

FADIGA DE BAIXO CICLO: UMA REVISÃO DA LITERATURA

Emanoel Gomes Alves¹, Francisco Edson Nogueira Fraga²

Resumo: No estudo apresentado neste trabalho foi realizada uma pesquisa na literatura com o objetivo organizar o que de mais significativo é abordado acerca da fadiga de baixo ciclo. A fadiga de baixo ciclo pode ser conceituada como aquela cuja vida do material está limitada a aproximadamente 10^5 ciclos. A principal característica desse mecanismo é o fato das tensões cíclicas ultrapassarem o limite de escoamento do material em fadiga. A fadiga de baixo ciclo ocorre com destaque em condições de variação térmica, quando o material passa a suportar tensões internas por ser impedido de dilatar-se. Vasos de pressão para a indústria nuclear e turbinas a vapor são exemplos de equipamentos susceptíveis. A previsão da vida em fadiga de baixo ciclo é feita por meio da equação de Coffin-Manson que descreve a curva do gráfico deformação versus número de ciclos. Os testes para fadiga de baixo ciclo são arranjados com base na orientação de normas internacionais, além existir pesquisas publicadas em todo mundo dedicadas a propor novos modelos de ensaio. Vale ressaltar a considerável importância desta pesquisa, visto que não existem muitos trabalhos na literatura brasileira, especialmente na região nordeste, direcionados a estudar a fadiga de baixo ciclo, servindo assim como um referencial e estimulador para novos trabalhos.

Palavras-chave: Fadiga; Baixo Ciclo; Falha; Fratura.

1. INTRODUÇÃO

A fadiga de baixo ciclo consiste em uma falha mecânica causada por esforços repetidos do material que o levam a ruptura. É denominada de baixo ciclo porque o elemento suporta aproximadamente 10^5 ciclos de esforço, o que é pouco para um componente mecânico. O material se rompe no regime de baixo ciclo porque as cargas a que ele está submetido impõem-lhe deformações permanentes, nomeada deformação plástica. Com isso, surgem trincas microscópicas no material, que se desenvolvem e propagam-se formando trincas ainda maiores, o que é denominado nucleação [1,2].

A fadiga é a principal causadora de falhas em elementos mecânicos. Prever a vida de um componente submetido à fadiga é de extrema importância no desenvolvimento de um projeto mecânico sujeito a cargas cíclicas. A fadiga a um baixo número de ciclos diminui assombrosamente a durabilidade de um elemento metálico, sendo por isso, imprescindível entender quais são as características da formação e propagação da falha.

Contudo, é perceptível no ambiente acadêmico a apresentação de conceitos superficiais acerca da fadiga de baixo ciclo, não abrangendo, portanto, as condições em que ela ocorre, quais são as características microscópicas e macroscópicas de um material submetido a tal esforço. Faz-se então necessário fazer uma profunda pesquisa acerca dos pontos essenciais evidenciados em estudos sobre a fadiga de baixo ciclo, a fim de obter o domínio teórico científico desse relevante tema na ciência dos materiais.

Este trabalho constitui-se em uma revisão de literatura, que busca explicar o que é fadiga de baixo ciclo, diferenciando-a da de alto ciclo por meio das mais relevantes publicações de diferentes autores sobre o tema. O estudo se deu início com uma pesquisa virtual, na literatura acadêmica, direcionada a responder algumas perguntas acerca da fadiga de baixo ciclo, como por exemplo: O que é fadiga de baixo ciclo? Em que condições ela ocorre? Quais equipamentos são susceptíveis? Como são realizados os ensaios mecânicos? Como prever a vida em fadiga de baixo ciclo? As respostas a essas perguntas proporcionou um primeiro contato com o tema, também elegeu os subtemas a serem abordados e os objetivos específicos da pesquisa. A busca pelo pleno domínio do assunto, visando uma clara explicação permitiu o desenvolvimento, finalizando com uma conclusão contemplada com a anotação dos resultados e explicação das informações presentes no arranjo da revisão. Foram selecionados livros, normas, teses, artigos e dissertações, disponíveis eletronicamente em português e/ou inglês, que em algum trecho contivessem elementos teóricos indispensáveis para o completo entendimento da fadiga de baixo ciclo.

Fundamentado na literatura clássica, o trabalho se inicia com uma contextualização sucinta da falha por fadiga, trazendo uma rápida abordagem histórica de como o estudo desse fenômeno vem se desenvolvendo ao longo dos anos. Além disso, nessa contextualização traz-se a definição de tensões cíclicas, a curva S-N é abordada, e como também, é discutida a iniciação e propagação da trinca levando em consideração os fatores que

¹ Discente: Graduando em Ciência e Tecnologia, UFERSA, emanoel.baterista@hotmail.com

² Orientador: Professor Dr. Centro de Engenharias, UFERSA, nfraga@ufersa.edu.br

afetam a vida em fadiga e os efeitos do ambiente.

Após a apresentação ampla da fadiga, no segundo tópico o trabalho prossegue tratando especificamente da fadiga de baixo ciclo, evidenciando o conceito. Com relação a essa definição, o mesmo capítulo aborda a nucleação; o processo de propagação da trinca; os fatores que afetam a vida em fadiga de baixo ciclo e os equipamentos susceptíveis a fadiga de baixo ciclo.

Demostrou-se ser indispensável uma abordagem matemática, essencial no exercício da engenharia, extremamente relevante para a compreensão da fadiga de baixo ciclo e realização dos ensaios mecânicos. Ademais, são apresentadas então as equações de Basquin e Coffin-Manson, além de uma explicação de como se obter o gráfico tensão-deformação (σ - ϵ) e o gráfico deformação-número de ciclos (ϵ -N) no regime de baixo ciclo, como também as orientações para realização das técnicas de ensaios.

Assim sendo, o presente estudo teve como objetivo geral compreender o desenvolvimento da falha por fadiga a um baixo número de ciclos e como objetivos específicos entender o que é fadiga de baixo ciclo e como ocorre o processo de propagação desse tipo de falha; identificar quais são os fatores que afetam a vida dos equipamentos susceptíveis a fadiga de baixo ciclo; analisar a abordagem matemática no que tange a estimativa da vida de elementos sob fadiga de baixo ciclo além de uma clara compreensão dos gráficos deformação versus número de ciclos e tensão versus deformação.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1. Fadiga

Até 1800 não havia evidências a respeito da falha por fadiga, os elementos mecânicos eram projetados considerando apenas ensaios de carregamento estático, falhas mecânicas advindas de cargas dinâmicas até então era um fenômeno desconhecido. Com a introdução das máquinas a vapor esse tipo de falha foi observado pela primeira vez, tendo o primeiro artigo publicado a seu respeito por Rankine em 1843. Destacou-se inicialmente o estudo do engenheiro alemão August Wöhler, que descobriu o limite de resistência à fadiga e assim desenvolveu o diagrama S-N [3].

As tensões de natureza cíclica podem apresentar-se de três maneiras distintas, sendo todas representadas por um gráfico tensão variável versus tempo, conforme está exemplificado na Figura 1. A primeira denomina-se ciclo de tensões alternadas, nesse tipo, o valor médio de tensão σ_m é igual a zero, pois a carga máxima de tração é igual a carga máxima de compressão. As cargas de compressão são representadas com sinal negativo, ao somar-se, portanto, esses valores para chegar a tensão média obtêm-se zero como resultado. O segundo tipo é o ciclo de tensões repetidas, no qual os valores médios de tensão são diferentes de zero, pois as cargas máximas de tração e compressão são fixas, porém, diferentes em módulo. Por último, o ciclo de tensões aleatórias, onde não há regularidade nas cargas máximas de tração e compressão [4].

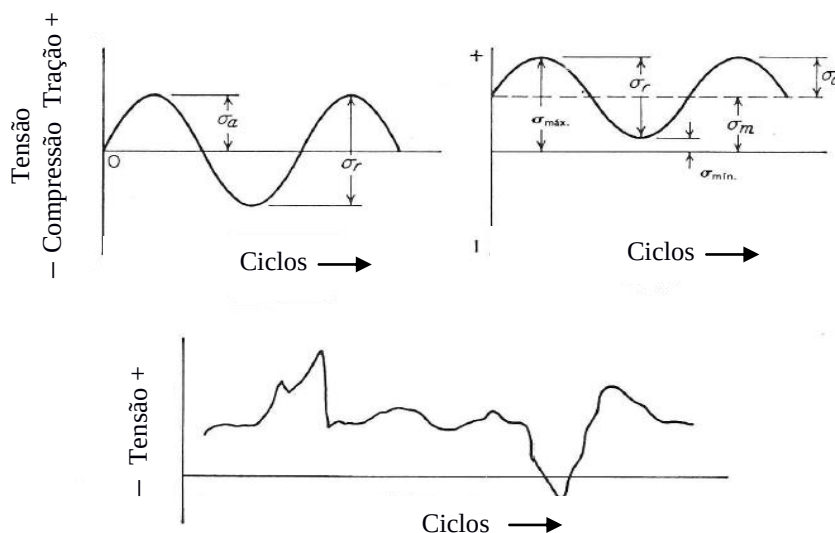


Figura 1. Tensões Cíclicas. (DIETER, 1981)

A vida em fadiga corresponde ao número de ciclos de amplitude de tensão que o material suporta a partir de quando ele está sem trincas até o evento da ruptura. O gráfico que versa sobre tensão versus tempo é uma maneira de representar o fenômeno da fadiga baseado na tensão, seu objetivo é determinar o limite de resistência à fadiga, que é o valor de tensão na qual abaixo dela a falha por fadiga não irá ocorrer. Porém, não é adequada para determinar o limite de resistência a fadiga de um elemento submetido à fadiga de baixo ciclo (como será

abordado adiante), pois o limite de escoamento é excedido nesse tipo de falha [3,5].

A falha por fadiga é dividida em três estágios, que são: início da trinca; propagação da trinca e ruptura repentina. Uma trinca minúscula pode ser capaz de dar início ao processo da falha por fadiga, existem casos de falhas por fadiga que iniciaram a partir de trincas menores que 1,7mm. As cargas cíclicas dilatam as trincas ao redor dos concentradores de tensão, isso acontece porque ocorrem deformações localizadas nessas trincas devido à tensão aplicada ao corpo ser maior nesses pontos do que a tensão nominal aplicada ao elemento como um todo. A carga de tração é a responsável pelo segundo estágio da falha por fadiga, a propagação da trinca, sendo que, esse estágio está presente durante maior parte da vida da peça, pois se desenvolve de maneira muito lenta. Um fator que acelera a propagação da falha é a corrosão, quando a peça solicitada ciclicamente está nessas circunstâncias denomina-se “fadiga de corrosão”. Por fim, quando a trinca atinge um tamanho crítico ocorre a ruptura repentina [3,4].

Há várias variáveis que podem afetar o comportamento em fadiga, entre elas, estão os efeitos ambientais; intervalo de tensão; variáveis metalúrgicas; geometria e efeitos da superfície. Esses fatores que afetam o comportamento em fadiga devem ser considerados no momento de projetar um elemento sujeito a cargas cíclicas. O nível de tensão cíclica na qual a peça está sujeita é determinante para a vida do elemento em fadiga. Aumentando o nível médio de tensão a vida em fadiga diminui. O material pode ser submetido a um intervalo de tensão constante durante sua vida, mas pode acontecer também do intervalo de tensão ser ampliado durante a vida do material, ou simplesmente ser totalmente aleatório. Existe também uma grande probabilidade da falha por fadiga desenvolver-se nas irregularidades estruturais da peça, pois essas irregularidades podem atuar como pontos concentradores de tensão, que são locais ideais para o início da trinca. Além disso, por meio de observações, foi concluído que a vida em fadiga é notadamente sensível à condição e configuração da superfície da peça, já que esta sofre diretamente a aplicação das cargas [4].

2.2. Fadiga de Baixo Ciclo

Consoante Callister (2012), fadiga de baixo ciclo refere-se à fadiga cuja vida do material é menor que aproximadamente 10^4 a 10^5 ciclos. Esse baixo número de ciclos se dá devido às cargas aplicadas a peça nesse regime serem altas o suficiente para deformar o material plasticamente a cada ciclo. Falcão (2002) estudando o comportamento da fadiga de baixo ciclo em altas temperaturas do aço inoxidável AISI 420 afirma que a região de transição do regime de baixo ciclo para o de alto ciclo é cerca de $5,5 \times 10^4$ ciclos.

A fadiga de baixo ciclo é comum, por exemplo, em componentes submetidos a variações de temperatura onde não existe espaço para a expansão térmica da peça, nesse caso, o material passa a sofrer tensões cíclicas internas que findam por ocasionar o processo da falha. Esse regime de fadiga deve ser considerado para projetos de vasos de pressão para a indústria nuclear, turbinas a vapor, entre outros tipos de elementos mecânicos sujeitos a flutuações de temperatura [1,2]. Muito se tem estudado em todo o mundo acerca da fadiga de origem térmica, conforme Falcão (2002) novas técnicas de ensaio para fadiga térmica tem sido desenvolvidas. Watanabe et al. (2018), realizaram uma pesquisa onde propunham um novo método de ensaio para previsão da vida em fadiga térmica para uma película fina de cobre galvanizado através de uma fresta, os experimentos mostraram-se compatíveis com as previsões fundamentadas na literatura.

No processo da fadiga de baixo ciclo, o início da trinca se dá por meio da nucleação múltipla ou homogênea, que geralmente ocupa apenas 1% da vida do material. Isso porque, durante a maior parte da vida do elemento está ocorrendo o processo de propagação da trinca em virtude dos grandes níveis de tensão a que o material está submetido. A nucleação múltipla surge em decorrência da formação de várias microtrincas, que são desenvolvidas em virtude das deformações plásticas localizadas, resultante dos grandes níveis de tensão. As microtrincas crescem à medida que as maiores absorvem as menores. Na nucleação homogênea uma única frente de propagação é formada decorrente de defeitos microestruturais [2,8].

A nucleação da trinca se inicia na superfície da peça que está em fadiga, onde as ligações atômicas podem ser rompidas mais facilmente, além da deformação localizada ser facilitada em virtude dos grãos superficiais estarem menos sustentados que os grãos no interior do material [6]. Falcão (2002), por exemplo, em seu estudo do comportamento da fadiga de baixo ciclo em altas temperaturas do aço inoxidável AISI 420, observa em seu experimento usando corpos de prova tubulares que a nucleação se deu início na superfície da peça e se propagou ao interior de maneira transgranular. Outro fato da superfície potencializar o início da nucleação é devido esta sofrer as máximas tensões e conter riscos, entalhes e corrosão, que funcionam como concentradores de tensão. Ademais, a estrutura do material; o tipo de carga e a temperatura do ambiente influenciam diretamente o mecanismo da nucleação [6].

O carregamento cíclico em fadiga produz linhas de escorregamento na superfície do material, que, ao se agruparem formam bandas de deslizamento na forma de intrusões e extrusões. Habitualmente, a nucleação surge nessas bandas de deslizamento, mas, pode surgir também nos contornos de grão ou de macla, como observou Watanabe et al. (2018), em seu trabalho tratando da fadiga de baixo ciclo em películas finas de cobre galvanizado em condições de alta temperatura, a trinca se deu início nos contornos de grão. Partículas de segunda fase também podem dar início à nucleação. Por esse motivo, faz-se necessário adotar medidas alusivas à estrutura do material que minimizem as inclusões e contornos de grão, além de microestruturas que impeçam ou

homogenizem o deslizamento da superfície. O revestimento superficial pode ser adotado como uma medida preventiva a nucleação. Também são válidas medidas que reduzam a densidade das partículas de segunda fase [6,9].

Consolidada a nucleação, o material em fadiga adentra o segundo estágio, que é o processo de propagação da trinca. A propagação avança a uma velocidade de alguns grãos por ciclo, na maioria das situações o processo é transgranular. Pode acontecer da trinca desenvolver-se através dos contornos de grão em casos onde o ambiente é corrosivo ou a temperatura elevada, ou ainda quando as fases possuem contornos de grão frágeis [6]. Dieter (1981) adota o mecanismo proposto por Laird e Smith para a propagação das trincas, no qual, a carga de tração arredonda a trinca e a carga de compressão a afia a cada ciclo, como está representado na Figura 2. Quando a seção transversal não pode mais suportar a solicitação a fratura é consumada e o material se rompe, deixando frequentemente estrias na superfície de fratura, onde cada estria é o resultado de um ciclo de tensão, comprovando que a falha ocorreu pelo processo de fadiga. Entretanto, a ausência de estrias não descarta a possibilidade de a falha ter ocorrido por fadiga. A respeito da ausência de estrias escreve Dieter (1981):

“A não observação das estrias na superfície de fratura por fadiga pode ser devido a um espaçamento muito pequeno que não pode ser resolvido pelos métodos de observação utilizados, por ductilidade na ponta da trinca insuficiente para produzir por deformação plástica uma ruga grande o bastante para ser observada, ou extinção das estrias por algum tipo de dano na superfície. Uma vez que a propagação no estágio II não ocorre para a vida total em fadiga, isto não significa que a contagem do número de estrias fornecerá a história completa dos ciclos para ruptura. (DIETER, 1981, p. 356)”

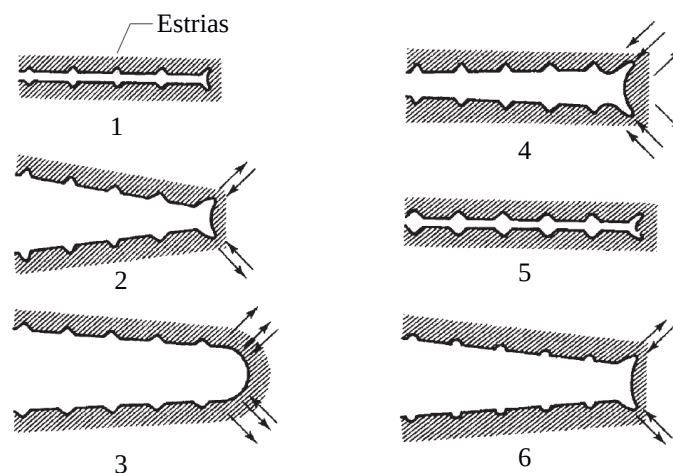


Figura 2. Mecanismo de propagação da trinca. (CAMPBELL, 2008)

2.3. Abordagem Matemática

É apresentado nas Figuras que se seguem, o desenvolvimento do gráfico $\sigma - \epsilon$ resultante de um processo de fadiga em regime de baixo ciclo.

Como representado na Figura 3, a partir da origem até o ponto A, o material está sob tração, ao cessar a aplicação, o material perde um pouco de sua deformação e descreve a curva AD. Ao chegar ao ponto D não há nenhuma tensão sendo aplicada a peça momentaneamente [10].

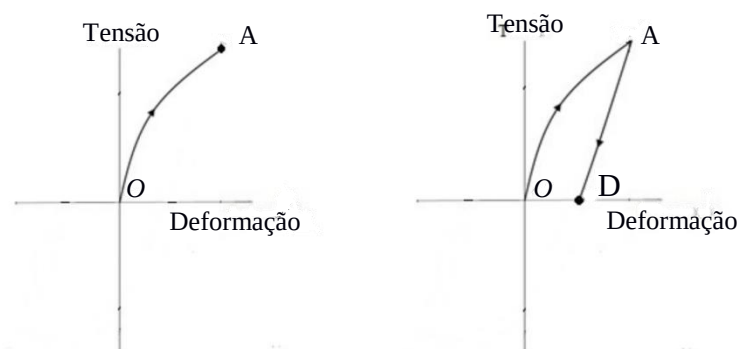


Figura 3. Material em fadiga sob tração. (adaptado de CAMPBELL, 2008)

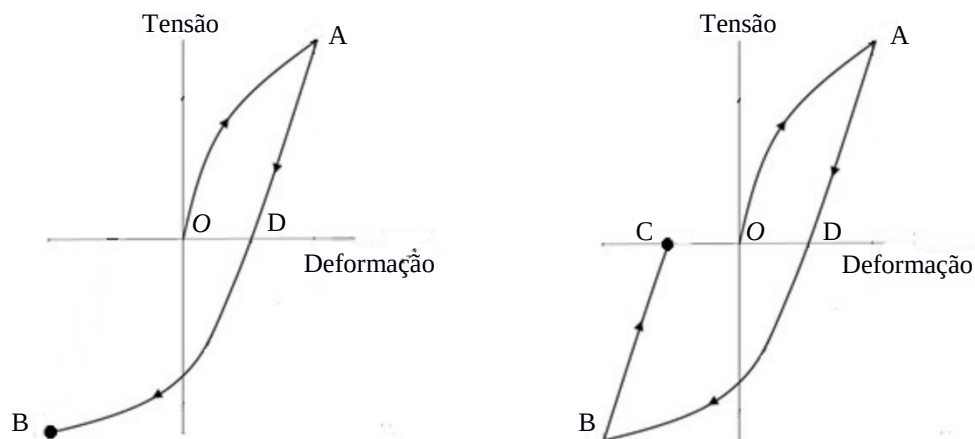


Figura 4. Material em fadiga sob compressão. (adaptado de CAMPBELL, 2008)

Em seguida, o material passa a receber uma carga de compressão, essa tensão e consequente deformação resultam na curva DB, Figura 4. Ao cessar o esforço compressivo a curva se eleva até o ponto C, onde recomeça a aplicação da carga de tração até o ponto A dando continuidade ao processo cíclico. Esse comportamento da curva do gráfico é chamado laço/ciclo de histerese, a Figura 5 esboça o ciclo completo [10].

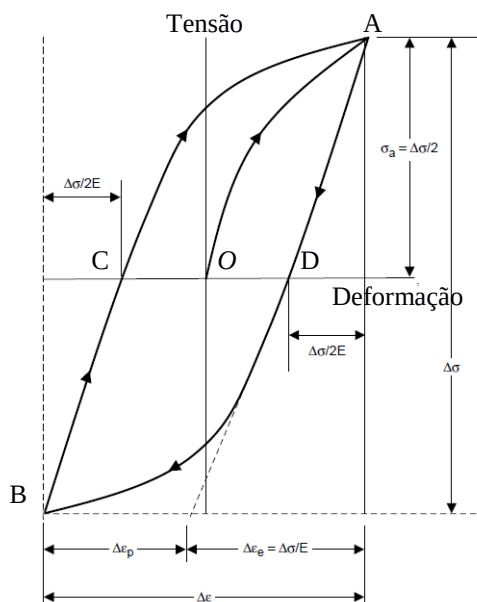


Figura 5. Laço de histerese. (CAMPBELL, 2008)

A deformação total inclui as parcelas elástica e plástica, portanto, pela Equação 1:

$$\Delta \varepsilon = \Delta \varepsilon_e + \Delta \varepsilon_p \quad (\text{Eq. 1})$$

Ao ser deformado ciclicamente, o material pode ter seu limite de escoamento reduzido, ou pode encruar enquanto as deformações são aplicadas. Normalmente, os materiais trabalhados a frio amolecem e os materiais recozidos encruam. Hao et al. (2014), por exemplo, observa um amaciamento cíclico, ou seja, uma diminuição gradativa do limite de escoamento em estudos da microestrutura de ligas de alumínio em fadiga de baixo ciclo. Existem igualmente, trabalhos onde é observado o caso contrário, ou seja, o endurecimento cíclico da peça em fadiga de baixo ciclo, Yang et al. (2018), observa esse fenômeno em aços com baixo limite de escoamento e Falcão (2002), no aço inoxidável a altas temperaturas. Materiais intermediários (pouco trabalhados a frio) encruam e posteriormente amolecem, a depender do número de ciclos e da solicitação a que estão sujeitos. Mantendo-se $\Delta \varepsilon$ constante, para materiais recozidos $\Delta \sigma$ aumenta a cada ciclo e diminui para materiais trabalhados a frio, como demonstra a Figura 6. Esses fatores influenciam diretamente o aspecto do laço de histerese $\sigma - \varepsilon$ em fadiga de baixo ciclo [1,2].

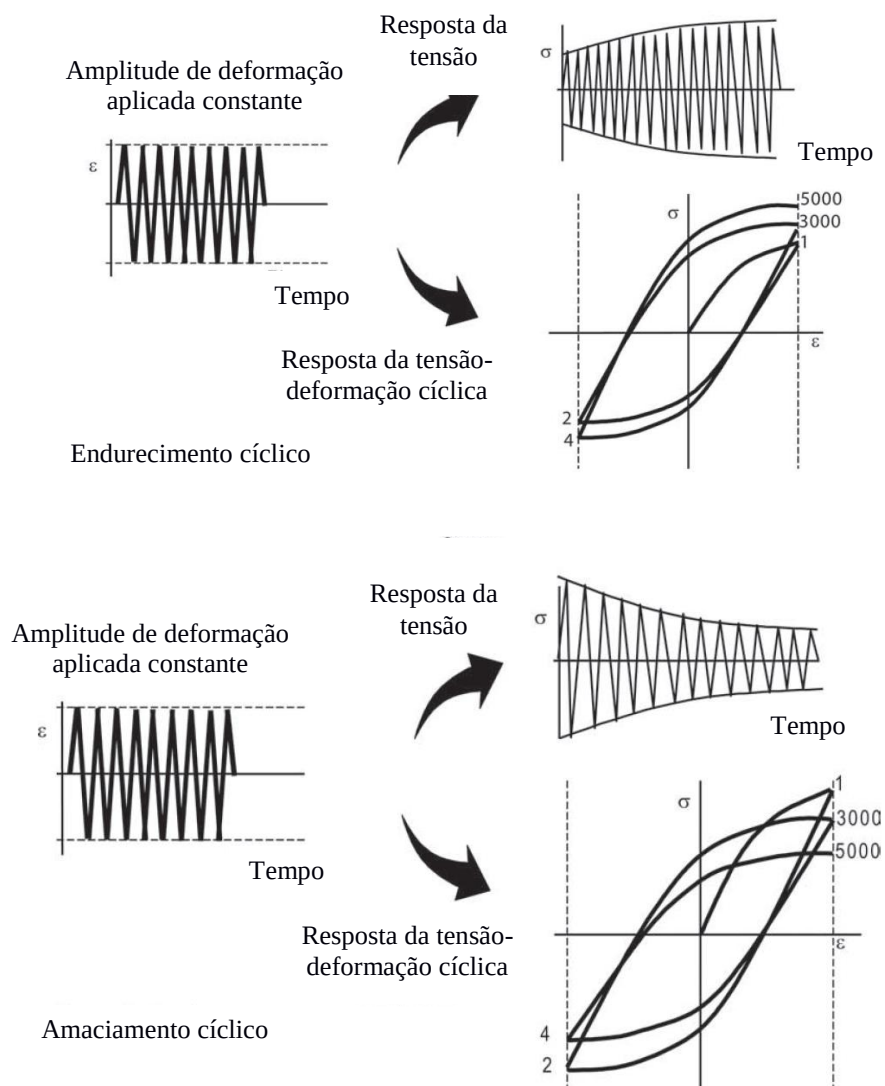


Figura 6. Comportamento cíclico do material em fadiga de baixo ciclo. (CAMPBELL, 2008)

Para fadiga de baixo ciclo a maneira de representar o resultado dos testes é por meio do gráfico $\Delta\epsilon_p$ versus N , expresso em coordenadas logarítmicas, diferentemente da fadiga a um alto número de ciclos que faz uso do gráfico S-N. Para o regime de baixo ciclo os resultados formam uma linha reta como está indicado na Figura 7 [1]. Claramente observa-se que quanto maior a deformação cíclica imposta, menor será a vida da peça.

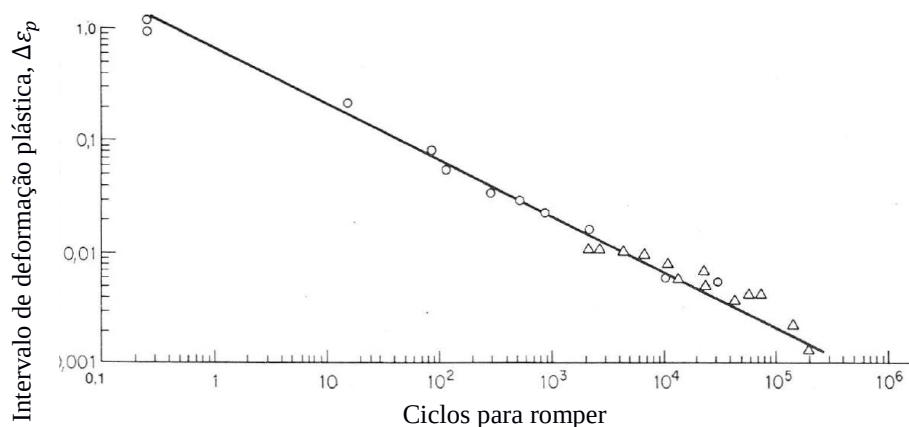


Figura 7. Gráfico $\epsilon - N$. (DIETER, 1981 apud COFFIN, 1963)

Em seu trabalho, Campbell (2008), aborda a lei de Coffin-Manson (Equação 2), que descreve a reta do gráfico bilogarítmico $\Delta\varepsilon_p - N$:

$$\frac{\Delta\varepsilon_p}{2} = \varepsilon'_f (2N)^c \quad (\text{Eq. 2})$$

$\frac{\Delta\varepsilon_p}{2}$: Amplitude de deformação plástica

ε'_f : Coeficiente de ductilidade de fadiga

$2N$: Número de reversões até a falha

c : Expoente da ductilidade da fadiga. Este valor geralmente está entre - 0,7 e - 0,5

A ductilidade de fadiga é determinada pela interceptação de deformação e $2N = 1$. O coeficiente de ductilidade de fadiga ε'_f é, para muitos metais, semelhante ao valor da tensão real de ruptura. Um ciclo corresponde a duas reversões.

Para descrever a fadiga de alto ciclo é utilizada a equação de Basquin, (Equação 3):

$$\sigma_a = \frac{\Delta\sigma_e}{2} E = \sigma'_f (2N)^b \quad (\text{Eq. 3})$$

σ_a : Amplitude de tensão alternada

$\frac{\Delta\sigma_e}{2}$: Amplitude de deformação elástica

E : Módulo de elasticidade

σ'_f : Coeficiente de força de fadiga, aproximadamente o valor da tensão de extrusão verdadeira.

$2N$: Número de reversões até a falha

b : Expoente da força de fadiga. Este valor geralmente está entre - 0,12 e - 0,05.

Em posse da descrição elástica e plástica da fadiga, para estimar-se a vida em fadiga soma-se as equações de Basquin e Coffin-Manson. Portanto, as Equações 4, e 5.

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\Delta\sigma_e}{2} + \frac{\Delta\varepsilon_p}{2} \quad (\text{Eq. 4})$$

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N)^b + \varepsilon'_f (2N)^c \quad (\text{Eq. 5})$$

2.4. Ensaios para o Estudo da Fadiga de Baixo

Os ensaios de fadiga são mais complexos que os ensaios de tração em virtude do maior número de variáveis envolvidas. A American Society for Testing and Materials - ASTM International - estabelece através de normas a maneira de como se devem conduzir os ensaios de fadiga, entre elas a ASTM E206 para teste e tratamento estatístico dos resultados, ASTM 739 para análise estatística das curvas $\sigma - N$ e $\varepsilon - N$ [13].

Porém, para ensaios de fadiga de baixo ciclo, tem ênfase a ASTM E606 intitulada: “Método Padrão para Ensaio de Fadiga Controlado por Deformação”. O método de ensaio da norma abrange a determinação das propriedades de fadiga dos materiais por meio de ensaios de corpos de prova, sendo limitada a estes, ou seja, para este método não se deve usar peças, elementos ou produtos de consumo nos ensaios. Deve admitir-se um único sistema de unidades para realização de um determinado ensaio, para evitar erros. A norma norteia os ensaios de fadiga de baixo ciclo, pois se restringe a ensaios de fadiga controlados por deformação [14].

Atualmente, a maioria dos ensaios de fadiga é realizada em máquinas servo-hidráulicas. Obtêm-se nos ensaios de fadiga de baixo ciclo as curvas dos gráficos ε_a versus N ou $\Delta\varepsilon$ versus N . A deformação nesse tipo de ensaio deve ser mantida constante, assim como já foi apresentado na Figura 6. Extensômetros devem ser

usados para fazer esta medição, sendo que, para deformações acima de 0,02 é obrigatório o uso de corpos de prova de seção variável e um extensômetro diametral [13].

Além das normas, existem trabalhos direcionados a propor novos modelos de ensaio para fadiga de baixo ciclo. Como Xiang et al. (2017), que propuseram um modelo de predição de vida em Fadiga de Ultrabaixo Ciclo, ULCF (*Ultra-low cycle fatigue*), em ligas de alumínio que utilizasse apenas resultados dos testes monotônicos. Seus resultados mostraram que tal método é aplicável com o auxílio de uma análise numérica apropriada.

Referente aos casos onde a fadiga de baixo ciclo é originada de tensões advindas de variações térmicas cíclicas Falcão (2002), em estudos para o aço inoxidável AISI 420 utiliza duas técnicas: Fadiga Térmica e Fadiga Termomecânica. A técnica para fadiga térmica é fundamentada nas normas ASTM E406-82 (1991) e ASTM E606-80 (1991). Nesse procedimento, o corpo de prova, diferentemente daquele indicado pela norma ASTM E606, deve ser semelhante a peça a qual deseja-se estudar o comportamento em fadiga. O corpo é então submetido a ciclos alternados de temperatura. A vantagem dessa técnica é apresentar a possibilidade de implementação da peça logo após os resultados do ensaio, pois o corpo de prova tem geometria semelhante a do produto. A desvantagem está no fato da dificuldade de medições em virtude da complexidade geométrica. Na fadiga termomecânica são superpostos, ciclos de deformação e temperatura em função do tempo de forma independente e simultânea. Para este tipo de ensaio a norma ASTM E2368 encarrega-se de direcionar.

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A fadiga é o mecanismo de falha com maior ocorrência, sendo assim, prever a vida de um elemento sujeito a cargas cíclicas é imprescindível. A fadiga de baixo ciclo demonstra exigir ainda mais cautela em virtude do número reduzido de ciclos até a ruptura e dos altos níveis de tensão impostos ao material, que ultrapassam o regime elástico. Portanto, organizar em uma pesquisa as principais literaturas acerca do tema é de extrema importância, já que a mesma se mostra não ser tão explorada como a fadiga de alto ciclo, especialmente na literatura brasileira.

A fadiga de baixo ciclo consiste em um mecanismo de falha advindo de tensões cíclicas que tem como principal característica o fato das solicitações ultrapassarem o limite de escoamento do material. A vida estimada para um elemento sob fadiga de baixo ciclo é cerca de 10^5 ciclos de tensão. A falha se desenvolve em três estágios, nucleação, propagação da trinca e ruptura final, sendo que, na maior parte da vida está ocorrendo o processo de propagação da trinca. O material, a depender de suas propriedades, pode encruar ou diminuir o limite de escoamento ciclicamente quando sujeito a esse tipo de carregamento. A fadiga de baixo ciclo descreve um laço de histerese no gráfico tensão versus deformação e em vez do diagrama $S - N$, é utilizado o gráfico bilogarítmico $\varepsilon - N$, pois a deformação é o parâmetro principal. As equações de Basquin e Coffin-Manson são usadas para estimar a vida em fadiga de baixo ciclo, sendo que, uma é aplicada a região elástica e outra a região plástica. As normas ASTM orientam os ensaios de fadiga, além de existir variadas publicações de trabalhos acadêmicos que se propõem a testar novos métodos de ensaio.

Ao longo da pesquisa foi descoberto que além da fadiga de baixo ciclo, existe a fadiga de ultrabaixo ciclo, desta forma, sugere-se para trabalhos futuros uma pesquisa objetivando propor um modelo de ensaio para fadiga de ultrabaixo ciclo.

4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] DIETER, G. E. Metalurgia Mecânica. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Koogan S/A, 1981.
- [2] CONFERÊNCIA SOBRE ANÁLISE, PROJETO E CONSTRUÇÃO DE ESTRUTURAS DE CENTRAIS NUCLEARES. 1978, Porto Alegre. Anais, Porto Alegre, 1978. 837 p.
- [3] NORTON, R. L. Projeto de máquinas: uma abordagem integrada. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.
- [4] CALLISTER, W. D. Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução, 8. ed. Rio de Janeiro: LTC 2012.
- [5] FIGUEIREDO, A. M. G. Caracterização da fadiga mecânica de baixo ciclo em ligas superelásticas de NITI: 2006. 210p. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- [6] FALCÃO C. A. de J. Estudo do comportamento da fadiga de baixo ciclo em altas temperaturas do aço inoxidável AISI 420: 2002. 121p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos/Instituto de Física de São Carlos/Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- [7] WATANABE, Kazuki et al. Low-cycle fatigue testing and thermal fatigue life prediction of electroplated copper thin film for through hole via. *Microelectronics Reliability*, [s.l.], v. 82, p.20-27, mar. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.microrel.2017.12.045>.
- [8] MATTUELLA E. P. Comportamento à fadiga de baixo número de ciclos do aço 4340 para diferentes temperaturas de revenido: 1983. 82p. Dissertação (Mestrado) – Programa de pós graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [9] GROSSKREUTZ, J. C.. Strengthening and Fracture in Fatigue: Approaches for Achieving High Fatigue Strength. *Metallurgical Transactions*, S.I., v. 3, p.1255-1269, maio 1972.
- [10] CAMPBELL, F. C. Elements of Metallurgy and Engineering Alloys. Ohio: ASM International, 2008.

-
- [11] HAO, Hong; YE, Duiyi; CHEN, Chuanyong. Strain ratio effects on low-cycle fatigue behavior and deformation microstructure of 2124-T851 aluminum alloy. *Materials Science And Engineering: A*, [s.l.], v. 605, p.151-159, maio 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2014.03.040>.
- [12] YANG, Lu et al. Low cycle fatigue property and fracture behavior of low yield point steels. *Construction And Building Materials*, [s.l.], v. 165, p.688-696, mar. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.075>.
- [13] ROSA, E. Análise de resistência mecânica: mecânica da fratura e fadiga. Florianópolis: 2002. (Apostila)
- [14] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. E606: Standard Test Method for Strain-Controlled Fatigue Testing. West Conshohocken: Astm International, 2012.
- [15] HAO, Hong; YE, Duiyi; CHEN, Chuanyong. Strain ratio effects on low-cycle fatigue behavior and deformation microstructure of 2124-T851 aluminum alloy. *Materials Science And Engineering: A*, [s.l.], v. 605, p.151-159, maio 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2014.03.040>.