

Cap. 8 FADIGA EM ALTA TEMPERATURA

LEITURA: FADIGA TÉRMICA, ISOTÉRMICA E TERMOMECAÂNICA

Os efeitos do ambiente (corrosão, *fretting*, temperatura, irradiação de nêutrons, etc) sobre a resistência à fadiga dos metais tanto podem ser mais severos que os efeitos de entalhes como podem ser insignificantes. Previsões de vida quantitativas muitas vezes não são possíveis por causa da interação de vários fatores que influenciam na fadiga e por conta da falta de dados experimentais. Este texto é focado num efeito ambiental específico, ou seja, a fadiga em alta temperatura. Muitos sistemas de diversas áreas da engenharia, como motores de aviões e automóveis, componentes de usinas termoelétricas e nucleares, bem como indústrias químicas, estão sujeitos à fadiga em temperatura elevada. Trata-se de situações em que as temperaturas ultrapassam 30 ou 40% da temperatura absoluta de fusão do material. Componentes de turbinas a vapor, fabricados com aços ferríticos de baixa liga, operam a temperaturas acima de 570°C, enquanto alguns componentes de motores a jato, tipicamente fabricados com superligas à base de níquel, são expostos a temperaturas acima de 980°C. Em um cenário de preocupação crescente com fatores ambientais e com o uso eficiente de recursos, o aumento da temperatura de operação dos equipamentos desempenha um papel importante porque está diretamente relacionado com uma maior eficiência termodinâmica. Além disso, o custo da falha de dispositivos como o motor de um avião vem se tornando proibitivo. Desta forma, existe uma pressão considerável pela produção de máquinas que possam operar de forma cada vez mais segura em temperaturas cada vez mais altas.

O comportamento em fadiga e as previsões de vida são mais complexos em altas temperaturas do que na temperatura ambiente porque podem envolver uma interação complexa com processos termicamente ativados e dependentes do tempo. Estes incluem oxidação, fluência, relaxação, além de aspectos metalúrgicos. Por exemplo, a maioria das ligas destinadas ao emprego em altas temperaturas, como as ligas de titânio e superligas à base de níquel, exibe o endurecimento por deformação dinâmica. Trata-se de um mecanismo de endurecimento que envolve a interação de discordâncias em movimento com defeitos pontuais. Fatores como a frequência do carregamento e a forma de onda, que usualmente têm importância secundária em temperatura ambiente, podem influir significativamente na fadiga sob temperaturas elevadas.

Os estudos de fadiga em altas temperaturas podem ser classificados em três categorias: **fadiga térmica**, **fadiga isotérmica** e **fadiga termomecânica**. A fadiga térmica relaciona-se com a imposição de ciclos térmicos a um corpo-de-prova, sendo aplicada, por exemplo, em materiais destinados ao emprego como matrizes em processos de fundição. A fadiga isotérmica consiste na aplicação de ciclos de tensão ou deformação no corpo-de-prova mantido a temperatura constante. Neste caso, em ensaios uniaxiais ao ar a resistência à fadiga decresce com a diminuição da frequência do carregamento, fenômeno que pode ser atribuído principalmente à oxidação. Quando ocorrem variações simultâneas de carga (ou deformação) e temperatura, tem-se a fadiga termomecânica. Neste caso, a relação deformação-temperatura-tempo pode ser classificada em duas categorias: em fase (0°) e fora de fase (180°), dependendo de a máxima deformação no ciclo ser atingida no instante de temperatura máxima ou mínima. Outros graus de ciclagem fora de fase produzem os chamados carregamentos não proporcionais. Assim como na fadiga térmica, o efeito do ambiente é pronunciado e os ensaios ao ar geralmente resultam em vida em fadiga menor que ensaios em condições

similares realizados sob vácuo. Devido à complexidade das análises da fadiga termomecânica, simplificações têm sido propostas para a previsão de vida. Descrições muito boas do comportamento em fadiga termomecânica foram obtidas empregando-se resultados de ensaios de fadiga isotérmica segundo o método ϵ/N (ensaios controlados pela deformação) e um modelo não linear de endurecimento cinemático. Histórias de carregamentos em alta temperatura podem apresentar também tempos de parada (*hold times*) a uma dada tensão ou deformação. Discos ou paletas de turbinas são exemplos desta condição. Neste caso, os laços de histerese tornam-se mais complexos e descontínuos, mesmo sob condições isotérmicas. Verificou-se que o método ϵ/N é o que melhor representa as condições de contorno nos pontos críticos dos componentes, e que os efeitos da fluência na vida em fadiga podem ser bem simulados por meio de paradas sob deformação máxima constante, aplicadas nos ensaios.

Fluência: Os materiais podem se deformar lenta e continuamente ao longo do tempo sob carga ou tensão constante quando sujeitos a uma temperatura suficientemente alta, caracterizando o fenômeno da fluência. A degradação dos materiais devido à fluência pode ser classificada em dois tipos: mecânica e ambiental. A degradação mecânica está relacionada às mudanças das dimensões dos componentes devidas à deformação plástica dependente do tempo. A degradação ambiental é devida à reação do material com o meio ou à difusão de elementos externos no metal. A Figura 1 apresenta curvas típicas de fluência, que são uma representação gráfica da deformação *versus* tempo sob carga (ou tensão) e temperatura constantes. A falha por fluência pode resultar de dano localizado ou generalizado. Componentes sujeitos a carregamento e temperatura uniformes, como vasos de pressão, são candidatos ao dano generalizado, falhando tipicamente por ruptura devido à fluência. Componentes submetidos a gradientes de tensão e temperatura, tais como pás de turbinas, muitas vezes apresentam crescimento de trinca por fluência como resultado de trincas iniciadas em pontos críticos.

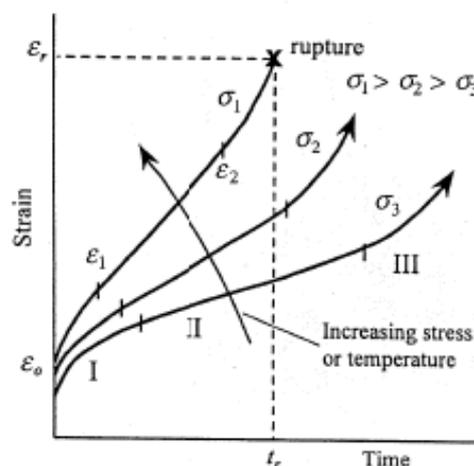


Figura 1. Curvas de fluência esquemáticas para diferentes níveis de tensão ou temperatura.

Comportamento tensão-deformação sob carregamento cíclico: Histórias de carregamento em temperaturas elevadas frequentemente apresentam tempos de parada (*hold times*) a uma dada tensão ou deformação. Discos ou pás de turbinas podem estar submetidos a esta condição. Sob tensão constante, pode ocorrer a fluência, resultando em alterações na forma do componente. Sob deformação constante, a relaxação pode acontecer, resultando em redução da tensão. Coffin resumiu os laços de histerese básicos para diferentes histórias de carregamentos cíclicos e *hold times*, como mostrado na Figura 2. Nesta figura são mostrados cinco diferentes carregamentos cíclicos e os correspondentes laços de histerese. Observa-se

que os laços de histerese podem se tornar bem complexos e descontínuos, mesmo sob condições isotérmicas. A Figura 2(e) mostra o resultado da **fadiga termomecânica**, com alterações simultâneas no carregamento mecânico e temperatura. A partir da Figura 2 pode-se antever as dificuldades em se prever a vida em fadiga de componentes submetidos a histórias reais de carregamentos em altas temperaturas, sejam isotérmicos ou termomecânicos.

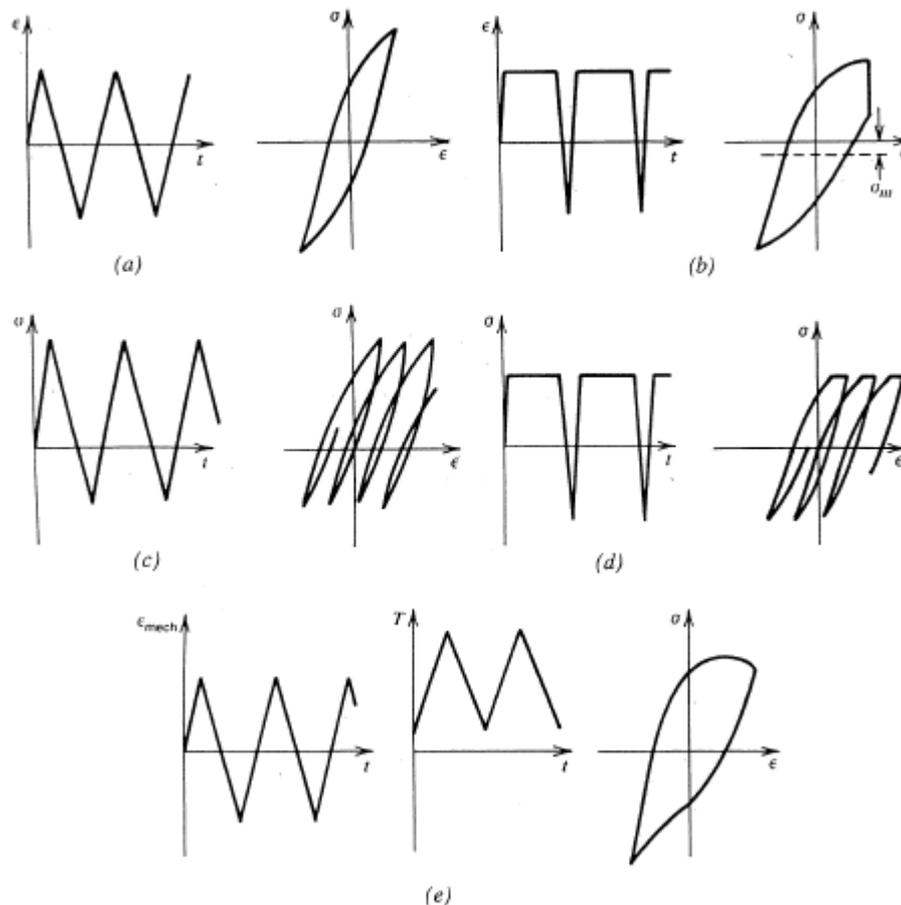


Figura 2. Laços de histerese para diferentes carregamentos cíclicos.

Durante um ensaio de fadiga, os processos de amolecimento e endurecimento cíclico se manifestam pela variação da amplitude de tensão necessária para causar uma dada amplitude de deformação. Mesmo para parcelas da vida em que a tensão de pico se mantém constante, alterações microestruturais estão continuamente ocorrendo no material. A tensão externa aplicada deve estar em equilíbrio com as tensões internas, que podem ser consideradas em termos das variáveis de endurecimento internas. Para se movimentarem, as discordâncias devem superar campos de tensões internas de diferentes alcances. Esse conjunto de tensões é considerado em termos de dois componentes principais: tensões de curto alcance, que podem ser superadas por ativação térmica e, portanto, dependem da temperatura e da taxa de deformação, e tensões de longo alcance, que dependem apenas da deformação. Do ponto de vista mecânico, as variáveis de endurecimento internas são representadas pela Figura 3, onde σ_1 e σ_2 são as tensões principais, e são divididas em dois tipos: *i*) a variável isotrópica, também chamada tensão de atrito (σ_f), que representa a expansão ou contração do domínio elástico delimitado pela superfície de escoamento, e *ii*) a variável cinemática, também chamada tensão de recuo (σ_b), que representa a translação da superfície de escoamento no espaço tensional. O estudo das variáveis internas de endurecimento baseado na análise dos

laços de histerese pode fornecer um entendimento explícito sobre o comportamento cíclico do material. Aplica-se neste caso a técnica proposta por Cottrell, vista anteriormente no nosso curso, para avaliar σ_f e σ_b .

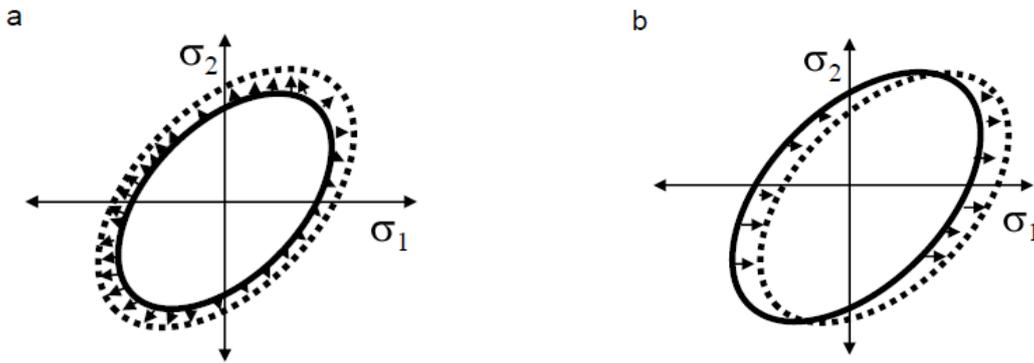


Figura 3. Expansão (a) e translação (b) da superfície de escoamento, representando as variáveis isotrópica e cinemática, respectivamente.

Comportamento tensão-vida: Em altas temperaturas, os materiais metálicos usualmente não exibem um limite de fadiga, e a resistência à fadiga decresce continuamente com relação ao número de ciclos para a falha. Nestas condições, 10^8 ciclos pode ser um valor razoável para se obter a resistência à fadiga em alto ciclo. A Figura 4, obtida por Forrest, fornece uma visão bastante detalhada de como a vida em fadiga de alto ciclo sob condição de carregamento totalmente reversa é influenciada pelas temperaturas elevadas. Nesta figura, uma variedade de materiais está representada e os dados para cada material não incluem toda a faixa de temperaturas do gráfico porque cada material tem sua faixa de temperaturas de trabalho específica. Por exemplo, ligas de alumínio e magnésio são viáveis somente até 200 ou 300°C, enquanto ligas níquel-cromo e ligas de cobalto são predominantes a temperaturas maiores, entre 600 e 900°C. Geralmente a resistência à fadiga diminui com o aumento da temperatura. As exceções são os materiais que apresentam endurecimento por deformação cíclica, que é acompanhado por uma queda na ductilidade.

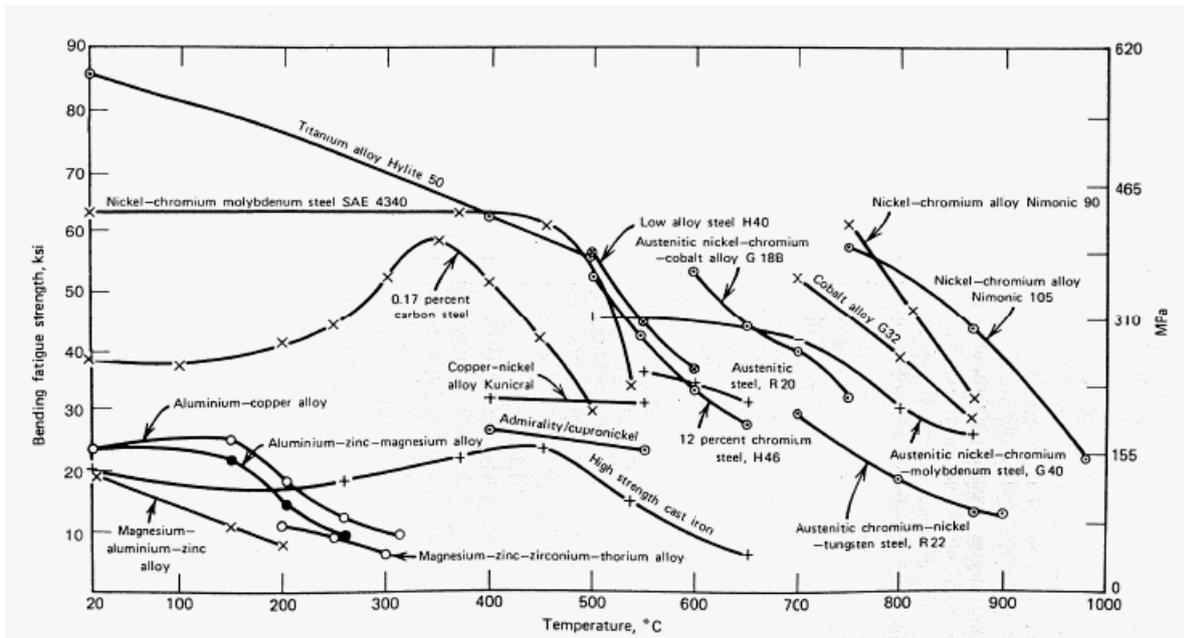


Figura 4. Influência da temperatura na resistência à fadiga de diversos materiais.

Comportamento deformação-vida: As aplicações em turbina a gás, turbina a vapor e energia nuclear criaram a principal motivação para se obter dados de projeto deformação-vida em altas temperaturas. Essas são situações em que carregamentos cíclicos são superpostos a cargas estáticas de fluência de longo termo. A Figura 5 mostra curvas deformação-vida típicas obtidas por Berling e Slot para o aço inoxidável AISI 304 ensaiado ao ar em três diferentes temperaturas e duas frequências distintas. Para uma dada temperatura, a frequência mais baixa apresenta a menor resistência à fadiga e, na medida em que a temperatura aumenta, a resistência à fadiga diminui. Coffin indicou que este comportamento deformação-vida em altas temperaturas é típico para ambientes ao ar, e que os efeitos da frequência e da temperatura são devidos a aspectos ambientais, principalmente a oxidação.

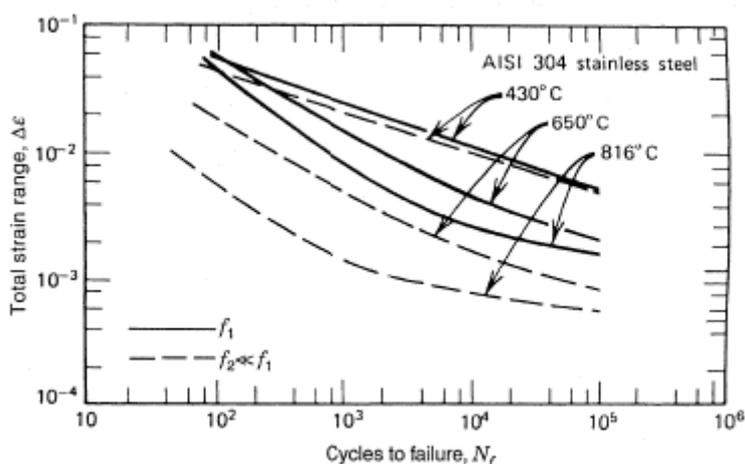


Figura 5. Efeitos da temperatura e da frequência no comportamento em fadiga do aço inoxidável AISI 304 em ensaios deformação-vida.

Propagação de trincas por fadiga: Assim como no caso das aplicações em temperatura ambiente, a variação do Fator Intensidade de Tensão ΔK e a razão de tensão R podem ser usados para descrever a propagação de trincas por fadiga em altas temperaturas. Contudo, devido à interação complexa da fadiga com processos termicamente ativados, o comportamento é muito mais difícil de se prever. Os efeitos da temperatura, ambiente, frequência, forma de onda e razão de tensão têm sido investigados em diversos trabalhos de pesquisa. James mostrou que as taxas de propagação da trinca na região II para a liga Hastelloy X-280 aumentam para um dado ΔK quando a temperatura é aumentada, como pode ser observado na Figura 6. Aqui pode ser visto que da/dN para um dado ΔK é mais de uma ordem de grandeza maior a 649°C do que à temperatura ambiente. Comportamento similar foi observado para superligas à base de níquel e aço CrMoV.

O tamanho de grão também afeta o comportamento em fadiga dos metais. Verifica-se que materiais com grãos finos tendem a ter maior resistência à fadiga, enquanto que grãos grosseiros resultam em maior resistência à fluência. Assim, em temperaturas moderadamente elevadas, grãos finos resultam em maior resistência quando a fadiga é o processo dominante, enquanto que grãos grosseiros são mais desejáveis a temperaturas de operação muito altas, onde a fluência é o processo dominante. Hicks e King verificaram para uma superliga à base de níquel que, no caso de apresentar grãos grosseiros, o valor *threshold* (limiar) da variação do Fator Intensidade de Tensão ΔK_{th} diminui com o aumento da temperatura, o que não aconteceu para o mesmo material apresentando granulometria fina. A queda no ΔK_{th} para o

material com grãos grosseiros foi relacionada com alterações na morfologia da fratura, verificando-se que a superfície tornava-se mais plana com o aumento da temperatura. No caso do material com grãos finos, a rugosidade da superfície de fratura foi similar a 20°C e a 600°C, levando também a um comportamento similar dos valores de *threshold*.

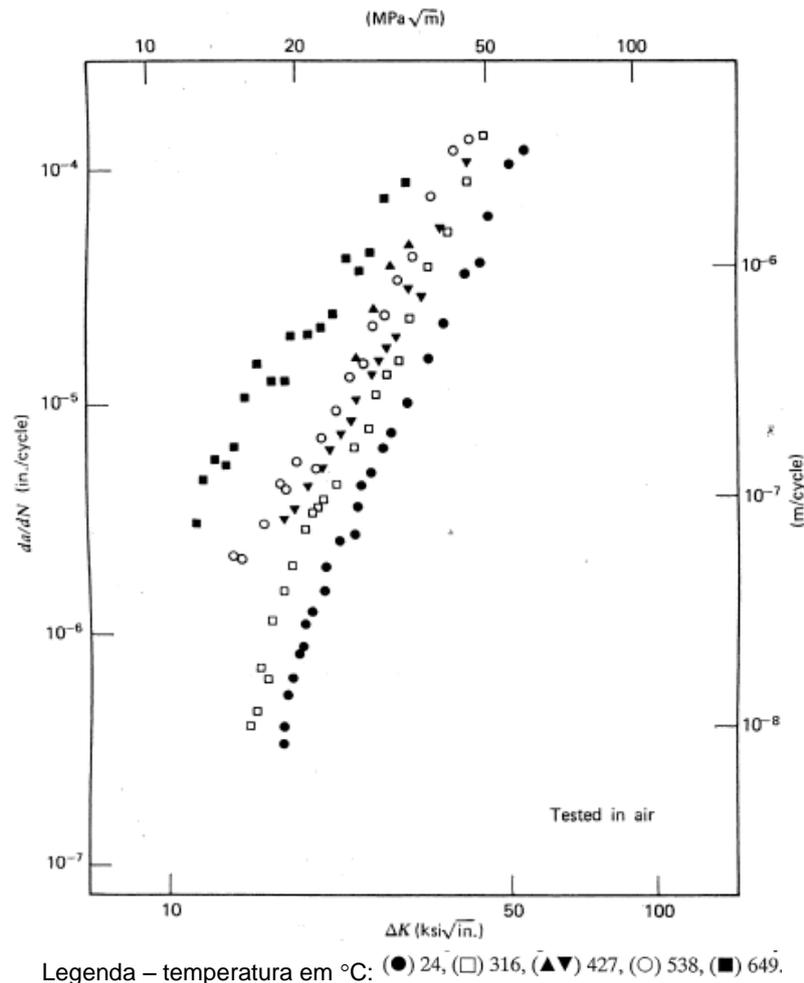


Figura 6. Efeito da temperatura na propagação de trincas por fadiga em Hastelloy X-280.

Recobrimentos e tratamentos de superfície: Um dos aspectos importantes quando se considera a fadiga em temperatura elevada é proteger a superfície das peças, uma vez que a oxidação é uma das principais causas da degradação da resistência à fadiga nesta situação. Tratamentos de superfície vêm sendo empregados com o intuito de melhorar algumas propriedades dos materiais, como a resistência à corrosão e aos processos de erosão e desgaste em temperaturas elevadas, contribuindo dessa forma para o aumento da vida em fadiga e fluência. As técnicas de endurecimento e revestimento superficiais por plasma têm sido abordadas em trabalhos científicos voltados para a produção de componentes de ligas de titânio e superligas para aplicação em alta temperatura. A descrição dos diferentes mecanismos de dano elaborada por T. J. Carter sugere que as ligas de titânio, geralmente aplicadas como elemento estrutural em partes complexas de turbinas a gás, requerem resistência elevada às condições de carregamento, aos danos causados por erosão ou impacto de partículas, e aos processos de corrosão à quente e oxidação, os quais podem acelerar os processos de fadiga e fluência. Os tratamentos termoquímicos a plasma têm mostrado bons resultados no aumento de dureza, propriedades de fadiga e proteção contra corrosão. Devido à

elevada dureza e à estabilidade térmica dos compostos formados, a técnica vem sendo explorada para obtenção de melhor desempenho de diferentes materiais sujeitos à fadiga de alto ciclo, fadiga térmica e fluência. Nesse contexto, as análises realizadas por Kim e colaboradores para a liga Ti-6Al-4V com uma estrutura típica de Widmanstätten e carbonetada a plasma, envolveram testes de fadiga de alto ciclo a temperatura ambiente e a 500°C. A formação de TiC e V₄C₃ aliada aos efeitos de tensões compressivas, retardaram a nucleação e propagação de trincas e contribuíram para o aumento da vida em até duas vezes com relação à vida das amostras não tratadas em ambas as condições de teste. A Figura 7 mostra os resultados obtidos a 500°C.

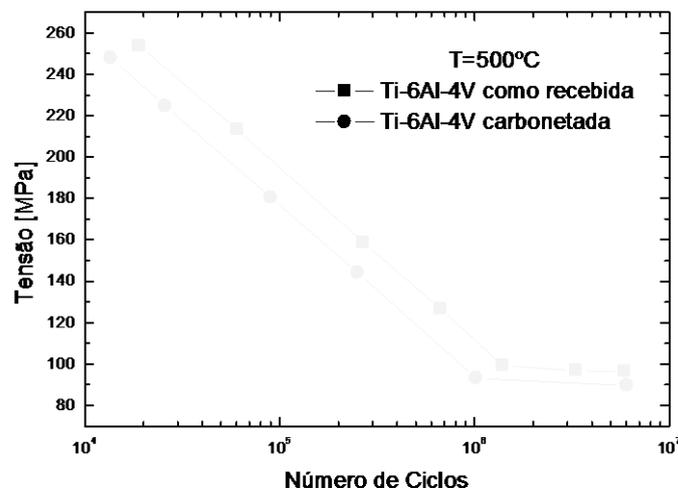


Figura 7. Efeito da carbonetação a plasma no comportamento em fadiga da liga Ti-6Al-4V.

Fadiga térmica: Em muitas situações, as condições que levam à falha são devidas ao ciclo térmico aplicado ao componente. Para entender como um material se comporta quando submetido à fadiga térmica é importante simular o ciclo térmico do processo no qual ele será usado. Isto é conseguido ao se avaliar o processo e desenvolver um teste que o simule: taxa de aquecimento, taxa de resfriamento, diferença de temperatura, temperatura máxima, duração do ciclo, etc. Norwood e colaboradores desenvolveram um procedimento para ensaio de fadiga térmica no aço AISI H13, empregado na fabricação de matrizes para fundição de peças de alumínio. Neste processo, a liga de alumínio é injetada entre 700°C-750°C, dependendo da geometria do molde, o qual é refrigerado com água. Tipicamente, um molde produz de 100.000 a 150.000 peças de alumínio. Há três modos básicos de falha das matrizes: erosão, desgaste e fadiga térmica. Neste último caso, verifica-se que o molde é submetido à flutuação de temperatura que pode causar fadiga térmica e, eventualmente, a falha. O projeto e a seleção de material são cruciais, porque afetam o desempenho e a vida das matrizes. Raios pequenos (0,5 a 1,0 mm) e grandes variações de espessura podem acelerar a fadiga térmica, pois agem como concentradores de tensão. A iniciação de trincas é associada ao acúmulo de deformação plástica localizada que ocorre durante cada ciclo de operação. O crescimento inicial da trinca é facilitado pela oxidação das superfícies da trinca e subseqüentemente pelo preenchimento da trinca com o metal fundido.

O ensaio proposto por Norwood e colaboradores emprega corpos-de-prova em forma de disco com espessura variável, como mostrado na Figura 8(a). Este espécime permite uma

fácil visualização das trincas iniciadas durante o ensaio, como mostrado na Figura 8(b) para um corpo-de-prova com 220.000 ciclos térmicos.

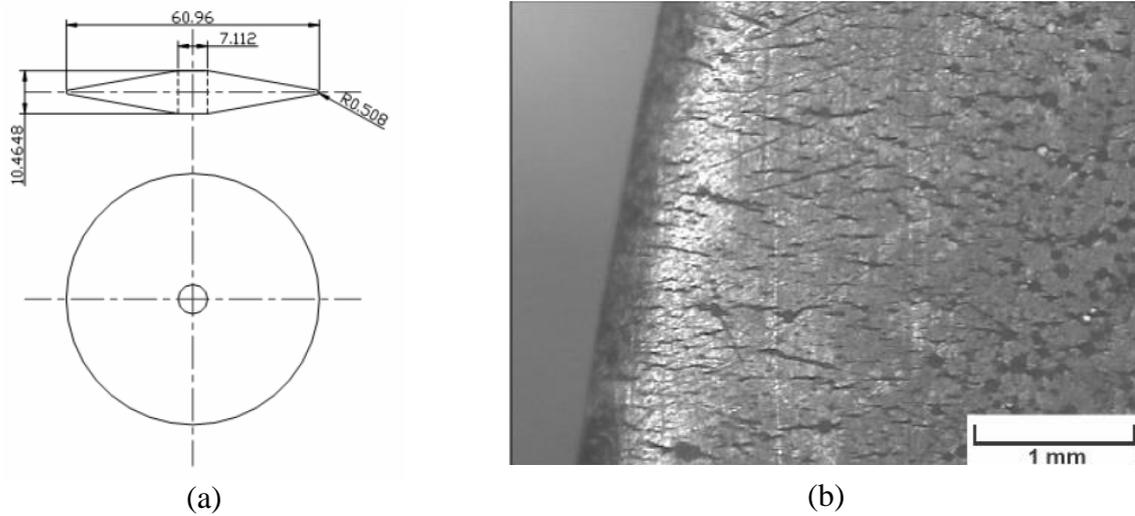


Figura 8. Corpo-de-prova (a) e trincas iniciadas (b) em ensaio de fadiga térmica.

O aparato de Norwood e colaboradores visa a obtenção de resultados com alta reprodutividade e para isto um sistema para ensaio de 4 discos simultaneamente foi desenvolvido. O sistema é composto de um meio aquecedor, um meio resfriador e um transportador para transferência automática dos espécimes entre os dois meios. Esse sistema é mostrado na Figura 9 e foi projetado para ter grande versatilidade de ajuste no posicionamento dos espécimes. O projeto básico consiste de um pórtico de aço com atuadores pneumáticos nas direções X e Z e a faixa de temperaturas de operação é de 25°C a 1.200°C.

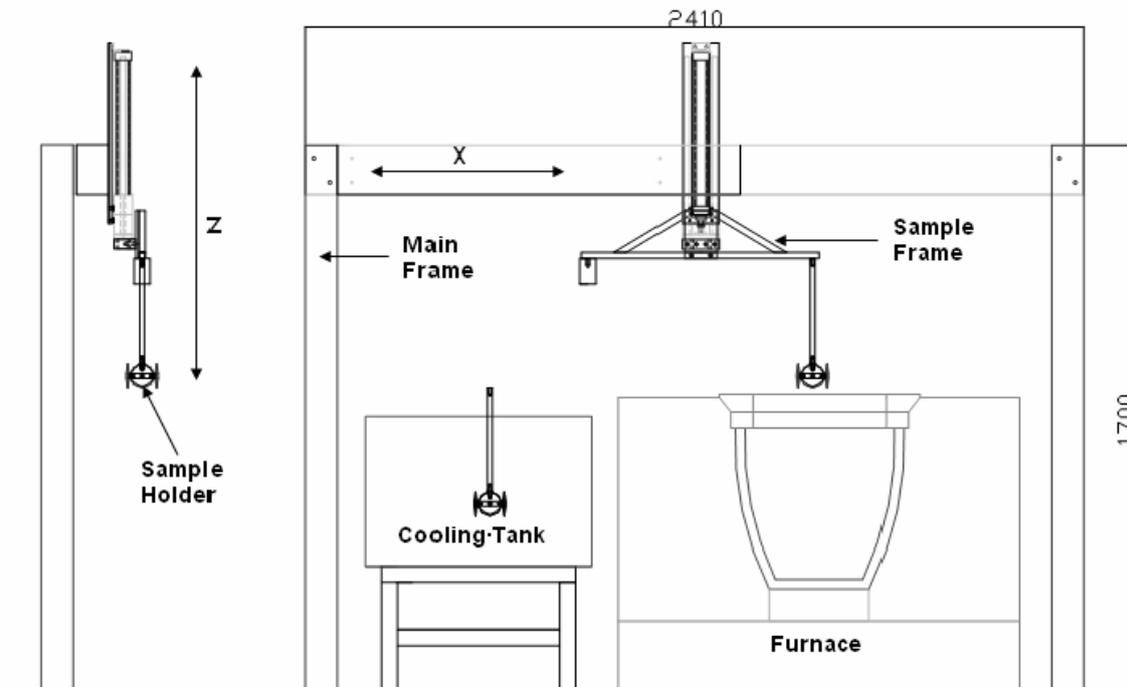


Figura 9. Desenho esquemático do equipamento para ensaio de fadiga térmica.