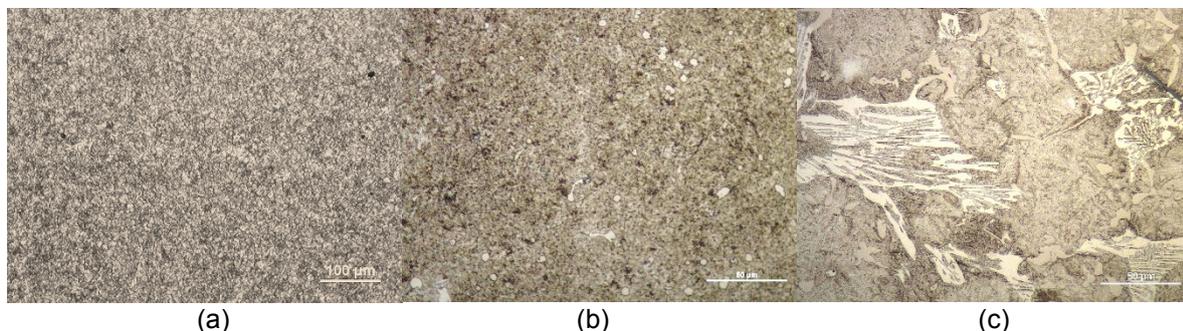


Figura 1. Microestrutura dos três materiais utilizados nos ensaios. (a) AÇO_1: H13; (b) AÇO_2, com NbC; (c) AÇO_3, com M_7C_3 e MC.

Foram produzidos 3 pares de cilindros de laminação, um de cada material. Após a usinagem de desbaste, os cilindros foram tratados termicamente (têmpera sob argônio e duplo revenimento) para as durezas de 46 HRC, 52 HRC e 62 HRC, respectivamente. Esses cilindros foram utilizados em campanhas de laminação de tiras a quente no laminador piloto do Instituto de Pesquisas Tecnológicas.

Na laminação, os experimentos foram feitos laminando-se placas de aço carbono AISI 1045 aquecidas até 1250°C. A Figura 2 mostra cilindros utilizados nos ensaios de laminação a quente e o laminador de tiras a quente piloto automatizado do IPT em operação. As placas foram laminadas em cinco passes reversíveis, da espessura de 19,0 mm até 8,4 mm. Utilizou-se refrigeração sobre os cilindros superior e inferior em sprays sincronizados com o movimento de saída das placas, de modo que a refrigeração fosse realizada logo após o término do contato do cilindro com as placas, minimizando a propagação de calor da superfície para o interior do cilindro. As placas tinham comprimento inicial de 280 mm. Após cada campanha de 400 placas, calcula-se que o comprimento total laminado seja de aproximadamente 1 km. Cada par de cilindros foi ensaiado por cinco campanhas, totalizando 2000 placas (5 km) por cilindro.



Figura 2. À esquerda, cilindros utilizados nos ensaios de laminação a quente piloto. À direita, o laminador de tiras a quente automatizado do IPT.

Nos intervalos entre as campanhas, os cilindros eram retirados do laminador para caracterização da superfície. Para análise do desgaste por fadiga térmica, a caracterização era feita por ensaio de partículas magnéticas, para detecção de descontinuidades superficiais e subsuperficiais, e metalografia, com microscópio óptico de campo, após polimento com pasta de diamante de 3 μm por 20 segundos. Após a última campanha, um dos cilindros de cada material foi cortado por eletroerosão e disco abrasivo para observação da seção transversal no centro da área de trabalho.[11]

Para avaliação do desempenho exclusivamente em fadiga térmica e oxidação, sem atuação de mecanismos de abrasão e adesão, foi elaborado por Braga [6] um equipamento de ensaio de fadiga térmica, composto de um forno de indução de 25 kW e 220 kHz, acionado por um controlador que ligava o forno para aquecimento até a temperatura máxima pré-estabelecida e desligava para resfriamento até a temperatura mínima. Os corpos de prova eram refrigerados internamente por um fluxo de água de 6,8 l/min e externamente ao ar, em temperatura controlada de 20 °C. Foi ensaiado em fadiga térmica apenas o AÇO_2. A programação do ensaio era feita de modo a interromper a ciclagem a cada 1000 ciclos, para caracterização da superfície em microscópio óptico. A Figura 3 mostra o esquema experimental e a geometria do corpo de prova utilizados no ensaio de fadiga térmica.

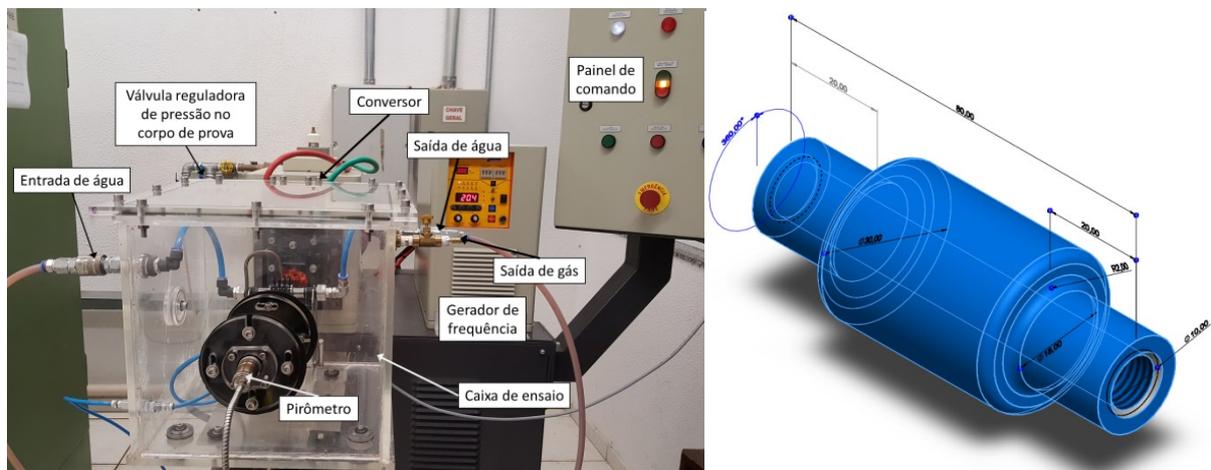


Figura 3. Esquema experimental (esquerda) e geometria do corpo de prova (direita) utilizados no ensaio de fadiga térmica.

No ensaio de fadiga térmica, foram variados os parâmetros temperatura máxima e tempo de aquecimento, de forma a variar tanto a temperatura em que o material está submetido no final do ciclo quanto o tempo pelo qual o corpo de prova permanece em altas temperaturas. Foram utilizadas as temperaturas máximas de 600 e 650 °C e os tempos de aquecimento de 1,3 e 2,6 segundos. A temperatura mínima, em todos os ensaios, foi 110 °C. Cada ensaio foi repetido 3 vezes até o surgimento de uma macrotrinca que causasse vazamento de água. Ao final dos ensaios, um corpo de prova de cada condição foi cortado para observação das trincas em seção transversal.

Foram realizadas simulações matemáticas dos esforços térmicos e mecânicos, na escala microscópica, em regiões sobre a superfície dos cilindros. O software utilizado nos modelos foi o ABAQUS/Standard. As geometrias e condições de contorno do modelo são descritas por Lima [9]. Para as entradas na escala micro, foram realizadas previamente simulações em escala macro, onde foram levantados os históricos de temperatura e pressões de contato nas condições do primeiro e do último passe, onde ocorrem os maiores esforços térmicos e mecânicos, respectivamente. Propriedades físicas dos materiais de cilindros e das chapas laminadas foram levantados de diversas fontes da literatura ou calculadas no modelo macro.

2.2 Resultados e discussões

A formação das malhas de trincas térmicas na superfície dos cilindros de laminação, embora ensaiados sob as mesmas condições, variou entre os três materiais, como se pode ver na Figura 4. Nota-se que a malha de trincas do AÇO_1 é a mais aberta, ou seja, com menor densidade de trincas por área, do que as demais, enquanto a malha de trincas do AÇO_3 é a mais densa.

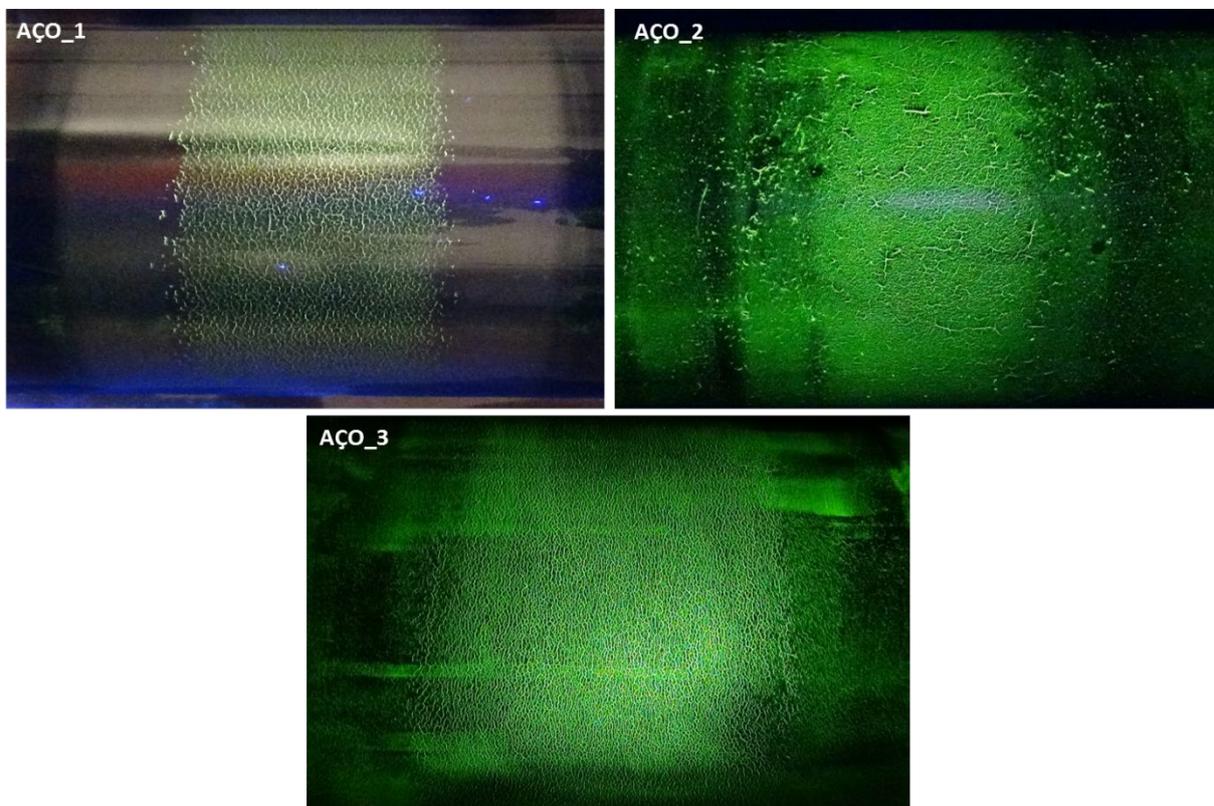


Figura 4. Ensaio de partícula magnética dos cilindros de laminação piloto, após 5ª. campanha, tendo laminado aproximadamente 2000 placas cada cilindro.

Ao observar a superfície com maiores aumentos, no microscópio óptico, observam-se com maior clareza as diferenças entre as malhas de trincas de fadiga térmica. Na Figura 5, onde as fotografias da superfície de cilindros dos três aços estudados são mostradas com dois aumentos diferentes, nota-se a presença de três formações distintas.

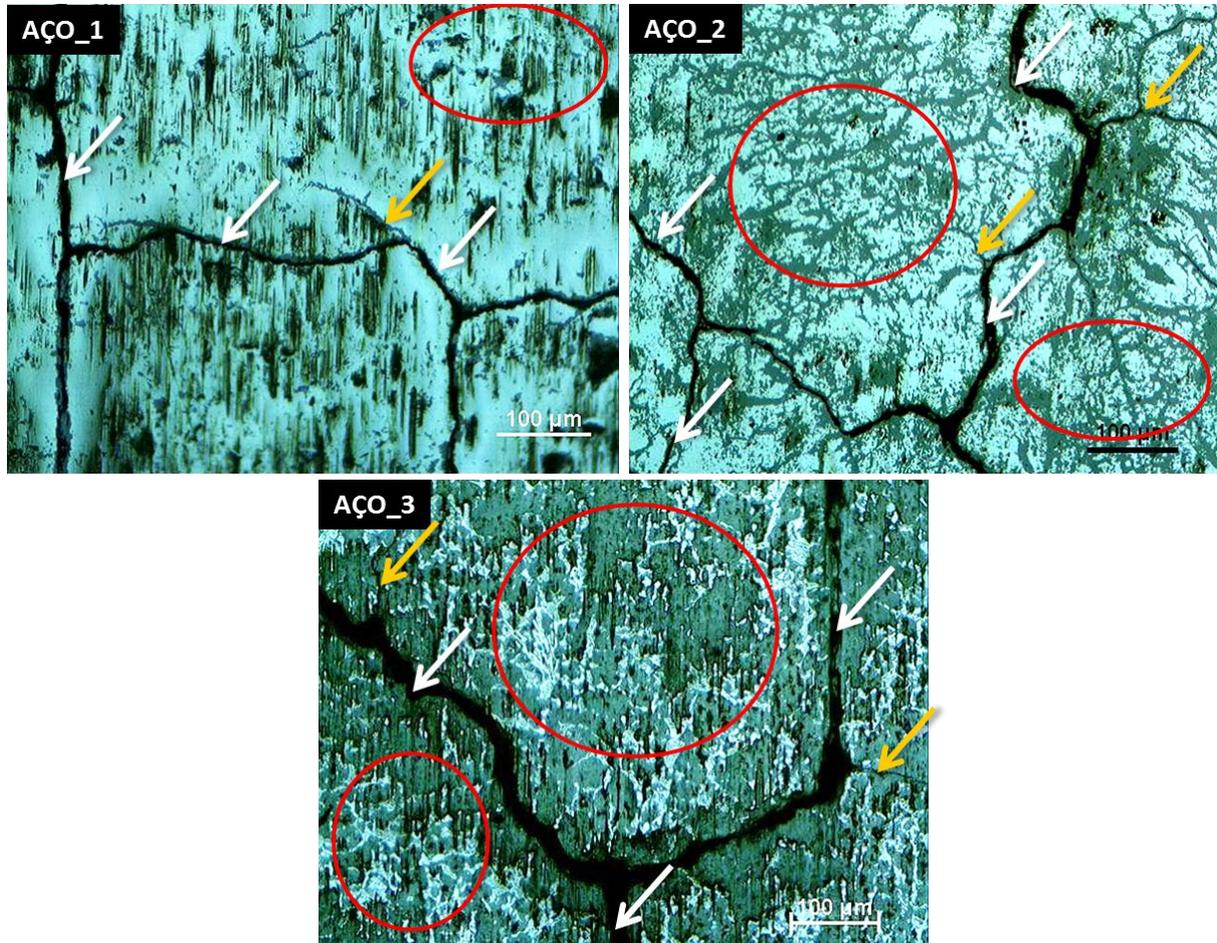


Figura 5. Micrografias (microscópio óptico) da superfície dos cilindros de laminação piloto no centro da área de trabalho, mostrando trincas de fadiga térmica e marcas de abrasão e oxidação. As áreas circuladas indicam marcas de oxidação. As setas brancas indicam trincas principais, e as setas amarelas indicam trincas secundárias.

As regiões destacadas na Figura 5 podem ser classificadas em três categorias:

- Marcas de oxidação, que podem ter a forma de manchas ou linhas, destacadas por círculos vermelhos;
- Trincas principais, mais largas e predominantes sobre a imagem, destacadas pelas setas brancas;
- Trincas secundárias, provenientes de ramificações das trincas principais, mais finas e menores, destacadas por setas amarelas.

É comum observar a associação entre as marcas de oxidação e o caminho de propagação das trincas secundárias e principais.

Para analisar em maiores detalhes essas regiões, amostras retiradas do centro da área de trabalho dos cilindros foram observadas no microscópio eletrônico de varredura (Figura 6). Na figura, as setas apontam para regiões de descontinuidade do metal que se assemelham a trincas, porém não são sempre associadas a

superfícies de fratura. Quando analisadas por espectroscopia de raios-X por dispersão de energia (EDS), as regiões indicam a presença de óxidos, mostrando que a oxidação assume caminhos preferenciais pela microestrutura, fragilizando-a. As imagens do AÇO_2 e AÇO_3 indicam que os caminhos preferenciais para propagação do óxido são as regiões de carbonetos.

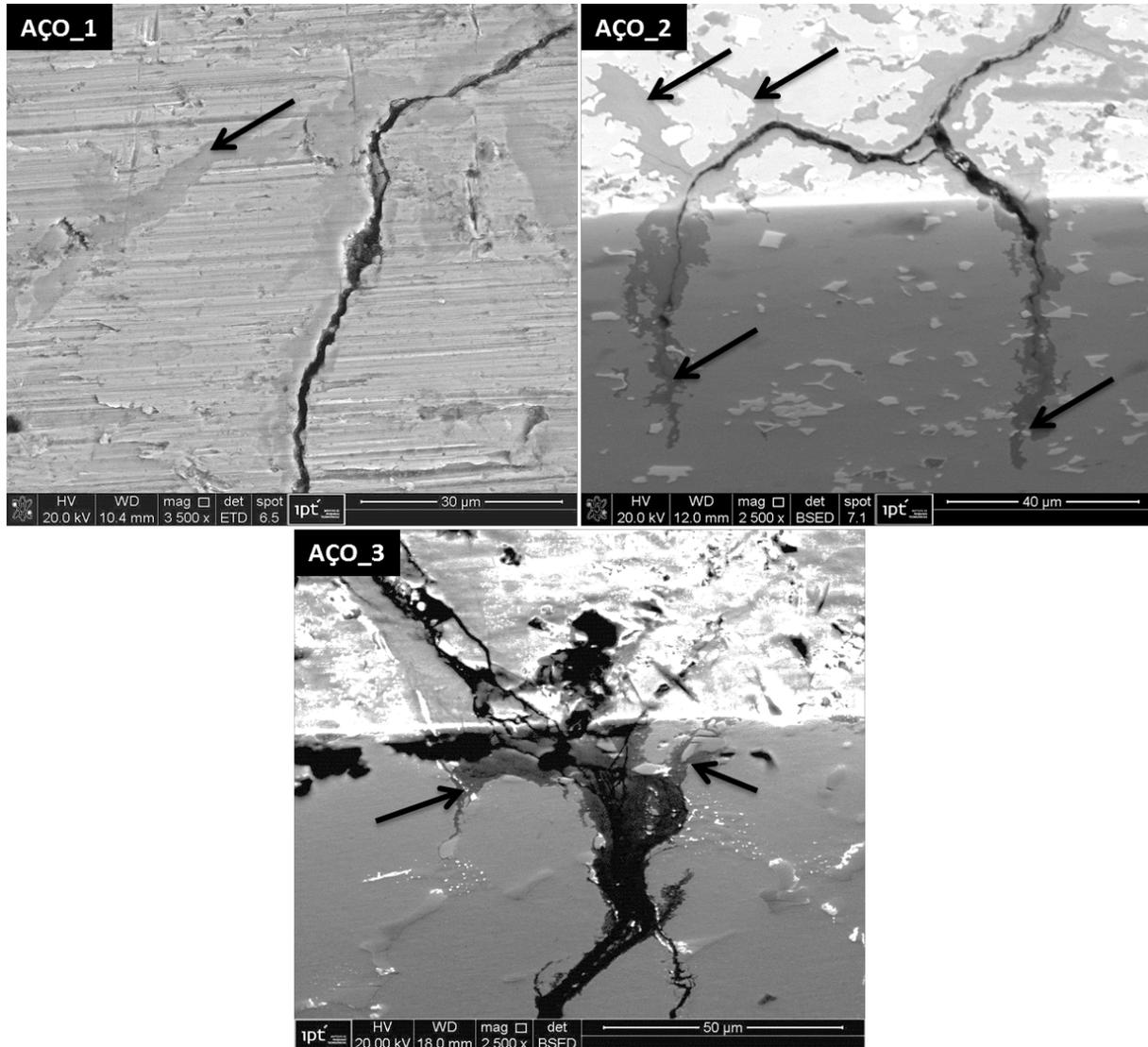


Figura 6. Trincas de fadiga térmica na superfície e seção transversal (em ângulo), nos cilindros de laminação piloto. As faixas acinzentadas apontadas pelas setas são regiões de oxidação preferencial.

A formação de dano na superfície dos corpos de prova de fadiga térmica tem aspecto muito semelhante aos cilindros de laminação, exceto pela remoção de óxidos e pelo riscamento causado pela abrasão/adesão no contato entre cilindros e chapas. Como o óxido não foi removido durante os ensaios, foi possível ver como ocorrem as etapas de crescimento e trincamento da camada de óxido, levando ao aparecimento de trincas principais no metal. Essas etapas podem ser vistas na Figura 7.

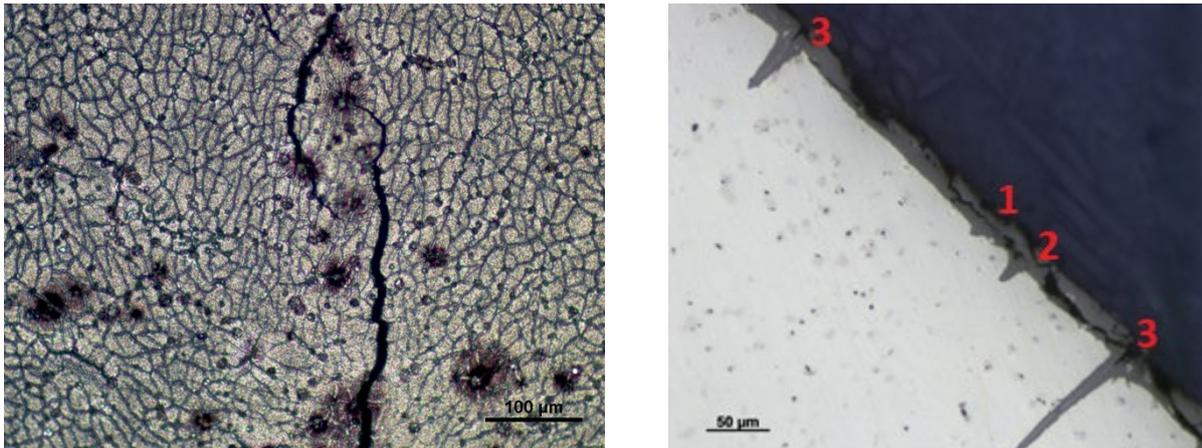


Figura 7. Aspecto geral das trincas de fadiga térmica produzidas no ensaio laboratorial. À esquerda, superfície com trincas principais e secundárias. À direita, estágios de formação da trinca, em seção transversal.

Na Figura 7 é possível ver ocorrências das trincas principais e secundárias. As trincas secundárias que se vêem na figura da esquerda são mais finas que as que se notam, por exemplo, sobre o cilindro de laminação do mesmo aço (AÇO_2, Figura 5). Essas trincas secundárias, quando os corpos de prova são observados em seção transversal, nem sempre são vistas avançando sobre o metal como avançam as trincas principais. Num primeiro estágio (1) de propagação do óxido para o interior da microestrutura, a camada de óxido forma uma entrada em forma de “V”; na sequência (2), a oxidação avança sobre um ponto da microestrutura onde há ocorrência de interface com carbonetos ou contornos de grão; por fim (3), essa região de filme de óxido atinge regiões mais profundas e concentra tensões, a ponto de facilitar a formação de uma trinca, que propaga sobre outras regiões já oxidadas. A propagação de trincas sobre regiões de oxidação preferencial pode ser comprovada na Figura 8, que mostra uma trinca principal propagando sobre a malha já existente de trincas secundárias.

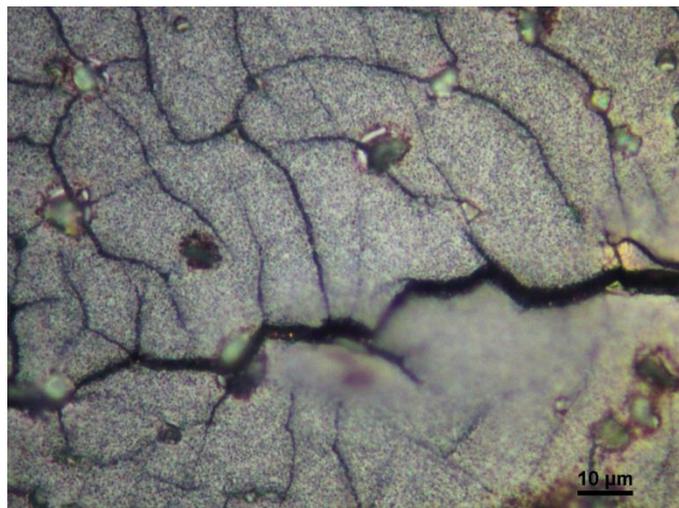


Figura 8. Forma de propagação de uma trinca principal de fadiga térmica, sobre as trincas secundárias.

O número de ocorrências dos pontos de oxidação preferencial em forma de “V” aumenta quando o ensaio ocorre em ciclos que aumentem a exposição da superfície

a condições oxidantes, como temperaturas mais altas ou tempos maiores de aquecimento/resfriamento. As setas vermelhas na Figura 9 mostram esses pontos nas amostras de seção transversal retiradas dos corpos de prova ensaiados a 600 e 650 °C, nos tempos de aquecimento rápido e lento.

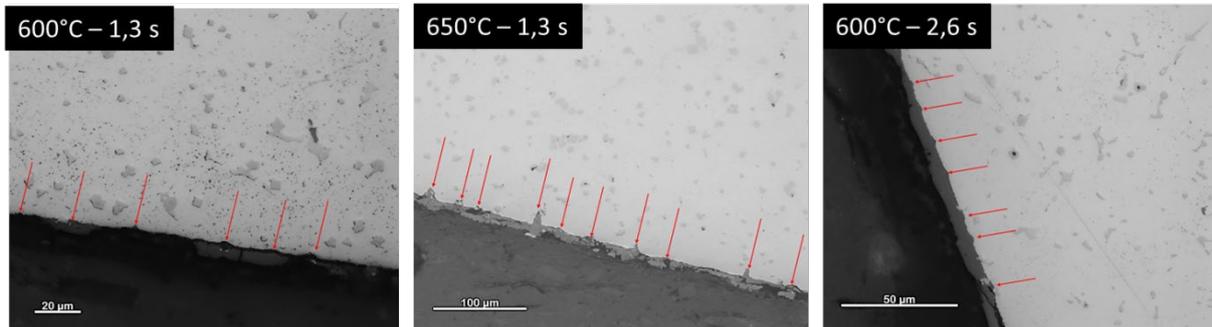


Figura 9. Pontos de oxidação preferencial próximos à superfície dos corpos de prova de fadiga térmica, observados em seção transversal.

Para investigar a importância destes concentradores de tensão, foram desenvolvidos modelos matemáticos em domínios de $100 \times 100 \times 50 \mu\text{m}^3$ com entalhes de dimensões variadas, conforme Figura 10, em adição a um domínio sem entalhe. Em todos os casos, as fronteiras laterais e inferior foram restritas, permitindo movimentação nodal apenas no próprio plano da fronteira e restringindo movimentação na direção normal ao plano. A única face livre para deslocamento em todas as direções foi a face superior. Foi então aplicado em todos os elementos do domínio o histórico de temperaturas e nas faces as pressões de contato com a chapa. Todos os casos em escala micro foram simulados supondo análise estática.

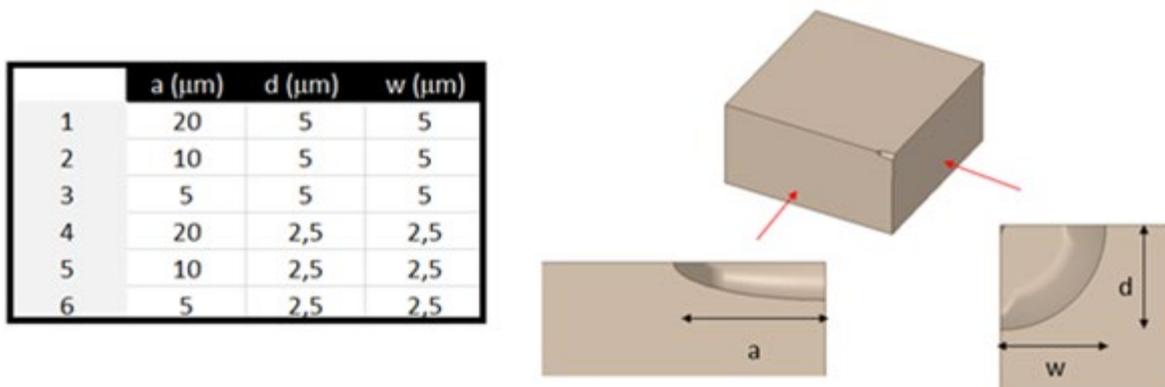


Figura 10. Esquematização e dimensões das trincas consideradas no domínio 3D.

Por fim, cada domínio com diferente geometria de entalhe foi simulado sob três condições: inicialmente sem presença de óxido no entalhe (i) e, simulando a situação verificada nos cilindros, com presença de óxido no entalhe, tanto intacto (ii) como com uma trinca no óxido (iii). Nos casos com a presença de óxido, foram consideradas apenas as propriedades elásticas e o coeficiente de expansão térmica, considerando o óxido como Fe_2O_3 .

A premissa principal a ser confirmada é a de que a presença de entalhes no substrato metálico gera uma intensificação de tensões de origem térmica, em relação

aos valores calculados para um modelo sem dano inicial. Ademais, as simulações buscaram verificar o efeito proporcionado pelo preenchimento dos entalhes com os produtos da oxidação no campo de tensões, supondo que esses resíduos não tenham se desprendido do cilindro durante o processo.

Os gráficos da Figura 11 comparam todos os casos simulados, em termos da evolução da deformação plástica acumulada durante o primeiro passe, incluindo um caso sem entalhe. Notam-se acréscimos de deformação plástica acumulada por ciclo até 15 vezes maiores ao incluir o efeito do entalhe, reforçando a importância da descontinuidade na ocorrência do dano de origem térmica. Para todos os casos entalhados, ocorre deformação plástica antes dos 40% da duração do aquecimento e do resfriamento, indicando uma histerese plástica intensa, já que nos 60% restantes de cada parte do ciclo o material está se deformando plasticamente.

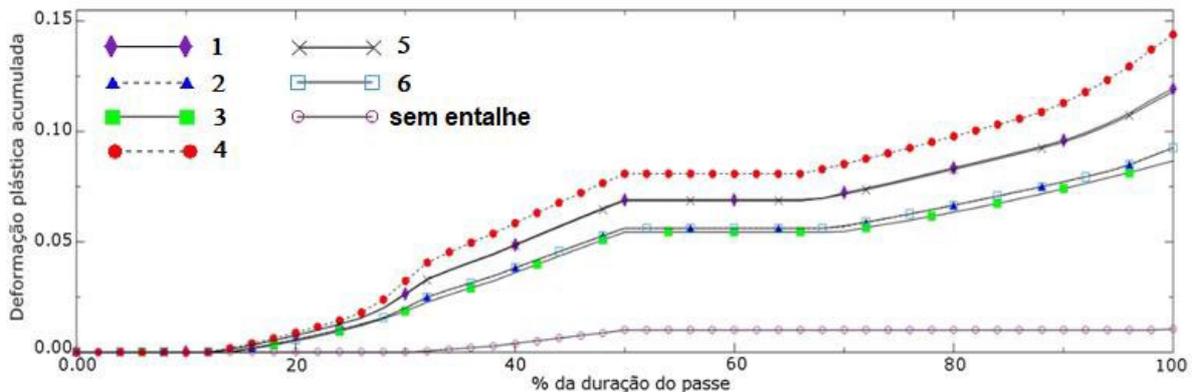


Figura 11. Evolução da deformação plástica para um ciclo de aquecimento e resfriamento, sob condições de primeiro passe, para as geometrias de entalhe mostradas na Figura 10.

A presença de óxidos no interior dos entalhes faz com que as deformações plásticas associadas com o mecanismo de fadiga térmica se apresentem de forma mais concentrada e com maior magnitude, representando uma condição ainda mais crítica. A Figura 12 apresenta uma comparação entre os casos, para o domínio de entalhe mais alongado. Esse resultado decorre das diferenças entre duas propriedades de óxido e substrato metálico: o coeficiente de expansão térmica, que faz com que, ao serem submetidos a uma mesma temperatura, as duas fases apresentem deformações diferentes, o que leva a uma concentração de tensões na fronteira entre as fases; e a tensão de escoamento, que é aproximadamente uma ordem de magnitude maior para o óxido que para o substrato. Ao ultrapassar a tensão de escoamento, o metal começa a apresentar deformações mais intensas para pequenos acréscimos de tensão. No óxido, ao contrário, o estado de tensões permanece elástico por mais tempo, levando ao aumento de solicitação mecânica no material do cilindro.

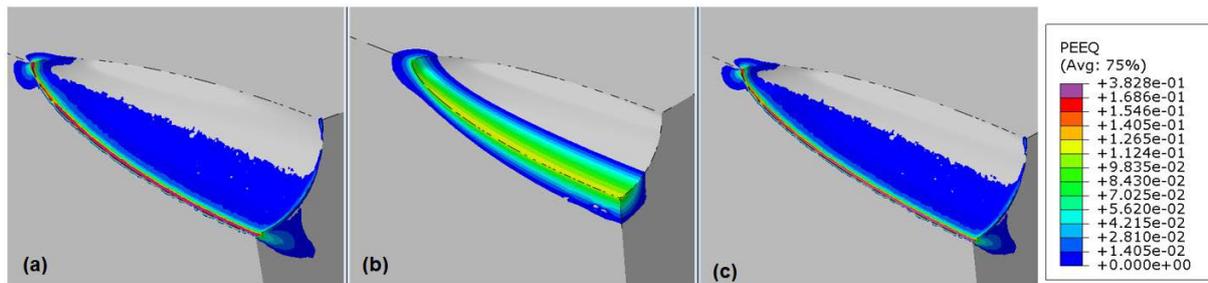


Figura 12. Comparação entre efeito de concentração de tensões dos entalhes vazio (b), preenchimento de óxido intacto (a) e com preenchimento do óxido trincado (c).

Howes[12], utilizando um experimento de fadiga térmica em leito fluidizado desenvolvido por ele, discutia redução de propriedades mecânicas no substrato metálico decorrentes da formação de uma camada de óxido sobre a superfície metálica da amostra. Segundo o autor, a oxidação superficial combina o oxigênio disponível com os elementos de liga do aço, formando óxidos destes elementos e, ao mesmo tempo, privando o substrato metálico do efeito positivo destes constituintes em suas propriedades mecânicas. A facilidade de difusão do oxigênio pelos contornos de grão do metal, em combinação com o efeito geométrico de concentração de tensões destes locais, intensifica a criticidade dos fenômenos nestes contornos, tornando o metal mais suscetível à falha pelo mecanismo de fadiga de baixo ciclo.

Análise similar foi feita por Oshida e Liu [13], porém considerando o efeito da pré-oxidação antes da aplicação do ciclo térmico, e por Sonoda et al. [14], que reportaram a formação de uma rede de óxidos associados às dendritas presentes na microestrutura do material.

Embora confirmem os mecanismos de redução de propriedades mecânicas, oxidação e nucleação preferencial de defeitos em contornos de grão, descritos acima, Hochanadel et al. [15] discutem ainda um outro mecanismo capaz de nuclear trincas em um substrato metálico oxidado. Segundo os autores, a camada de óxido contínua formada sobre o substrato é suscetível a trincas por conta do ciclo térmico. Segundo Mevrel [16], camadas de óxido têm geralmente coeficientes de expansão térmica mais baixos do que os substratos metálicos nos quais elas crescem. Durante uma variação de temperatura, esta diferença de dilatação induz tensões térmicas que, adicionadas às tensões de crescimento, podem causar a fissuração e eventual destacamento do óxido. A presença das trincas no óxido gera concentradores de tensão no substrato, facilitando o processo de fadiga de baixo ciclo local. Neu e Sehitoglu [17] discutiram o tema com maior profundidade e adicionaram que, após a nucleação de trincas no óxido, as regiões do substrato imediatamente sob as trincas passam a estar suscetíveis novamente à oxidação, formando entalhes de óxido no substrato. O mecanismo integrado de trincas no substrato em decorrência de trincas no óxido, com os efeitos discutidos pelos dois trabalhos, é apresentado na Figura 13.

3 CONCLUSÕES

O estudo dos mecanismos de nucleação de trincas de fadiga térmica em aços ferramenta sob solicitações térmicas e mecânicas em cilindros de laminação e ensaios de fadiga térmica mostrou que:

1. É impossível separar os estudos de oxidação e fadiga térmica nas condições normais de operação de ferramentas expostas à atmosfera em altas temperaturas;

2. No caso em que as temperaturas de aquecimento da superfície sob condições oxidantes sejam elevadas a ponto de permitir que a formação de óxido supere a abrasão sofrida pela ferramenta, é esperado o crescimento gradual de uma camada de óxido sobre a superfície metálica, a qual tem grande influência na nucleação de trincas de origem térmica. Uma vez nucleadas, essas trincas funcionam como entalhes que intensificam tensões locais, levando a propagação dos defeitos para o substrato metálico. Desse modo, a presença da camada de óxido facilita a nucleação de defeitos na superfície metálica, pelo efeito de concentração de tensões, que favorece o mecanismo de acúmulo de deformação plástica.

3. Os carbonetos têm papel importante na nucleação de trincas secundárias e principais, pois seu entorno torna-se ponto mais susceptível à oxidação, antes da matriz. Além disso, pela sua geometria geralmente poligonal e complexa e pela diferença de coeficiente de dilatação térmica em relação à matriz, agem como entalhe concentrador de tensões para nucleação de trincas, somando-se aos pontos de oxidação nos fatores que abreviam a vida em fadiga térmica das ferramentas de conformação a quente.

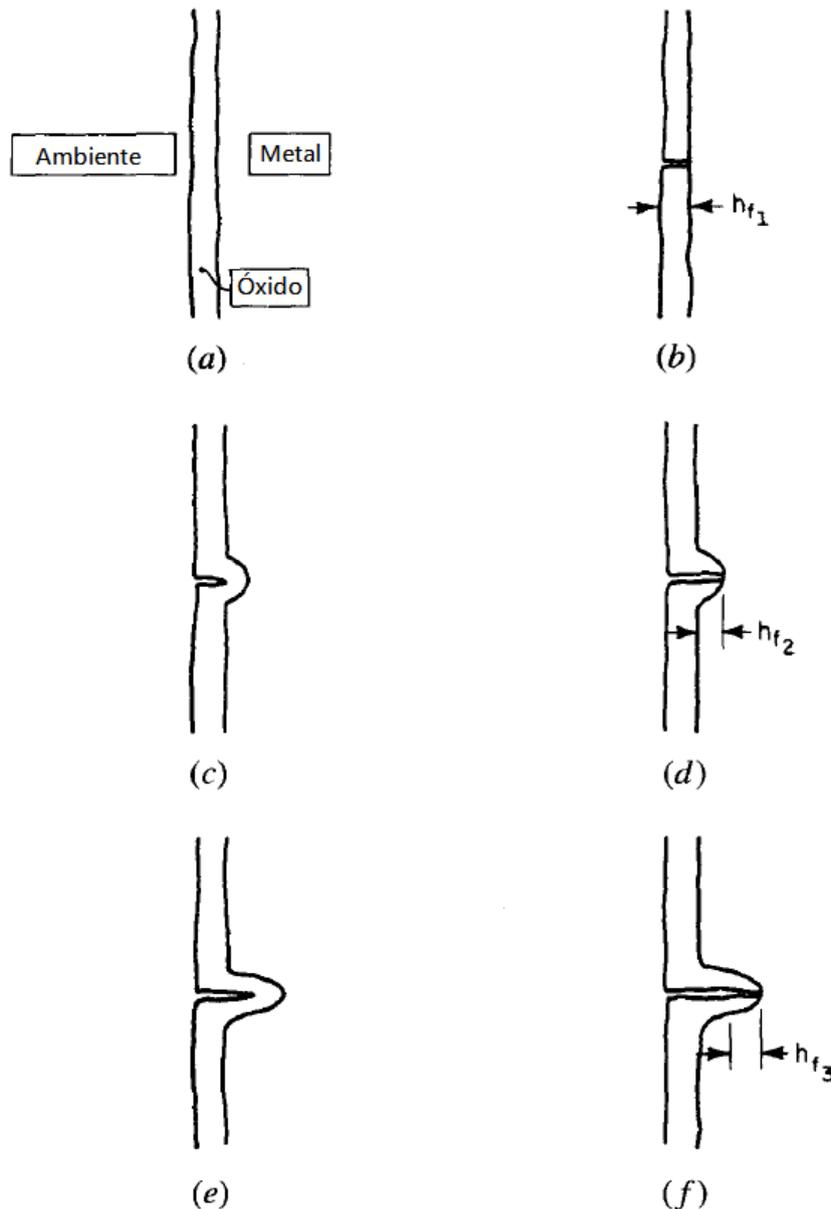


Figura 13. Mecanismo de nucleação e propagação de trincas no substrato a partir de trincas no filme de óxido. Adaptado de [].

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Funtec BNDES e à Gerdau pelos auxílios à pesquisa realizada no Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT) e na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

REFERÊNCIAS

- 1 Brandim AS, Sousa RRM, Alves Jr C. Desenvolvimento de um equipamento para ensaio de fadiga térmica. Revista Matéria. 2009;14(1):749-758.
- 2 Zuchowski R. Analysis of the thermal fatigue process. Journal of Materials Processing Technology. 2000;106(1):167-172.
- 3 Howes MAH. Fatigue at elevated temperatures. Londres: American Society for Testing and Materials;1973.

- 4 Andreis G, Fuchs KD, Schruff I. The wear behaviour of hot-work tool steels used in forging processes. Proceedings of the 5th International Tooling Conference.
- 5 Gonçalves CS. Efeito do processo de nitretação sob plasma no comportamento em fadiga térmica dos aços ferramenta para moldes para injeção de alumínio sob pressão. Dissertação (Mestrado). São Paulo: Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais; 2012.
- 6 Braga APV. Investigação dos mecanismos de nucleação de trincas de fadiga térmica em um aço ferramenta com carbonetos de nióbio. Tese (Doutorado). São Paulo: Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, 2017.
- 7 Gürçan M, Schneiders T, Beutler U. New hot work tool steel thermotur E 40 K superclean. In Proceedings of the 10th International Tooling Conference; 2016; Bratislava, Eslováquia: ASMET. p. 226-235.
- 8 Serebinski F. Prediction of Plate Cooling During Rolling Mill Operation. Journal of Iron and Steel Institute. 1973;211:197-203.
- 9 Lima LGDBS. Análise experimental e modelagem numérica da influência da oxidação na fadiga térmica de cilindros de laminação a quente. Dissertação (Mestrado). São Paulo: Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia Mecânica; 2018.
- 10 Tseng A. A. Thermal Modeling of Roll and Strip Interface in Rolling Processes: Part 2 – Simulation. Numerical Heat Transfer. 1999; 35A: 135-154.
- 11 Boccalini Jr M, Souza RM. Sistema avançado para projeto de ligas utilizadas em ferramentas de conformação a quente. Relatório técnico (Acesso restrito). São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. 2017.
- 12 Howes MAH. Study of Thermal Fatigue Mechanisms. In: Spera DA, Mowbray DF. Thermal Fatigue of Materials and Components. Materials Park, EUA. American Society for Testing and Materials, 1976: 86-105.
- 13 Oshida Y, Liu HW. Grain Boundary Oxidation and an Analysis of the Effects of Oxidation on Fatigue Crack Nucleation Life. In: Solomon HD, Halford GR, Kaisand LR, Leis BN. Low Cycle Fatigue. Materials Park, EUA: American Society for Testing and Materials, 1986: 1199-1217.
- 14 Sonoda A, Hamada S, Noguchi H. Analysis of Small Spalling Mechanism on Hot Rolling Mill Roll Surface. Memoirs of the Faculty of Engineering, Kyushu University. 2009;69:1-14.
- 15 Hochanadel PW, Edwards GR, Maguire MC e Baldwin MD. The effect of microstructure on the thermal fatigue resistance of investment cast and wrought AISI H13 hot work die steel. Proceedings of the 18th International die casting congress and exposition. Indianapolis, EUA, 1995.
- 16 Mevrel R. Cyclic oxidation of high-temperature alloys. Materials Science and Technology. 1987;3:531-535.
- 17 Neu RW, Sehitoglu H. Thermomechanical fatigue, oxidation and creep: Part ii. life prediction. Metallurgical Transactions A. 1989;20(A):1769-1783.