



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
CENTRO DE ENGENHARIA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

FRANCISCO RODRIGUES DA SILVA NETO

**AVALIAÇÕES DE EQUAÇÕES APLICADAS A ANÁLISE DE FADIGA TÉRMICA
DE BAIXO CICLO PARA O AÇO AISI H13**

MOSSORÓ

2019

FRANCISCO RODRIGUES DA SILVA NETO

**AVALIAÇÕES DE EQUAÇÕES APLICADAS A ANÁLISE DE FADIGA TÉRMICA
DE BAIXO CICLO PARA O AÇO AISI H13**

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Fabrício José Nóbrega Cavalcante.

MOSSORÓ

2019

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

S469a Silva Neto, Francisco Rodrigues da.
Avaliações de equações aplicadas a análise de
fadiga térmica de baixo ciclo para o aço AISI H13
/ Francisco Rodrigues da Silva Neto. - 2019.
39 f. : il.

Orientador: Fabrício José Nóbrega Cavalcante.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia
Mecânica, 2019.

1. Fadiga. 2. Temperatura. 3. Trincas. 4.
Contração. 5. Expansão. I. Cavalcante, Fabrício
José Nóbrega, orient. II. Título.

FRANCISCO RODRIGUES DA SILVA NETO

**AVALIAÇÕES DE EQUAÇÕES APLICADAS A ANÁLISE DE FADIGA TÉRMICA
DE BAIXO CICLO PARA O AÇO AISI H13**

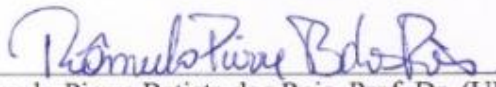
Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Defendida em: 13 / 08 / 2019.

BANCA EXAMINADORA



Fabrício José Nóbrega Cavalcante, Prof. Dr. (UFERSA)
Presidente



Romulo Pierre Batista dos Reis, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador



Zoroastro Torres Vilar, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus por ter me mantido na trilha certa durante este projeto de pesquisa com saúde e forças para chegar até o final.

Agradeço ao meu orientador Fabrício José Nóbrega Cavalcante por aceitar conduzir o meu trabalho de pesquisa.

A todos os meus professores do curso de Engenharia Mecânica da UFERSA pela excelência da qualidade técnica de cada um.

Aos meus pais Terezinha Nadja Damasceno Pereira e Josué Damasceno Pereira que sempre estiveram ao meu lado me apoiando ao longo de toda a minha trajetória.

À minha esposa Paloma Rodrigues pela compreensão, apoio e paciência demonstrada durante todo o curso.

RESUMO

O presente trabalho tem como tema avaliar as equações aplicadas a análise de fadiga térmica de baixo ciclo para o aço AISI H13. Fissuras de fadiga térmica são o resultado de repetidos ciclos de aquecimento e resfriamento, produzindo expansão e contração alternativas. Quando o metal esfria, ele se contrai e se for impedido de se mover livremente irá causar tensões residuais de tração. Se esta expansão e contração alternativa continua, rachaduras de fadiga se formarão e se propagarão cada vez que o metal é resfriado. Para o desenvolvimento do trabalho, a Equação de Coffin e Manson para o tempo de vida por fadiga foi utilizada e como base para avaliação do modelo foi tomado os estudos sobre fadiga térmica dos autores Maim e Norstron (1979), onde desenvolveram um modelo de fadiga térmica relacionada aos aços ferramenta em aplicações de trabalho à quente, e aos estudos de LU Y et al (2019); onde foi realizado um novo modelo de fadiga térmica induzido em matrizes de aço H13 para fundição sob pressão. Os resultados foram inseridos em softwares comerciais como Matlab® e Microsoft Excel® e posteriormente plotado gráficos para análises e devidas comparações de resultados. O primeiro estudo não apresentou resultado satisfatório segundo a engenharia, pois o erro experimental variou entre 1 e 26%, já o segundo modelo, com auxílio de softwares computacionais, obteve resultados mais condizentes com a realidade, pois o erro calculado de aproximadamente 3%.

Palavras-chave: Fadiga, temperatura, trincas, contração, expansão.

ABSTRACT

The present work aims to evaluate the equations applied to the low cycle thermal fatigue analysis for AISI H13 steel. Thermal fatigue cracks are the result of repeated heating and cooling cycles, producing alternative expansion and contraction. When the metal cools, it contracts and if prevented from moving freely will cause residual tensile stresses. If this alternative expansion and contraction continues, fatigue cracks will form and propagate each time the metal is cooled. For the development of the work, the Coffin and Manson Equation for fatigue life time was used and as basis for model evaluation was taken the studies on thermal fatigue of the authors Maim and Norstron, where they developed a model of thermal fatigue related to fatigue. Tool steels in hot work applications, and the studies by LU Y et al (2019); where a new model of thermal fatigue induced in H13 steel die for pressure die casting was performed. The results were entered into commercial software such as Matlab® and Microsoft Excel® and subsequently plotted graphs for analysis and due comparisons of results. The first study did not present satisfactory results according to the engineering, because the experimental error varied between 1 and 26%, while the second model, with the aid of computer software, obtained results more consistent with reality, since the calculated error of approximately 3%.

Keywords: Fatigue, temperature, cracks, contraction, expansion.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Falha por fadiga de um parafuso em razão de flexão unidirecional repetida.	13
Figura 2 - Tensões variantes no tempo	14
Figura 3 - Estrias de fadiga na superfície da ruptura de uma liga de alumínio. O espaçamento entre as estrias corresponde ao modelo de carregamento cíclico.	15
Figura 4 - Rachadura por fadiga térmica em válvula de escape de motor.....	16
Figura 5 - Carregamento cíclico. (a) Vibração acústica de amplitude muito baixa. (b) Fadiga de alto ciclo: ciclagem bem abaixo do escoamento geral, σ_y . (c) Fadiga de baixo ciclo: ciclagem acima do escoamento geral (porém, abaixo do limite de resistência à tração).	17
Figura 6 - Malha de trincas térmicas observadas em uma matriz de forjamento a quente.....	18
Figura 7 - Comportamento de estresse idealizado sob restrição total.	19
Figura 8 - Tensões e deformações causadas pelo ciclo térmico.	21
Figura 9 - Gráfico de fluência.....	26
Figura 10 - Comparação entre resultados para o primeiro caso.	31
Figura 11 - Resultados experimentais para o segundo caso.	33
Figura 12 - Comparação entre parte experimental e simulada.	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química do aço ferramenta AISI H13.....	28
Tabela 2 - Coeficiente de expansão térmica.	28
Tabela 3 - Módulo de elasticidade.....	29
Tabela 4 - Propriedades mecânicas.	29
Tabela 5 - Propriedade do material à $T_1 = 25^\circ$	30
Tabela 6 - Variáveis calculadas do material.	30
Tabela 7 - Valores encontrados para as condições de temperatura.	30
Tabela 8 - Parâmetros e valores obtidos a partir das amostras experimentais.	32
Tabela 9 - Parâmetros e valores obtidos a partir das amostras simuladas.	32
Tabela 10 - Valores ajustados na equação 14.....	32
Tabela 11 - Comparação entre parte experimental e simulada.....	34

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	OBJETIVOS	11
2.1	Objetivos Gerais	11
2.2	Objetivos específicos	11
3	REVISÃO DA LITERATURA	12
3.1	Introdução à Fadiga	12
3.2	Mecanismo da falha por fadiga	13
3.2.1	Estágio 1: Início da trinca	14
3.2.2	Estágio 2: Propagação da trinca	15
3.2.3	Estágio 3: Ruptura	15
3.3	Fadiga Térmica	16
3.3.1	Introdução à fadiga térmica	16
3.3.2	Análise de tensão/deformação do ciclismo térmico	19
3.3.3	Fadiga térmica de baixo ciclo	22
3.3.4	Fadiga térmica, fadiga isotérmica, fadiga termomecânica e fluência.....	25
4	METODOLOGIA.....	27
4.1	Introdução.....	27
4.2	Material.....	27
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	30
5.1	Simulações para o primeiro caso estudado (Maim e Norstrom)	30
5.2	Simulações para o segundo caso estudado (LU Y. et al.)	31
5.3	Discussão a respeito dos trabalhos estudados e validação de modelo	35
6	CONCLUSÃO	36
	REFERÊNCIAS	37

1 INTRODUÇÃO

Fadiga pode ser definido como o fenômeno de ruptura progressiva de materiais sujeitos a ciclos repetidos de tensão ou deformação. Particularmente, a fadiga térmica possui o mesmo conceito, porém a diferença é que ao invés dos esforços mecânicos sofridos, os materiais sofrem tensões a partir de ciclos térmicos. Logo, é necessária uma avaliação das equações para se calcular o número de ciclos necessário para iniciar a primeira trinca no material.

Para Alvarenga (2006), diversos tipos de materiais e equipamentos estão sujeitos a esse tipo de situação, tais como: usinas termoeletricas e term nucleares, cilindros de laminação, turbinas a gás, motores diesel, turbinas de aeronaves e rodas ferroviárias que são submetidas à ação de sapatas de freio, que geram gradientes de temperatura e, conseqüentemente, tensões internas. A fadiga térmica provoca tensões e deformações em componentes metálicos por causa de flutuações cíclicas de temperatura, causando danos semelhantes a choques térmicos repetitivos. E esse é um dos mecanismos de envelhecimento que gradualmente reduz a vida útil dos componentes, modificando suas propriedades e levando a abertura de trincas.

Segundo LU Y. et al (2019), as condições cíclicas de aquecimento e resfriamento produzem grandes gradientes térmicos nos materiais e, assim, colocam a ferramenta em compressão durante o aquecimento e a tração durante o resfriamento. Tais estados de compressão-tração alternados levarão à deformação cíclica no material, onde as deformações elásticas e plásticas são produzidas dependendo das condições de carga térmica. À medida que o número de ciclos aumenta, as deformações cíclicas acabarão por iniciar fissuras na estrutura, o que é considerado como falha por fadiga térmica.

A motivação para esse estudo foi o fato de a falha por fadiga ser responsável por um custo significativo para a economia. Esses custos podem ser provenientes de diversos setores, tanto para prejuízos devido as falhas, como para a prevenção. O custo pode envolver também vidas humanas e é por isso que esse assunto deve ser bastante aprofundado e estudado, para que a prevenção desse tipo de falha se torne cada vez mais recorrentes nas empresas.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivos Gerais

Avaliar as equações relacionadas a análise de fadiga térmica de baixo ciclo para o aço AISI H13.

2.2 Objetivos específicos

- Análise da tensão/deformação do ciclismo térmico;
- Inserir as equações para a fadiga térmica de baixo ciclo;
- Desenvolver a relação número de ciclos pela temperatura para os dois casos estudados;
- Discutir a avaliação das equações a partir de métodos de fadiga térmica, fazendo uma comparação entre literaturas.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Introdução à Fadiga

Antes de expor a análise do crescimento de trinca em um material que sofre por oscilação térmica, é preciso definir o que é fadiga. Segundo Norton (2013), o termo “fadiga” foi aplicado pela primeira vez por Poncelet em 1839, porém foi observado por volta de 1800, quando os eixos de um vagão ferroviário começaram a falhar após um pequeno período em serviço. Apesar de serem feitos de aço dúctil, eles exibiam características de fraturas frágeis e repentinas.

Para Norton (2013), o mecanismo de falha ainda não compreendido e a aparência de uma fratura frágil na superfície de um material dúctil geraram especulações de que o material, de alguma maneira, apresentou “cansaço” e fragilizou-se devido às oscilações da carga aplicada. Wohler, mais tarde, mostrou que cada metade dos eixos quebrados ainda continuava tão resistente e dúctil, em ensaios de tração, quanto o material original. De qualquer maneira, o termo falha por fadiga permaneceu e ainda é usado para descrever qualquer falha devido a cargas variantes no tempo.

Segundo a ASTM, fadiga é o processo progressivo e localizado de modificações estruturais permanentes ocorridas em um material submetido a condições que produzam tensões e deformações cíclicas que pode culminar em trincas ou fratura após um certo número de ciclos. Essa fratura, ocorrida após condições repetidas e flutuantes, salienta que esse fenômeno possui um valor máximo inferior a resistência a tração do material, ocasionando mudanças submicroscópicas na estrutura cristalina do metal sob a ação de aplicações de cargas repetitivas de nível relativamente baixo. Essas pequenas mudanças na estrutura podem progredir gradualmente para formar pequenas rachaduras que podem crescer e se tornar grandes sob cargas cíclica contínua e isso pode levar à fratura da peça ou estrutura.

Uma vez iniciada, a fratura por fadiga pode se propagar por altas tensões e ciclos baixos ou por baixos esforços e ciclos altos. A ruptura final pode ter características dos modos de fratura frágil e / ou dúctil, dependendo do metal envolvido e as circunstâncias de estresse e meio ambiente.

Para Budynas e Nisbeth (2016), as falhas por fadiga constituem um custo significativo para a economia. Esses custos podem ser provenientes da ocorrência e da prevenção da falha por fadiga em veículos terrestres, veículos ferroviários, aviões de todos os tipos, pontes,

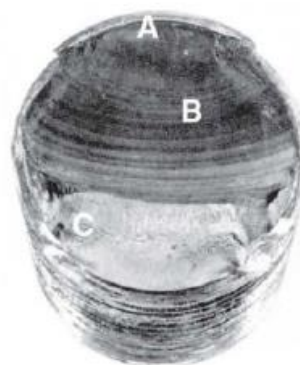
guindastes, equipamentos industriais, estruturas marítimas de poços de petróleo e uma ampla variedade de mecanismos e equipamentos incluindo itens de uso doméstico, brinquedos e equipamentos esportivos. O custo pode envolver também vidas humanas, como é o caso do primeiro avião a jato comercial de passageiros, o inglês *comet*, que se despedaçou duas vezes em 1954 devido a falhas por fadiga em sua fuselagem, consequências dos ciclos de pressurização/despressurização da cabine.

Segundo Budynas e Nisbeth (2016), a falha por fadiga não dá aviso! Ela é súbita e total e, portanto, perigosa. É relativamente simples prever uma falha estática, porque nosso conhecimento é amplo. Fadiga é um fenômeno muito mais complicado, apenas parcialmente entendido, e o engenheiro, para estar apto, deve adquirir o máximo possível de conhecimento sobre o assunto. Com isso, muito trabalho vem sendo feito nos últimos 150 anos para determinar o mecanismo físico da falha por fadiga.

3.2 Mecanismo da falha por fadiga

As falhas por fadiga sempre têm início com uma pequena trinca, que pode estar presente no material desde a sua manufatura ou desenvolver-se ao longo do tempo devido às deformações cíclicas ao redor das concentrações de tensões. As trincas de fadiga geralmente têm início em um entalhe ou em outro elemento de concentração de tensão. Existem três estágios na falha por fadiga: *início da trinca*, *propagação da trinca* e *ruptura repentina devido ao crescimento instável da trinca*. O primeiro estágio pode ter uma pequena duração; o segundo estágio envolve o maior tempo da vida da peça; e o terceiro e último estágio é instantâneo, como mostra a Figura 1.

Figura 1 - Falha por fadiga de um parafuso em razão de flexão unidirecional repetida.



Fonte: Budynas e Nisbeth (2016).

3.2.1 Estágio 1: Início da trinca

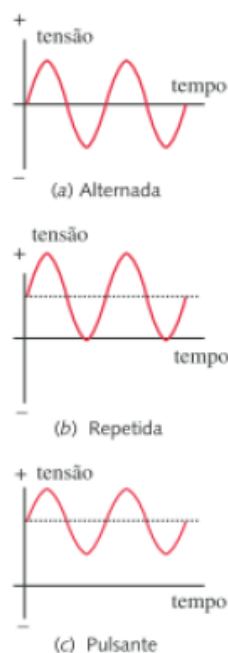
A iniciação é o estágio mais complexo da fadiga e é o mais rigorosamente estudado pelos pesquisadores. Obviamente, se esse estágio puder ser evitado, não haverá fratura por fadiga.

Suponha um material metálico dúctil e, sendo manufaturado, não apresenta trincas, mas possui partículas, inclusões etc., que são comuns em materiais de engenharia. Suponha, em seguida, que existam algumas regiões de concentração geométrica de tensão (entalhe) em locais com tensões variantes no tempo significativas que contenham uma componente positiva (tração), como mostra a Figura 2. Conforme as tensões no entalhe oscilam, pode ocorrer escoamento local devido à concentração de tensão, mesmo que a tensão nominal na seção esteja bem abaixo do valor da tensão de escoamento do material.

À medida que os ciclos de tensão ocorrem, bandas de deslizamento adicionais aparecem e agrupam-se em trincas microscópicas.

Em outras palavras, podemos dizer que o *estágio 1* é a iniciação de uma ou mais micro trincas, devido à deformação plástica cíclica seguida de propagação cristalográfica que se estende por dois a cinco grãos em relação à origem. Trincas do estágio 1 normalmente não são discerníveis a olho nu.

Figura 2 - Tensões variantes no tempo



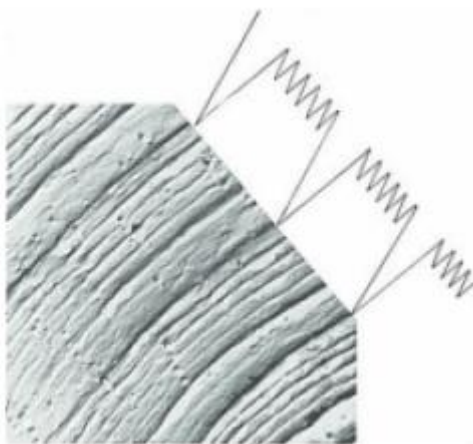
Fonte: Norton (2013).

3.2.2 Estágio 2: Propagação da trinca

Segundo Norton (2013), uma vez que uma trinca microscópica se estabelece (ou está presente desde o início), os mecanismos da mecânica da fratura, entram em funcionamento. A trinca mais severa (pontiaguda) cria concentração de tensões maiores que a proporcionada pelo entalhe original. Desenvolve-se, assim, uma zona plástica na ponta da trinca, cada vez que uma tensão de tração a alonga, abrandando-se as tensões em suas pontas e reduzindo a concentração de tensão efetiva. A trinca cresce um pouco.

O crescimento da trinca se deve a tensões de tração e a trinca propaga-se ao longo de planos normais aos de tensão máxima de tração. A taxa de crescimento ou propagação da trinca é muito pequena, da ordem de 10^{-8} a 10^{-4} in por ciclo, mas após um grande número de ciclos torna-se significativa. Se a superfície de ruptura for vista bastante ampliada, as estrias, devido a cada ciclo de tensão, podem ser vistas conforme ilustra a Figura 3, que mostra a superfície de falha de um corpo de prova de alumínio, com uma ampliação de 12000x, juntamente com a representação do modelo de tensão cíclica atuante na peça que falhou.

Figura 3 - Estrias de fadiga na superfície da ruptura de uma liga de alumínio. O espaçamento entre as estrias corresponde ao modelo de carregamento cíclico.



Fonte: Norton (2013).

3.2.3 Estágio 3: Ruptura

A trinca continuará a crescer enquanto tensões de tração cíclicas e/ou fatores de corrosão de severidade suficiente estiverem presentes. Em um certo ponto, o tamanho da

trinca torna-se grande o bastante, quando ocorre de maneira instantânea, uma falha repentina no próximo ciclo de tensão de tração.

3.3 Fadiga Térmica

3.3.1 Introdução à fadiga térmica

Segundo Wulpi (1999), a fadiga pode ser causada por estresses mecânicos cíclicos ou por estresse térmico. Fissuras de fadiga térmica são o resultado de repetidos ciclos de aquecimento e resfriamento, produzindo expansão e contração alternativas. Quando o metal esfria, ele se contrai, causando tensões residuais de tração se for impedido de se mover livremente. Se esta expansão alternativa e contração continua, rachaduras de fadiga se formarão e se propagarão cada vez que o metal é resfriado, como na válvula de escape do motor da Figura 4.

Figura 4 - Rachadura por fadiga térmica em válvula de escape de motor.

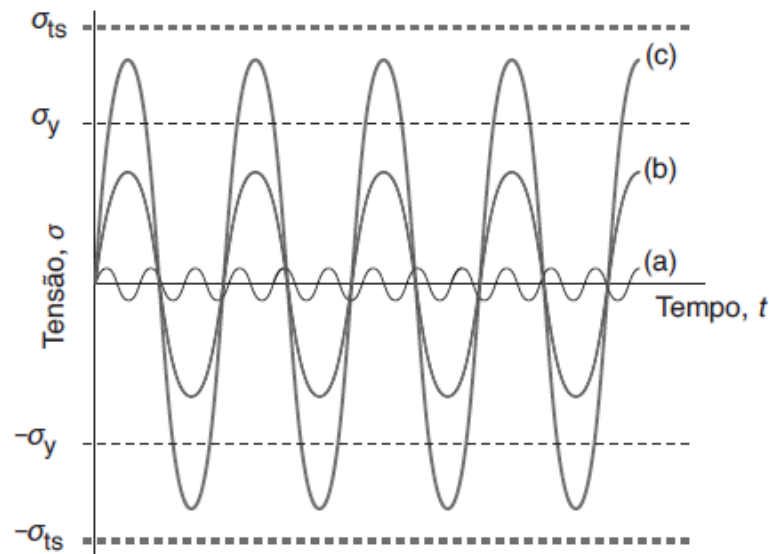


Fonte: Wulpi (1999).

Quando a ciclagem térmica ocasiona tensões acima do limite de escoamento, diz-se que a fadiga é de baixo ciclo, onde para um alto nível de tensão e um baixo número de ciclos, a deformação plástica cíclica é maior do que a deformação elástica. Assim, no campo da fadiga de baixo ciclo, pode-se considerar duas categorias: a térmica, se a temperatura não é constante com o tempo e a isotérmica, se a temperatura é constante ao longo do tempo. A

Figura 5 ilustra três carregamentos cíclicos, dentre eles a ciclagem que ultrapassa o escoamento (porém, abaixo do limite de resistência a tração).

Figura 5 - Carregamento cíclico. (a) Vibração acústica de amplitude muito baixa. (b) Fadiga de alto ciclo: ciclagem bem abaixo do escoamento geral, σ_y . (c) Fadiga de baixo ciclo: ciclagem acima do escoamento geral (porém, abaixo do limite de resistência à tração).

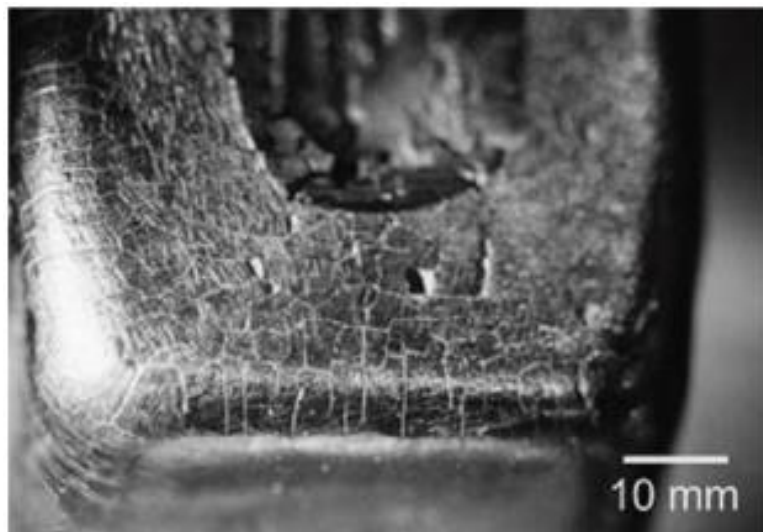


Fonte: Ashby et al. (2012).

Segundo Alvarenga (2006), esse tipo de falha é importante pois diversos setores industriais e equipamentos podem sofrer devido suas ações, como é o caso de usinas termoeletricas e termonucleares, cilindros de laminação, turbinas a gás, motores diesel, turbinas de aeronaves, equipamento gerador de vapor, tubos de reaquecimento, entre outros. A fadiga térmica provoca tensões e deformações em componentes metálicos por causa de flutuações cíclicas de temperatura, causando danos semelhantes a choques térmicos repetitivos. E esse é um dos mecanismos de envelhecimento que gradualmente reduz a vida útil dos componentes, modificando suas propriedades e levando a abertura de trincas.

Para Magalhães et al. (2014), os danos geralmente aparecem na forma de uma ou mais rachaduras na superfície do componente. A menos que remediadas, as rachaduras podem se propagar através do material, levando eventualmente à falha. A Figura 6 apresenta o aspecto típico da malha de trincas térmicas na superfície de uma matriz de aço H13, destinada ao forjamento em prensas excêntricas.

Figura 6 - Malha de trincas térmicas observadas em uma matriz de forjamento a quente.



Fonte: Sjostrom e Bergstrom (2005).

Para Xin (2013), a fadiga térmica pode ocorrer sem cargas mecânicas, porque o indicador ou critério de falha é geralmente tensão ao invés de estresse. Tensões de compressão são produzidas pela carga de temperaturas, ou gerado no material com alto coeficiente de expansão térmica, ao contrário das tensões de tração que são produzidas quando o componente esfria ou gerado no material com baixo coeficiente de expansão térmica. Assim, uma rachadura pode se desenvolver depois de muitos ciclos de aquecimento e arrefecimento.

Esses ciclos podem ser causados por fricção, como nos tambores de freio e placas de embreagem, onde a superfície é frequentemente aquecida e expandida por atrito. Quando o metal resfria, ele contrai sofrendo tensões residuais de tração. Esta condição ocorrendo de forma frequente causa a fadiga térmica, onde algumas rachaduras, chamadas de verificação de calor, começam a surgir. Porém, essa rede de múltiplas fissuras na superfície de atrito pode não ser tão ofensivos, a menos que essas rachaduras progridam, aí sim uma falha poderá ocorrer.

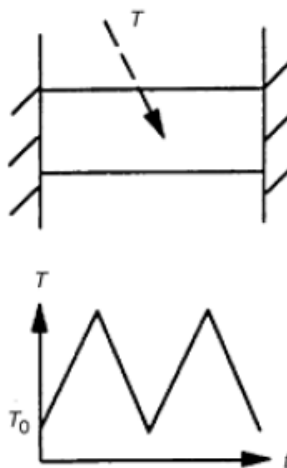
Para alguns autores o tempo de vida útil do material ou resistência à fadiga térmica é função do número de ciclos térmicos necessários para a ocorrência da primeira trinca visível. Porém, em materiais, especialmente se o ciclo de fadiga térmica causa substancial deformação, o instante no qual uma única trinca ocorre torna-se de difícil identificação, assim como a presença de uma rede de finas trincas na superfície pode aparecer quase simultaneamente.

3.3.2 Análise de tensão/deformação do ciclismo térmico

Segundo Main e Norstrom (1979), os processos de fadiga são geralmente controlados por esforço cíclico (plástico e / ou elástico) do material. Qualquer tentativa de descrever a fadiga térmica em termos de processos comuns de fadiga deve, portanto, ser baseada em uma análise das deformações plásticas e elásticas causadas pela ciclagem térmica. Abaixo algumas considerações básicas para que ocorra a fadiga térmica.

- 1) O material deve ser isotrópico, ou seja, suas propriedades mecânicas e térmicas são as mesmas em todas as direções.
- 2) As condições de contorno precisam estar em equilíbrio, tanto no aquecimento, quanto no resfriamento.
- 3) É necessária uma restrição geométrica, ou seja, o material precisa ser fixado em um plano e livre para expandir de forma perpendicular a esse plano. Quando esse material é aquecido ele se expande de forma compressiva e quando resfria sofre tensão de tração, pois se contrai. Abaixo, na Figura 7, uma ilustração de que como seria essa restrição.

Figura 7 - Comportamento de estresse idealizado sob restrição total.



Fonte: Lampman (1996).

Segundo Lampman (1996), expansão e contração térmica livre (irrestrita) não produzem estresse. Quando a expansão térmica de um corpo é restringida por aquecimento uniforme, desenvolvem-se tensões térmicas. Considere o caso em que uma barra é mantida

entre duas paredes rígidas e submetida a ciclos térmicos. O comprimento da barra não pode mudar durante o aquecimento e resfriamento. Seja $T_{inicial}$ a temperatura de referência na qual a barra foi colocada sob restrição total. A expansão térmica se torna proporcional à mudança de temperatura e a deformação térmica pode ser expressa pela Equação 1 descrita abaixo:

$$\varepsilon_{th} = \alpha(\Delta T) = \alpha(T_{final} - T_{inicial}) \quad 1$$

Onde α é o coeficiente de expansão térmica e ΔT é a variação de temperatura entre o estado T_{final} e o estado $T_{inicial}$. Para problemas de fadiga térmica, é principalmente o estresse térmico cíclico que causa o acúmulo de tensões plásticas locais e leva o componente à falha por fadiga. A temperatura flutua pelo corpo causando estresse nos componentes mecânicos do material. Se a tensão térmica ultrapassa o limite elástico, haverá tensão plástica. Como visto anteriormente, uma das condições para que ocorra a fadiga térmica é a restrição geométrica do material em um plano, assim para grandes variações de temperatura, a tensão térmica ativarà a deformação plástica, caso contrário, para pequenas variações de temperatura, a deformação será elástica.

Introduzido esse conceito, pode-se entender que ε_{th} é dividida em deformação térmica elástica ε_e e deformação térmica plástica ε_p , isso ocorre por que para cada direção do corpo, o estresse térmico precisará ser compensado entre esses dois componentes citados. Logo, a seguinte condição, expressa pela Equação 2, é válida:

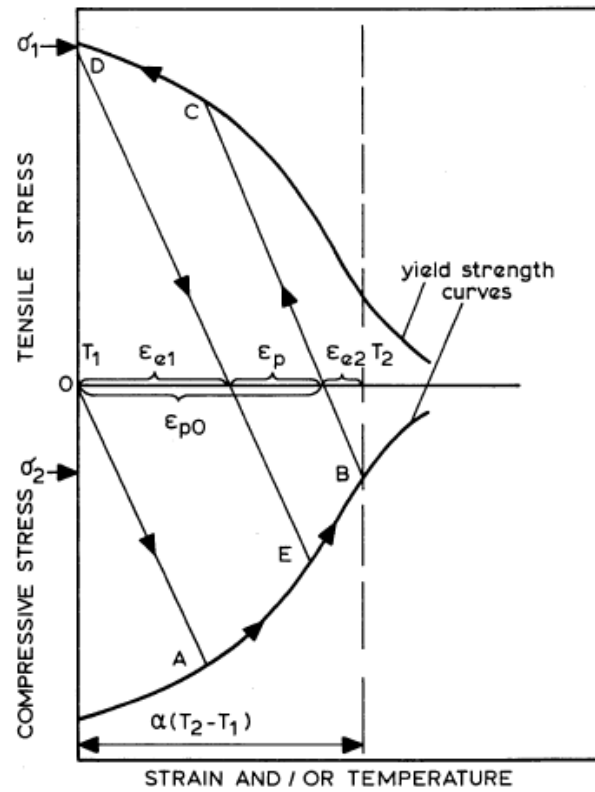
$$\varepsilon_{th} + \varepsilon_p + \varepsilon_e = 0 \quad 2$$

Como as componentes compensam a deformação térmica devido à restrição geométrica e a deformação plástica é mais dominante na vida útil da fadiga de baixo ciclo, a Equação 2 pode ser reescrita da maneira como mostrado na Equação 3:

$$\Delta\varepsilon_p = \Delta\varepsilon_{th} - \Delta\varepsilon_e \quad 3$$

Uma ilustração esquemática das tensões e deformações causadas pelo ciclo térmico é mostrado na Figura 8. Como apresentado, há basicamente duas deformações elásticas envolvidas, ou seja, uma na temperatura mínima outra na temperatura máxima.

Figura 8 - Tensões e deformações causadas pelo ciclo térmico.



Fonte: Maim and Norstrom (1979).

Aplicando a lei de Hooke para materiais restringidos geometricamente, as duas deformações elásticas são obtidas. Como observa-se nas Equações 4 e 5:

$$\varepsilon_{e1} = \frac{(1-\nu_1)}{E_1} \sigma_1 \quad 4$$

$$\varepsilon_{e2} = \frac{(1-\nu_2)}{E_2} \sigma_2 \quad 5$$

Onde σ é a força/tensão de rendimento do material, E é o módulo de elasticidade e ν é o coeficiente de Poisson. Os índices 1 e 2 são para as respectivas temperaturas.

Com essas informações e tomando por base a Figura 8, é possível descrever o processo de tensão/deformação de acordo com as oscilações da temperatura e assim obter a componente plástica que resta.

No ponto T_1 , o material está livre de qualquer estresse, pois se encontra em uma condição livre de tensão. À medida que a temperatura aumenta e alcança valores altos em T_2 , a tensão compressiva começa a aumentar, descrevendo o caminho $0 \rightarrow A \rightarrow E \rightarrow B$. Ou seja, em A a tensão induzida termicamente cruza com a força de rendimento dependente da temperatura e depois segue a curva até o ponto B . Assim, a deformação plástica do primeiro aquecimento terá a forma exposta pela Equação 6:

$$\varepsilon_{p0} = \alpha(T_2 - T_1) - \frac{(1 - \nu_2)}{E_2} \sigma_2 \quad 6$$

Logo após o aquecimento, o resfriamento segue a trajetória descrita pelos pontos $B \rightarrow C \rightarrow D$, como mostrado na Figura 8. Como observado, no aquecimento as tensões foram compressivas, agora com o resfriamento, as tensões serão de tração. Assim, a Equação 7 para a deformação plástica no resfriamento, será:

$$\varepsilon_p = \alpha(T_2 - T_1) - \frac{(1 - \nu_2)}{E_2} \sigma_2 - \frac{(1 - \nu_1)}{E_1} \sigma_1 \quad 7$$

Nos próximos ciclos, a trajetória será descrita pelos pontos $B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow B$, mostrando assim que o primeiro ciclo térmico é fundamentalmente único e pode incluir uma deformação plástica compressiva dada pela Equação 6 e uma deformação plástica de tração dada pela Equação 7. Todos os ciclos subsequentes tornam-se idênticos, incluindo, portanto, uma deformação plástica compressiva e de tração de igual tamanho, ambas dadas pela Equação 7. Assim, como resultado desse ciclo térmico um ciclo de histerese se desenvolverá.

3.3.3 Fadiga térmica de baixo ciclo

Segundo Lampman (1996), a fadiga de baixo ciclo (LCF) pode ser identificada de duas formas: (1) ciclo de alta tensão onde a faixa de deformação inelástica no ciclo excede a faixa de deformação elástica e (2) onde as deformações inelásticas são de magnitude suficiente para serem uniformemente espalhados sobre a microestrutura. O dano por fadiga em altas temperaturas se desenvolve como resultado desta deformação inelástica, onde as

deformações são irreparáveis. Em casos de baixo ciclo, o material sofre dano em um número finito (curto) de ciclos.

Por exemplo, os maiores gradientes e transientes térmicos em motores a jato são desenvolvidos durante a inicialização e o desligamento. Para Lampman (1996), o número total de decolagens e aterrissagens para uma aeronave é inferior a 30000 ciclos durante a vida útil de uma aeronave. No laboratório, as investigações geralmente são realizadas em condições de baixo ciclo para concluir os experimentos em um período de tempo razoável.

Sabendo dessas premissas, é necessário fazer uma análise matemática a respeito da fadiga de baixo ciclo. Como as deformações inelásticas ultrapassam o limite de escoamento do material, a seguinte expressão, mostrada na Equação 8, se torna válida:

$$\varepsilon_p > \varepsilon_e \quad 8$$

Como as equações para ambas as deformações já foram definidas, é possível combinar essa definição com as Equações 4, 5 e 7. Assim, a fadiga térmica de baixo ciclo deve satisfazer a Equação 9:

$$\alpha(T_{final} - T_{inicial}) > 2 \frac{(1 - \nu_1)\sigma_1}{E_1} + 2 \frac{(1 - \nu_2)\sigma_2}{E_2} \quad 9$$

Feita essas análises, é necessário recorrer a uma equação que relacione a vida útil do material N_f e a faixa de deformação plástica já definida anteriormente pela Equação 7. Essa Equação foi definida a partir dos estudos de Coffin-Manson. Logo, pode ser generalizada pela Equação 10:

$$\Delta\varepsilon_p = C_p N_f^c = C_p N_f^{-0,56} \quad 10$$

Onde C_p é uma constante relacionada à propriedade do material que inclui σ_u , E e D em comparação com a equação do método de declives universais modificados, porém C_p informa Watanabe et al. (2018), é o coeficiente de ductilidade a fadiga, podendo ser encontrado em tabelas de literaturas relacionado a engenharia de materiais. O expoente de ductilidade à fadiga c é considerado como $-0,56$ com base no método de declives universais modificados.

Apesar de c variar com a temperatura, pode ser utilizado esse valor como uma quantidade média para a maioria dos materiais em diferentes faixas de temperaturas.

O cálculo para o tempo de vida de um aço ferramenta a partir da variação cíclica de temperatura, foi então expressado a partir de equações básicas da engenharia e da fadiga em geral. Elas permitem calcular a quantidade de ciclos térmicos que são necessários para o surgimento da primeira trinca no material, condição necessária para ser detectado a fadiga. Essas trincas podem se propagar pela superfície do material à medida que as tensões residuais térmicas continuam.

A primeira análise, proporcionou a seguinte Equação 11 que relaciona essas questões comentadas acima.

$$N_f = \left[\frac{C \cdot \varepsilon_{f1}}{\alpha(T_2 - T_1) - \frac{(1 - \nu_1)\sigma_1}{E_1} - \frac{(1 - \nu_2)\sigma_2}{E_2}} \right]^{\frac{1}{n}} \quad 11$$

Onde ε_f é a verdadeira deformação à fratura, n é o expoente de ductilidade já mencionado anteriormente e C o coeficiente de ductilidade a fadiga, também mencionado anteriormente.

A segunda análise, proporcionou uma equação um pouco mais simplificada, porém com valores encontrados apenas em simulações de elementos finitos. Como esse trabalho é uma comparação de análise e resultados, é necessário recolher os dados como foram utilizados na íntegra e a partir deles desenvolver o problema da fadiga térmica. É importante salientar que para efeito de comparação, os valores descritos na Equação 11 também serão utilizados da mesma forma como descritos no problema.

Como na fadiga de baixo ciclo, a deformação plástica é mais dominante, a deformação térmica plástica poderá ser escrita como mostra a Equação 12.

$$\Delta \varepsilon_p = \Delta \varepsilon_{th} - \Delta \varepsilon_e = \alpha(\Delta T) - \alpha(\Delta T_c) \quad 12$$

Onde ΔT_c é definido como uma mudança crítica de temperatura que causa apenas deformação elástica térmica e começa a causar deformação plástica térmica, ou seja, é a variação de temperatura no qual até esse ponto a deformação causada é a elástica a partir daí a deformação será plástica. Detalhe para essa variável, pois ela foi encontrada a partir de

simulação computacional. Então, substituindo a ε_p da Equação 12 na Equação 10, surge a seguinte Equação 13:

$$C_p N_f^{-0,56} = \alpha(\Delta T) - \alpha(\Delta T_c) \quad 13$$

Onde uma relação entre o ciclo de vida N_f e a diferença de temperatura ΔT é estabelecida. A Equação 14 demonstra essa relação:

$$N_f = \left[\frac{\alpha}{C_p} \right]^{-1,786} \cdot (\Delta T - \Delta T_c)^{-1,786} \quad 14$$

Onde $\left[\frac{\alpha}{C_p} \right]^{-1,786}$ é uma constante relacionada as propriedades do material. Assim, foi possível encontrar uma expressão que relacionasse o ciclo de vida por fadiga de um material, com a variação da temperatura.

Esses modelos são definidos como semi quantitativos, pois não retornam um valor exato daquilo que se deseja calcular comparando com o cálculo experimental, por isso nos resultados apresentados será discutido as limitações provenientes do modelo.

3.3.4 Fadiga térmica, fadiga isotérmica, fadiga termomecânica e fluência

Dando continuidade ao estudo dos materiais que sofrem fadiga a partir de altas temperaturas, pode-se citar áreas da engenharia que estão sujeitas a essa situação, tais como, motores de aviões e automóveis, componentes de usinas termoelétricas e nucleares, bem como indústrias químicas, em que as temperaturas ultrapassam 30 a 40% da temperatura absoluta de fusão do material.

O comportamento em fadiga e as previsões de vida são mais complexas em altas temperaturas do que na temperatura ambiente, isso se deve ao fato aos inúmeros processos termicamente ativados e dependentes do tempo, como é o caso, entre outros da fluência.

Segundo Alvarenga (2006), a fluência se caracteriza como uma deformação que progride lentamente com o tempo quando o metal é solicitado por uma carga em temperatura alta, levando eventualmente o material a ruptura. Convencionalmente falando, caracteriza-se

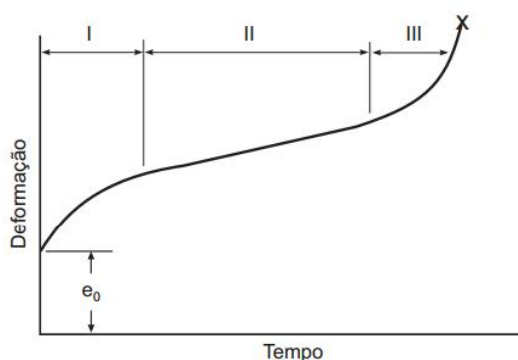
por uma carga constante aplicada. Os componentes típicos atingidos pela interação fluência/fadiga incluem as lâminas de turbina a gás e junções de circuitos elétricos soldadas.

Segundo Spera (1976), a definição de fadiga térmica, pode ser resumida como “a deterioração gradual e eventual trincamento de um material pelo aquecimento alternado ao resfriamento, durante expansão térmica livre ou confinada parcialmente ou completamente”. Juntamente a essa definição, havendo uma variação cíclica de tensão mecânica, o material poderá se sujeitar ao que é chamado de fadiga termomecânica. Segundo Zauter (1994), esta pode ser em fase ou fora de fase, isso depende se a carga mecânica é aplicada quando a temperatura sobe ou quando a temperatura desce. Alvarenga (2006) diz que, quando a temperatura máxima do ciclo de fadiga térmica ocorre no mesmo momento da aplicação da carga máxima de fadiga mecânica, se têm a fadiga termomecânica em fase. Em outro caso, quando a temperatura máxima da fadiga térmica ocorre no momento da aplicação da carga mínima da fadiga mecânica, então se têm a fadiga termomecânica fora de série. Quando não existe a variação cíclica de temperatura, essa permanecendo constante com o tempo, e apenas a de tensão mecânica, tem-se a fadiga isotérmica.

Para Sousa (1974), quando se trata de altas temperaturas, a fluência predomina, visto que a fluência é uma deformação que progride lentamente com o tempo quando um metal é solicitado por uma carga em temperatura alta. A Figura 9 mostra um gráfico tempo x deformação obtido através de um ensaio de fluência.

No estágio inicial, a velocidade de fluência é mais rápida, ocorrendo logo nas primeiras horas. No segundo estágio, a taxa de fluência é mais constante, onde a duração é bem maior comparada a inicial, esse estágio se caracteriza como o equilíbrio entre os processos de encruamento e recuperação. No último estágio acontece uma nova aceleração na taxa de fluência, levando o material a ruptura.

Figura 9 - Gráfico de fluência.



Fonte: Aprova Concursos (2019).

4 METODOLOGIA

4.1 Introdução

A fadiga térmica é um tipo específico de fadiga normal, a diferença é que, o que ocasiona as tensões e deformações na peça não são esforços mecânicos e sim variações cíclicas de temperatura, fazendo com que se torne um caso especial diferenciando-o da fadiga termomecânica. Esse fenômeno pode ser dividido em duas partes: a iniciação e a propagação da trinca. O grande problema em questão seria calcular o tempo de vida esperado de um componente metálico em geral, depois de alguns ciclos de temperatura, que se configura, exatamente, como o início da primeira trinca. No entanto, não existe uma modelagem matemática específica disponível, relacionando a vida esperada de tais componentes a propriedades específicas do material. Então para se chegar a um desenvolvimento semi quantitativo, equações padrão de fadiga foram aplicadas para descrever os processos envolvidos e alcançar o mais próximo do que seria uma modelagem computacional do problema.

Para o desenvolvimento do trabalho, foi necessário também uma tomada de decisão, para que se pudesse chegar a um resultado que fosse satisfatório. É preciso levar em consideração que esse trabalho não foi constituído a partir de um ensaio experimental de fadiga térmica, mas a partir da análise e comparação de modelos já publicados. A comparação se deu a partir do estudo sobre fadiga térmica de baixo ciclo dos autores Maim e Norstron (2019), onde eles desenvolveram um modelo de fadiga térmica relacionada aos aços ferramenta em aplicações de trabalho a quente, e aos estudos de LU Y. et al (2019), onde foi realizado um novo modelo de fadiga térmica induzido em matrizes de aço H13 para fundição sob pressão. As informações foram coletadas e inseridas num software matemático Matlab® para a solução dos problemas e a plotagem dos gráficos.

4.2 Material

Tomando por base o estudo dos autores citados nessa pesquisa, o material utilizado para análise de fadiga térmica foi o aço ferramenta para trabalho a quente AISI H13, sendo um aço com excelente combinação entre dureza e resistência à fratura. A combinação das propriedades, principalmente em temperaturas elevadas, faz do aço AISI H13 adequado ao uso nas mais diversas aplicações como: Matrizes de forjamento a quente em prensas, matrizes

para extrusão de alumínio e suas ligas, fundição sob pressão ou gravidade de ligas não ferrosas e moldes para injeção de polímeros abrasivos como os termofixos.

Para LU Y. et al (2019), por ser um material que trabalha à altas temperaturas, são expostos a rápidas flutuações de temperatura que causam tensões térmicas e risco de danos. Estas condições severas limitam a vida útil da matriz e conduzem a modos de falhas comuns, tais como rachaduras por fadiga térmica, solda por fundição, dissolução corrosiva, erosão e desgaste. Esses modos de falha existem não apenas na fundição de alumínio, mas também em diferentes ligas, como moldes de fundição sob pressão. Essas falhas de ferramentas são perdas significativas devido ao alto custo de manutenção e substituição. Em particular, o craqueamento térmico foi a principal falha em ferramentas de trabalho a quente e foi responsável por 70% das falhas em ferramentas de fundição. Portanto, prever e melhorar a vida de fadiga térmica dos moldes de trabalho a quente tornou-se uma necessidade importante na indústria de fundição sob pressão.

Nas Tabelas 1, 2, 3 e 4, estão as propriedades do aço AISI H13 para fins de cálculos e análise de resultados.

Tabela 1 - Composição química do aço ferramenta AISI H13.

%C	%Si	%Mn	%Cr	%Mo	%V
0,32 – 0,40	1,0	0,39	5,13 – 5,25	1,33 – 1,4	1,0

Fonte: Matweb (2019).

Tabela 2 - Coeficiente de expansão térmica.

Temperatura °C	mm/mm °C 10 ⁻⁶
21 - 93	10,4
21 - 204	11,3
21 - 316	12,4
21 - 427	13,1
21 - 538	13,5

Fonte: Hudson toolsteel (2019).

Tabela 3 - Módulo de elasticidade.

Temperatura °C	Módulo elasticidade GPA
21	206,8
93	199,9
204	186,2
316	196,5
427	189,6
538	158,6

Fonte: Hudsontoolsteel (2019).

Tabela 4 - Propriedades mecânicas.

Propriedades	Sistema Internacional
Tensão de rendimento (20 °C)	1000 MPa
Coefficiente de poisson	0,27 – 0,30

Fonte: Azom (2019).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados foram adquiridos a partir das informações retiradas dos trabalhos que foram tomados por base. Segue Tabela 5 e 6, que insere as variáveis utilizadas na Equação 11 para calcular o número de ciclos relacionados a temperatura.

5.1 Simulações para o primeiro caso estudado (Maim e Norstrom)

Tabela 5 - Propriedade do material à $T_1 = 25^\circ$.

Aço	ε_{f1}	$\alpha \text{ } C^{-1}$	ν	$\sigma_1 \text{ MPa}$	$E_1 \text{ GPa}$
H 13	0,6	12×10^{-6}	0,3	970	220

Fonte: Maim e Norstrom (1979).

Tabela 6 - Variáveis calculadas do material.

Aço	$T_2, ^\circ C$	σ_2, MPa	E_2, GPa
H 13	650	175	165
	700	80	155
	750	60	145

Fonte: Maim e Norstrom (1979).

Com as condições inseridas nas Tabelas 5 e 6, foi possível validar o modelo estudado, pois a $\varepsilon_p > \varepsilon_e$. Sendo assim, o cálculo para o tempo de vida do material poderá ser feito a partir da expressão encontrada para a fadiga térmica de baixo ciclo, como mostra a Equação 11.

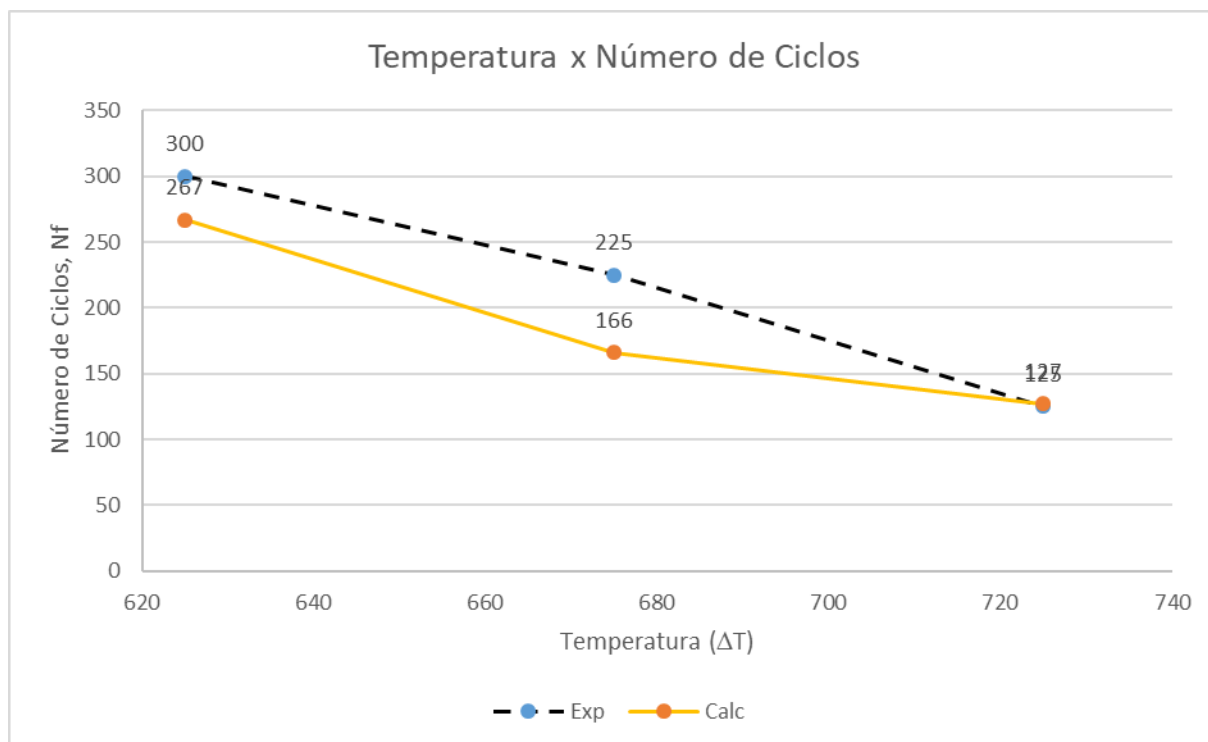
A Tabela 7 demonstra esses valores calculados, em termos de ciclos por variação térmica, fazendo uma comparação com os valores experimentais e o erro percentual. A Figura 10 exhibe o gráfico comparativo entre os resultados.

Tabela 7 - Valores encontrados para as condições de temperatura.

Aço	$\Delta T, ^\circ C$	Experimentais	Calculados	Erro (%)
H 13	625	~300 ciclos	267 ciclos	11
	675	200 – 250 ciclos	166 ciclos	~26
	725	100 – 150 ciclos	127 ciclos	~1

Fonte: Adaptado de Maim e Norstrom (1979).

Figura 10 - Comparação entre resultados para o primeiro caso.



Fonte: Autoria Própria (2019).

Assim, é possível identificar que o modelo calculado descreve razoavelmente o processo de iniciação de trinca para as condições particulares do aço AISI H13. Os valores foram comparados, como mostrado na Tabela 7, a partir dos valores experimentais.

É importante tomar nota que esse modelo matemático descrito não é estritamente válido para condições reais de fadiga térmica, visto que as variações percentuais calculadas em relação as experimentais, podem chegar a valores de 10 a 20% de distinção.

5.2 Simulações para o segundo caso estudado (LU Y. et al.)

Para o segundo caso estudado LU Y et al. (2019), foi introduzido uma amostra do aço ferramenta AISI H 13, na forma de uma barra retangular, em um forno, a uma dada temperatura calibrada anteriormente, para simular uma fundição sob pressão e logo após retirado e resfriado em água à temperatura ambiente. Esse processo se repetiu durante alguns ciclos até a visualização da primeira trinca. O experimento se repetiu para outras variações de temperatura e os resultados estão expostos na Tabela 8. O mesmo processo foi realizado num software comercial para simular o teste de fadiga e comparar com o experimental, os

resultados estão expostos na Tabela 9. A equação utilizada para calcular os parâmetros, tanto experimental quanto simulado, foi a Equação 14.

Tabela 8 - Parâmetros e valores obtidos a partir das amostras experimentais.

$T_{\max}/^{\circ}C$	$T_{\min}/^{\circ}C$	ΔT	N_f
405.3	24.2	380	4570 ciclos
507.8	25.7	480	1590 ciclos
604.3	27.6	580	870 ciclos

Fonte: LU Y. et al. (2019).

Tabela 9 - Parâmetros e valores obtidos a partir das amostras simuladas.

$T_{\max}/^{\circ}C$	$T_{\min}/^{\circ}C$	ΔT	N_f
423.2	24.5	398	4500 ciclos
525.5	25	500	1574 ciclos
619.3	25.3	594	852 ciclos

Fonte: Adaptado de LU Y. et al. (2019).

Os coeficientes da Equação 14 foram ajustados experimentalmente e usados para compor o modelo proposto. Segue a partir da Equação 15, valores utilizados para a obtenção do resultado, e Tabela 10 com os valores ajustados a partir do processo experimental. Mais abaixo encontra-se um gráfico (Figura 11) com os valores calculados a partir da equação. Como o erro foi de aproximadamente 1% não houve a necessidade de plotar o gráfico comparando ambos os resultados.

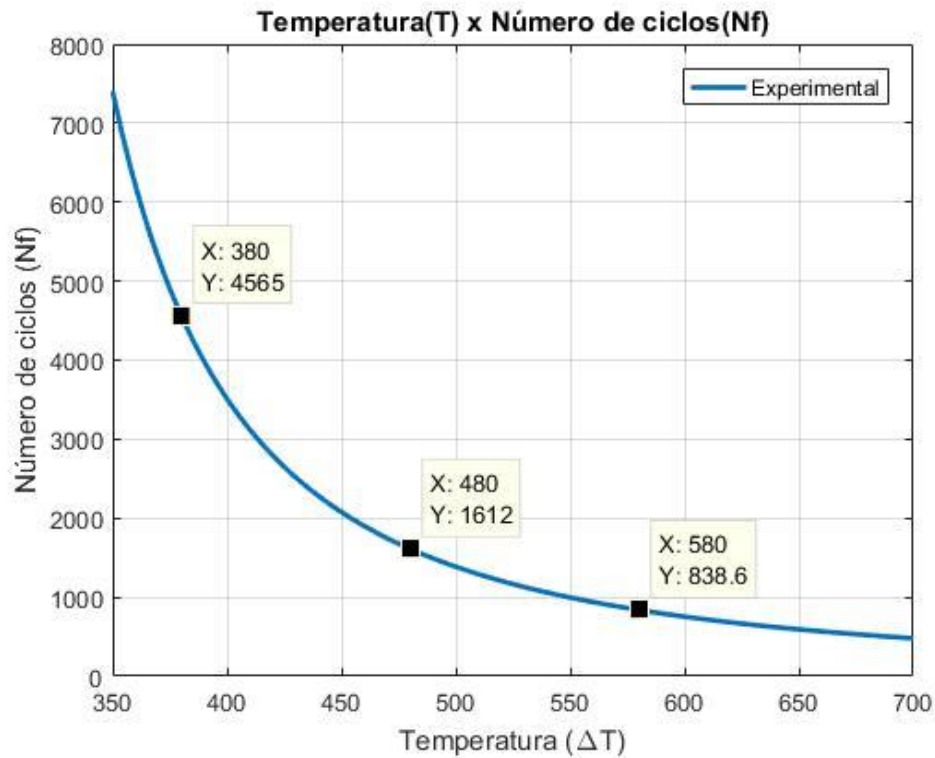
$$N_f = 2.589 \times 10^7 (\Delta T - 253.6)^{-1.786} \quad 15$$

Tabela 10 - Valores ajustados na equação 14.

$\Delta T, ^{\circ}C$	Experimentais	Ajustados	Erro (%)
380	4570 ciclos	4565 ciclos	0,1
480	1590 ciclos	1612 ciclos	1,38
580	870 ciclos	838.6 ciclos	3,6

Fonte: Adaptado de LU Y. et al. (2019).

Figura 11 - Resultados experimentais para o segundo caso.



Fonte: Autoria própria (2019).

É importante observar que ΔT_c obteve um valor de $253.6^\circ C$, isso significa que, flutuações de temperatura abaixo desse valor não produzirá danos por fadiga térmica no aço.

Os resultados exibidos nas Tabela 8 e 10 e na Figura 11, são os resultados ajustados para a parte experimental, porém foi observado que houve uma pequena diferença nos valores encontrados a partir da simulação feita por elementos finitos. A temperatura teve uma pequena elevação em um valor médio de $17^\circ C$ e com isso, um novo parâmetro foi utilizado para ajustar a Equação 14, resultando na Equação 16 abaixo:

$$N_f = 2.589 \times 10^7 (\Delta T - 270.6)^{-1.786} \quad 16$$

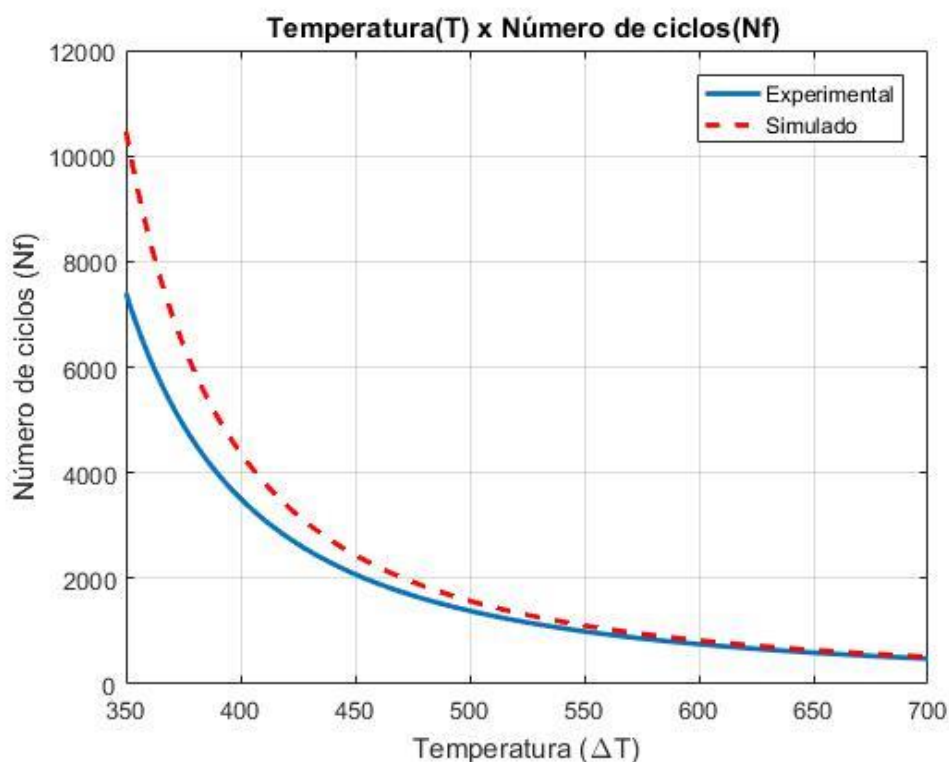
Mais uma vez é importante observar o valor de ΔT_c , que após ajustes de aproximadamente 17° em relação a parte experimental, obteve uma magnitude de $270.6^\circ C$. A Tabela 11 agora faz uma comparação entre os valores ajustados da parte experimental com a parte simulada, calculando assim o erro experimental e a Figura 12 expõe essa comparação em termos de gráfico de linha.

Tabela 11 - Comparação entre parte experimental e simulada.

$\Delta T, ^\circ C$	Experimentais	Simulados	Erro (%)
380~398	4565 ciclos	4500 ciclos	1,4
480~500	1612 ciclos	1574 ciclos	2,36
580~594	838.6 ciclos	852 ciclos	1,6

Fonte: Adaptado de LU Y et al., (2019).

Figura 12 - Comparação entre parte experimental e simulada.



Fonte: Autoria Própria (2019).

Analisando os gráfico gerados, é possível observar que o número de ciclos é inversamente proporcional a temperatura, ou seja, quanto maior for a diferença entre a temperatura mínima e a temperatura máxima de teste, menor será a quantidade de ciclos necessários para que apareça a primeira trinca por fadiga no material, isso mostra a necessidade de diminuir o $\Delta T = T_{\max} - T_{\min}$ e consequentemente prolongar a vida útil do material. Uma medida que poderia ser tomada, para que essa condição fosse realizada, seria um pré-aquecimento no molde, onde a $T_{\min}$ aumentaria, ou aplicar um revestimento na matriz para diminuir $T_{\max}$.

O modelo proposto é bem visto para experimentos de fadiga térmica de baixo ciclo para aços ferramenta de trabalho a quente AISI H 13, já que os erros experimentais mostram um valor muito pequeno, na ordem de 1%, tanto nos resultados experimentais, quanto na comparação entre estes e os valores simulados.

O autor ainda destaca que embora apenas duas equações sejam necessárias para resolver os dois parâmetros desconhecidos no modelo, é necessário enfatizar que, do ponto de vista estatístico, quanto mais dados forem coletados, melhor será o ajuste do modelo e a calibragem desses parâmetros. No entanto, o principal objetivo dos testes experimentais neste estudo é demonstrar a calibração dos parâmetros e validar o modelo preditivo de fadiga térmica na forma da lei de potência. Dessa perspectiva, os resultados experimentais aqui serviram ao propósito.

5.3 Discussão a respeito dos trabalhos estudados e avaliação de modelo

Como foi apresentado anteriormente na metodologia, esse trabalho foi desenvolvido tomando por base o estudo de dois artigos que abordavam a análise de fadiga térmica em aços ferramenta AISI H13. Ambos os trabalhos utilizaram as mesmas equações para o cálculo de vida por fadiga. Essas equações partiram dos estudos de Coffin-Manson para a vida de fadiga a partir da análise de deformação vida.

Os resultados apresentados variaram um pouco no que diz respeito ao erro percentual. Observa-se que o primeiro estudo obteve um resultado que mostra um erro percentual de valores aproximados aos 20%, que para a engenharia, que considera o erro percentual aceitável até os 5%, não foi um resultado adequado, enquanto o segundo obteve resultados mais satisfatórios, pois o erro percentual calculado foi de aproximadamente 1%.

É importante tomar nota a data de publicação dos devidos trabalhos, o primeiro foi publicado em 1979, onde provavelmente a tecnologia computacional não era tão acessível nem avançada como nos dias de hoje, ao contrário do segundo trabalho que foi publicado no ano de 2019, onde, com auxílio de softwares, puderam aproximar a simulação com o experimento real em 99%.

6 CONCLUSÃO

Neste trabalho, o tempo de vida por craqueamento térmico de aços para ferramenta de trabalho a quente AISI H13, foi modelado segundo uma relação entre número de ciclos e temperatura. Com base nas análises e os resultados alcançados, as conclusões tiradas estão expostas a seguir:

- Foi observado que quanto maior a variação cíclica de temperatura sofrida pelo material, menor será seu tempo de vida útil. Isso ocorre devido as tensões residuais serem proporcionais a essa variação cíclica, provocando fadiga no material.
- O modelo matemático proposto, a partir das equações de Coffin-Manson, descrevem de forma razoável o tempo de vida de um material, através da fadiga térmica. O primeiro caso, por ter tido um erro experimental acima do aconselhado pela engenharia, não avaliou de forma satisfatória o modelo, diferentemente do segundo caso que, a partir de resultados mostrados, a avaliação foi condizente com aquilo que engenharia descreve como válido. Isso mostra que, a equação precisa ser bem ajustada a partir de simulações para obter um resultado mais próximo ao experimental.

REFERÊNCIAS

ALVARENGA JÚNIOR, Álvaro. **Avaliação experimental dos efeitos da fadiga térmica nas propriedades mecânicas de um aço inoxidável austenítico**. 2006. Tese (Doutorado), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

APROVA CONCURSOS. **Observe um gráfico tempo x deformação obtido através de um ensaio de fluência**. Disponível em: <<https://www.aprovaconcursos.com.br/questoes-de-concurso/questao/225768>>. Acesso em: 09/08/2019.

ASHBY, Michael; SHERCLIFF, Hugh; CEBON, David. **Materiais: engenharia, ciência, processamento e projeto**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.

AZOM. **H13 Tool Steel**. 10 jul. 2013. Disponível em: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=9107>. Acesso em: 02/08/2019.

BUDYNAS, Richard G.; NISBETH, J. Keith. **Elementos de Máquinas de Shigley**. 10. ed. Porto Alegre: Mcgraw Hill Brasil, 2016. 1096 p.

DOCPLAYER. **Leitura de fadiga térmica, isotérmica e termomecânica**. 2017 Disponível em: <https://docplayer.com.br/38915457-Leitura-fadiga-termica-isotermica-e-termomecanica.html>. Acesso em: 05/07/2019.

GGDMETALS. **AISI H13**. 2015. Disponível em: <https://ggdmetals.com.br/produto/aisi-h13/>. Acesso em: 02/08/2019.

HUDSONTOOLSTEEL. **Steel H13**. Disponível em: <https://www.hudsonsteel.com/technical-data/steelH3>. Acesso em: 02/08/2019.

INSPECTIONEERING. **Thermal fatigue**. Disponível em: <https://inspectioneering.com/tag/thermalfatigue/>. Acesso em: 12/06/2019.

J, Sjöström; J, Bergström. Thermal fatigue in hot-working tools. **Scand. J. Metall.** 34:221-31, 2005. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1600-0692.2005.00719.x>.

K, Watanabe et al. Low-cycle fatigue testing and thermal fatigue life prediction of electroplated copper thin film for through hole via. **Microelectronics Reliability**, 82, 20. 2018. 27.doi:10.1016/j.microrel. 2017.12.045.

LAMPMAN, Steven R. (Ed.). **Fatigue and Fracture**. USA: Asm International, 1996.

LU Y et al. A New Fatigue Life Model for Thermally-Induced Cracking in H13 Steel Dies for Die Casting. **Journal of Materials Processing Technology** (2019), <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.04.023>.

MAGALHÃES, Frederico de Castro et al. Susceptibilidade à fadiga térmica de matrizes fechadas para forjamento a quente. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, São Paulo, v. 11, n. 2, p. 131-137, abr./jun. 2014.

MATWEB. **AISI Type H13 Hot Work Tool Steel**. Disponível em: http://www.matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguid=e30d1d1038164808a85cf7ba6aa87ef7. Acesso em 02/08/2019.

NORTON, Robert L. **Projeto de Máquinas: Uma abordagem integrada**. Porto Alegre: Bookman, 2013. 1062 p.

Q, Xin. Durability and reliability in diesel engine system design. **Diesel Engine System Engine**. 2013 113-202.

R, Zauter; H.J, Christ. Some Aspects of Thermomechanical Fatigue of AISI 304L Stainless Steel. **Metallurgical Transactions**. v. 25(2), p. 401-406, Feb 1994.

ROSA, Edison da. **Análise de resistência mecânica de peças e componentes estruturais mecânica da fratura e fadiga**. Santa Catarina: Grante, 2002.

S, Maim; LA, Norstrom. Material-related model for thermal fatigue applied to tool steels in hot-work applications. **Metal Science**. 13;(9),544-50, 1979. <http://dx.doi.org/10.1179/030634579790438291>.

SLIDE SHARE. **Ensaio de fluência.** 2014. Disponível em: <https://pt.slideshare.net/Leogluiz/ensaio-de-fluncia>. Acesso em: 05/07/2019.

SOUSA, S. A. **Ensaaios Mecânicos de Materiais Metálicos.** Edgard Blucher: Ed. da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1974.

SPERA, D. A. **What is a Thermal Fatigue.** Thermal Fatigue of Materials and Components, ASTM STP 612, 1976.

WULPI, Donald J. **Understanding How Components Fail.** Ohio: Asm International, 1999. 290 p.