

Termografia para Determinação do Limite de Fadiga em Aço de Médio Carbono

João V. C. G. Alves, Felipe A. V. Araújo, Gabriel A. Honorato, Marcio José Dias, Rosemberg F. N. Rodrigues & Hélio S. Queiroz

A determinação do limite de fadiga é um grande desafio, métodos comuns demandam muito tempo e investimento. Um método foi desenvolvido por La Rosa e Risitano, conhecido como Método de Risitano. O objetivo do trabalho foi definir o limite de fadiga do aço SAE 1045 Normalizado pela análise termográfica em ensaios dinâmicos. Sua utilização foi devido à ampla necessidade industrial na fabricação de componentes que necessitam de alta resistência mecânica e sofrem ações de forças cíclicas. De forma geral, o limite de fadiga do aço definido possui em torno de 210 MPa. Para dar mais credibilidade ao novo método a obtenção dos valores demonstra uma clareza de resultados promissora de 208,85 MPa, utilizando-se uma menor quantidade de espécimes e obtendo menor desvio padrão. O método se mostrou rápido, objetivo e usual em ambientes reais.

Palavras-chave: *limite de fadiga; termografia; aço SAE 1045.*

The determination of fatigue limit is a big challenge, Common methods require a lot of time and investment. A method was developed by La Rosa and Risitano, known as Risitano Method. The objective of this work was to define the fatigue limit of SAE 1045 Steel Normalized by thermographic analysis in dynamic tests. Your utilization was due to the wide need of the industrial to manufacture components that require high mechanical resistance and suffer from cyclic forces. Generally, the steel fatigue limit is around 210 MPa. To give more credibility for this new method, obtaining the values demonstrates a promising clarity of results of 208.85 MPa, using fewer specimens and obtaining a lower standard deviation. The method proved to be fast, objective and usual in real environments.

Keywords: *fatigue limit; thermography; steel SAE 1045.*

Introdução

O modo de falha por fadiga afeta muitas das estruturas e dos componentes mecânicos industriais, tanto para estruturas estáticas quanto para dinâmicas. Ao longo dos anos, vários métodos de determinação do Limite de Fadiga (S_L) foram desenvolvidos por diferentes pesquisadores. Tais métodos podem gerar grandes dispersões e possuir difícil aplicabilidade. O mais tradicional é o de Wohler, desenvolvido em 1858, que apresentou a curva S – N (amplitude de tensão – número de ciclos). A determinação e perfil da curva estão expressas na Figura 1. A partir daí outros métodos foram desenvolvidos, como o método de Prot na década de 40 e o método de Nixon, ou staircase, na década de 60 junto à análise estatística de Dixon e Mood¹.

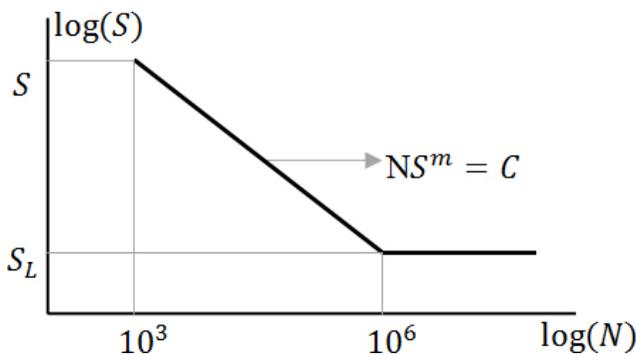


Figura 1: Curva SN de acordo com Método de Wohler. **Fonte:** Adaptado de 2Manhães PRB. Estudo da fadiga em Policarbonato com o uso da Termografia. 2016:1-49

Nota-se que, em determinado ponto da curva, ela se torna horizontal, não variando a amplitude de tensão (S ou σ_a) à medida que se aumenta a quantidade de ciclos, sendo assim, o ponto correspondente é definido como o limite de fadiga do material².

As curvas do método Wohler resultam em médias com alto desvio padrão, com grande erro de porcentagem. Os resultados exibidos por Prot, embora vantajoso comparado ao de Wohler, necessitam de muitos corpos de prova (CP) e de elevado tempo disponível pois são feitos a partir da

variação da amplitude de carregamento até a falha do corpo. Por fim, o método de Nixon consiste em estimar um valor de limite de fadiga e carregar o CP, dependendo do resultado, o próximo corpo será carregado com um valor menor ou maior que o anterior, este método também é conhecido por up-and-down pois forma um gráfico com tais características. Em todos os métodos citados o longo tempo aplicado, além do grande número de espécimes a serem analisados, gerando um alto custo, são questões levadas em consideração antes de se iniciar uma pesquisa neste segmento¹⁻³.

No final da década de 90, Risitano e La Rosa propuseram um método para rápida determinação desse limite de fadiga, onde comprovam o uso da termografia para caracterizar propriedades dinâmicas de materiais. O método de Risitano utilizou a termografia para explorar o mapa térmico sobre a superfície de um espécime e com isso conseguiu determinar seu limite de fadiga, foi utilizado em 1986 e posteriormente melhorado e refinado para explorar seu grande potencial, o que gerou algumas patentes e, oficialmente, o Método de Risitano foi criado em 2000. Essa técnica é vantajosa em relação às três anteriores pois demanda poucos corpos de prova e não se utiliza de vasto tempo de aplicação. Sua definição é feita através da termografia ativa e pode servir também para determinar a curva S – N^{1,2,4}.

Referência Bibliográfica

Segundo La Rosa e Risitano⁴, é possível determinar o limite de fadiga de um material seguindo a análise de temperatura de sua superfície³, além de receber informações sobre a energia retida no corpo. Outras definições desenvolvidas por La Rosa e Risitano foram que a área na qual a temperatura aumentar desde o início dos esforços cíclicos, ocorrerá a subsequente falha, além disso, caso o estresse seja maior que o limite de fadiga do material, a temperatura será acrescida durante a primeira parte (fase I) do teste, permanecerá constante por um longo período de tempo (fase II) e então apresentará um repentino aumento de temperatura imediatamente antes da fratura (fase III)⁵.

Para cargas acima do limite de fadiga, a taxa crescente de temperatura com o número de ciclos na fase I, tem relação

direta com o aumento de tensão em relação ao limite desse. A temperatura constante da fase II cresce de acordo com o aumento de tensão aplicada em relação ao limite de fadiga⁵.

Risitano, *et al.*, propuseram uma metodologia para encontrar o limite de fadiga dos materiais por meio de uma análise térmica da superfície da amostra durante um teste de tração axial clássico. Sabendo que a fadiga ocorre para uma carga capaz de induzir a plastificação local na amostra ou componente, eles definiram como o limite de fadiga, o carregamento correspondente à mudança da inclinação da curva de temperatura em um teste uniaxial de tração estática e propuseram encontrá-lo por um simples teste clássico acompanhando a temperatura da superfície de análise^{5,6}.

A fase I foi limitada a um número muito baixo de ciclos em comparação com o número subsequentemente necessário para atingir a falha. Usando frequências de carregamento ou tensões de carregamento diferentes para os diferentes espécimes, o aumento na temperatura, naturalmente, aumenta com a frequência, mas a interseção da linha com o eixo de tensão não varia⁵.

A pesquisa atual visa utilizar o método de Risitano e La Rosa para a determinação do limite de fadiga de um aço 1045 Normalizado por meio de ensaios axiais, verificando o desvio padrão dos resultados. Abrangendo a fadiga como um todo, pode-se dizer que há falhas em máquinas que estão relacionadas às cargas que variam no tempo, e não de esforços estáticos. Falhas essas, em níveis de tensão inferiores aos da resistência de escoamento do material. Assim, a utilização da teoria de falha considerando apenas esforços estáticos, pode levar a um projeto falho quanto à solicitação de esforços dinâmicos. A fadiga, então, é o fenômeno de ruptura progressiva a ciclos repetidos de tensão ou deformação,^{3,7} ou ainda, uma forma de falha que ocorre em estruturas que estão sujeitas a tensões dinâmicas e oscilantes⁸.

Porém as trincas se iniciam com a variação de tensões aplicadas ao corpo enquanto que, sua propagação são as variações das intensidades de tensões. Em falhas axiais, forças tensoras são aplicadas ortogonais à área da seção transversal do corpo. Logo, para se descobrir a resistência à propagação de trincas do material, mede-se a taxa de crescimento por ciclo de carga dependente do fator de intensidade de tensões³.

De acordo com Shigley^{3,9}, a falha é representada em três estágios:

- O primeiro (nucleação) remete ao início das micro trincas (pequena duração), formadas devido deformação plástica cíclica seguida de propagação cristalográfica. Corresponde ao período gasto para a formação e o crescimento inicial das trincas até que seu comprimento seja considerado macroscópico. Essa formação se inicia mais facilmente em regiões que haja porosidade, descontinuidade, inclusões e outras microfissuras que podem ser geradas no processo de fabricação dos corpos. A plasticidade na ponta da trinca é influenciada pela característica do material^{9,10}.
- O segundo corresponde à propagação das trincas (maior tempo de vida da peça e maior parte da área superficial da fratura), acontece a progressão de micro a macro trincas, formando superfícies de fratura com platôs paralelos (na direção da máxima tensão de tração), separados por sulcos também paralelos (chamadas marcas de praia). Durante o carregamento cíclico, tais superfícies fissuradas abrem e fecham, em atrito entre si, e a aparência das marcas de praia dependem das mudanças no nível e na frequência do carregamento, bem como da natureza corrosiva do meio. Não há período definido entre a nucleação e a propagação, mas há uma ordem de tamanho da trinca para os grãos, variantes entre 0,1 e 1,0 μm para aços^{9,11}.
- O terceiro corresponde à ruptura repentina devido ao crescimento instável da trinca (instantâneo, sem aviso prévio), que ocorre no ciclo de carga final (quando o material remanescente não pode suportar as cargas). Com a fratura as marcas de praia resultam em linhas de divisa que apontam para a origem das trincas iniciais^{9,12}.
- O aço 1045 normalizado, sobre processo de fabricação semelhante ao utilizado na pesquisa, possui suas características padronizadas conforme a Tabela 1, retirada do endereço eletrônico www.matweb.com¹³, o site, com finalidade acadêmica ou para de base de projetos, funciona como um banco de dados internacional que

coleta informações sobre as propriedades de polímeros, metais, cerâmicas, madeiras, fibras, lubrificantes e outros materiais diversos, definidas em pesquisas científicas ou informadas pelos próprios produtores.

Tabela 1: Características do aço 1045 Normalizado. **Fonte:** <http://www.matweb.com/>¹³

Tipo do Aço	Teor de Carbono (%)	Limite de Elasticidade (GPa)	Limite de escoamento (Mpa)	Limite de Resistência à Tração (Mpa)	Alongamento (%)
SAE 1045	0,460-0,500	210	280 - 320	600 - 660	16

A possibilidade da termografia estar relacionada com a fadiga vem da teoria em que a mesma utiliza-se da captação de uma radiação não ionizante, na fração invisível do espectro eletromagnético, que está contígua aos comprimentos de ondas longas (infravermelha) através de câmeras termográficas. A medição e controle da emissividade é de suma importância, uma vez que ela determina a capacidade que um corpo tem de emitir radiação eletromagnética. A emissividade depende do comprimento de onda (λ) e da temperatura (T). A emissividade de metais é alta, e aumenta conforme a elevação da temperatura⁴.

O método de obtenção de dados é o Thermoelastic Stress Analysis (TSA), que se caracteriza pelo stress térmico ocasionado pela variação de cargas no material estudado. A termografia passiva independe de uma fonte de calor externo, já que a variação de calor ΔT , é causada pelo deslocamento das redes cristalinas do material testado⁶. Permitindo a medição da temperatura do corpo medido, em contrapartida da termografia ativa, submete o corpo a estímulos de temperatura externos, sendo assim, a propagação de calor nestes corpos é dependente de suas propriedades térmicas.

A variação de temperatura, mesmo que seja mínima, depende das tensões aplicadas sobre o material e da troca de calor que ocorre no interior do mesmo. Logo⁶,

$$\dot{T} = \frac{T_0}{\rho c_\epsilon} \times \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial T} \times \dot{\epsilon}_{ij} + \frac{\dot{Q}}{\rho c_\epsilon}, \quad (\text{Eq. 01})$$

Anulando-se o segundo termo da Equação 1 utilizando uma frequência onde não ocorra condução de calor entre pontos do corpo, é obtido:¹⁴

$$\sigma_{ij} = 2 \times \mu \times \dot{\epsilon}_{ij} + (\lambda_{\epsilon_{kk}} - \beta \partial T) \delta_{ij}, \quad (\text{Eq. 02})$$

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} = (3\lambda + 2\lambda)\alpha. \quad (\text{Eq. 03})$$

Deriva-se a Equação 2 em função de T , sem variação da constante linear em relação a temperatura, e logo após, utiliza-se substituições para posterior integração, deduzindo:

$$\Delta T = \frac{\alpha_l \times T_0}{\rho \times c_p} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3). \quad (\text{Eq. 04})$$

Os fenômenos termodinâmicos envolvidos no processo são de suma importância para o entendimento da relação entre a variação da temperatura e a deformação do material. Para materiais que independem da direção cristalográfica, apresentam a mesma natureza e são isolados de qualquer troca de calor, essa variação de temperatura (ΔT) pode ser definida pela somatória das principais tensões atuantes em relação ao limite de fadiga do material ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$), representada pela Equação 4¹⁵.

Em carregamentos cíclicos, parte da energia do processo produz micro deformações plásticas no material, gerando uma variação de energia interna por unidade de volume ΔE_i . Outra parte da energia gerada é liberada em forma de calor. Sendo assim, a variação de energia interna é definida pelo produto da capacidade calorífica pela massa específica do material vezes a integral da temperatura variando nos ciclos:

$$\Delta E_i = c_v \times \rho \times \int_0^{N_f} T(N) \partial N. \quad (\text{Eq. 05})$$

Sendo c_v e ρ constantes, a variação de energia interna é considerada um parâmetro energético, definido por ϕ , e tem valor igual ao último termo da Equação 5. O parâmetro ϕ é definido por uma fração do parâmetro ϕ ,

e estará associado a um número de ciclos menor que N_f . A Figura 2 exibe uma melhor elucidação das relações termodinâmicas com as tensões¹⁶.

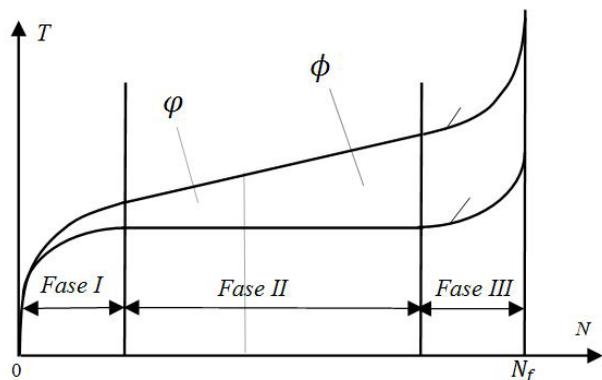


Figura 2: Determinação das 3 fases térmicas de um corpo. **Fonte:** Adaptado de 16 Thermographic Method Based Accelerated Fatigue Limit Calculation for Steel Subjected to Rotating Bending

Observando-se a Figura 2, para ambas as curvas, A e B, a única diferença além do valor nominal da temperatura ocorre durante a fase II, na qual também pode ser caracterizada pela constante taxa de aumento de temperatura ou pela não variação da temperatura¹. Caso a amplitude de tensão (σ_a) seja menor que a fadiga (S) relacionada à tensão, a temperatura do corpo variará tão pouco que poderá ser aproximada à 0, o que representa a não geração de dano por fadiga¹⁷. Sendo assim, Risitano propõe avaliar somente a primeira fase da curva $T \times N$ para diferentes amplitudes de tensão (σ_a) em um mesmo corpo, determinando assim, a região de transição sem danos até a que apresentar danos por fadiga ($\sigma_a < S_L$ até $\sigma_a \geq S_L$)¹.

De acordo com Risitano a falha por fadiga incide quando a energia dissipada atinge o valor limite $\Delta E_i = E_p$, que depende implicitamente do material utilizado. Dessa forma, pode se relacionar a geração de trincas internas no material com a variação da temperatura, que caracteriza a liberação de energia do processo⁵.

A energia gerada no processo de tensão cíclica, em forma de calor, é emitida através da radiação, sendo assim, é uma função da temperatura do material. Quanto maior a

temperatura, maior a intensidade da energia infravermelha emitida¹⁸. Levando-se em consideração a última observação e que a falha por fadiga se inicia quando a energia dissipada atinge o valor limite do material⁵, a hipótese de que a temperatura do corpo está relacionada com seu limite de fadiga se torna plausível.

A energia de radiação pode ser dissipada de três maneiras: absorção, transmissão e reflexão^{18,19}. Cada um destes fenômenos possui um parâmetro para defini-lo, sendo a somatória de todos os três iguais a 100% da energia dissipada. Um material opaco não dissipa energia por transmissão e um corpo negro, além da transmissão, também não dissipa por reflexão¹⁸. A energia de absorção representa a energia interna radiada pelo corpo, sendo relacionada aos conceitos desenvolvidos por Risitano⁵, supõe-se que a relação da radiação infravermelha com a energia interna do CP é diretamente proporcional à proximidade de características do corpo negro.

A câmera termográfica relaciona a energia infravermelha do corpo com sua temperatura superficial, sendo assim, para se obter a temperatura correta da superfície do material, é preciso reduzir ao máximo as emissões de energia refletidas e transmitidas, proporcionando então uma leitura apenas da absorção de energia do corpo. Para se reduzir a refletância do corpo, é preciso envolvê-lo com material que aumente sua emissividade para mais próximo de 1 sem que altere suas características mecânicas. Em contrapartida, a redução da transmitância é feita pela modificação do ambiente em que o corpo se encontra, reduzindo as gerações de calor externa e aproximando-se a câmera do objeto¹⁸.

A termografia é baseada somente da transferência de calor por radiação, contudo, é claro que existem outras formas de transferência de calor, como a condução e a convecção. Tais meios de transferência de calor são irrelevantes para a análise da termografia dos aços e para a relação de energia emitida com fadiga do material, isso se deve devido às taxas de transferência de calor para cada meio. De acordo com a Equação 6 de Stefan-Boltzmann, exibida em termos de comprimento de ondas de luz, por Usamentiaga¹⁸, é mostrada que a energia emitida de calor por radiação de um corpo cinza depende de duas variáveis: a emissividade do corpo e a temperatura ao qual se encontra.

$$W = \varepsilon \times \sigma \times \Delta T^4, \quad (\text{Eq. 06})$$

Tal equação apresenta a energia emitida de forma pontual em determinado corpo, sendo assim, para se determinar a quantidade de energia emitida pela superfície de um corpo através do calor, basta multiplicar-se pela área do objeto^{18,20}.

Sendo assim, a taxa de fluxo de calor de radiação, expressa em Watts, é definida pela Equação 7²⁰:

$$q = \varepsilon \times \sigma \times A \times \Delta T^4, \quad (\text{Eq. 07})$$

Assim como há a taxa de fluxo de calor para radiação, também há a taxa de fluxo de calor para convecção e condução, estas estão descritas, resumidamente, na Equação 8 e 9²⁰:

$$q = \varepsilon \times h \times A \times \Delta T, \quad (\text{Eq. 08})$$

$$q = \varepsilon \times k \times A \times \Delta T, \quad (\text{Eq. 09})$$

Sendo h e k, respectivamente, os coeficientes de transferência de calor por convecção e condução. Comparando-se as equações 7, 8 e 9, percebe-se uma semelhança em suas denominações, exceto pela constante de transferência térmica e pela taxa de fluxo de calor por radiação ser mais dependente da variação de temperatura do corpo do que as demais, devido à sua quarta potência.

Pode-se supor que, pela taxa de fluxo de calor por radiação ser cubicamente maior que a taxa de fluxo de calor por condução e convecção, não é necessário considerar a transferência de calor por demais meios durante a análise termográfica infravermelha de um corpo. Em contrapartida, para baixas temperaturas (temperatura ambiente ou menor), os efeitos de radiação são insignificantes devido ao pequeno valor expresso pela constante de Stefan – Boltzmann, em relação às

outras duas constantes. Mas tal determinação não se torna plausível à medida que se eleva a temperatura do corpo²⁰.

Materiais e Métodos

Quatro corpos de prova foram utilizados para todas as amplitudes de tensão definidas anteriormente, não sendo necessário o teste até seu rompimento e sim com o número de ciclos suficientes para se atingir a estabilização de temperatura na fase II, com a medida de estabilização da temperatura na superfície traçaram-se os pontos para reta ajustada de acordo com a tensão aplicada. BANDEIRAS (2017) utiliza, em sua metodologia para análise por método de Risitano, 4 espécimes, em aproximadamente 40 horas de experimento e obteve um desvio médio, em relação aos definidos em bibliografias, de 0,8. Seus corpos de prova possuem geometria semelhante aos utilizados nesta pesquisa. Ao se realizar o experimento por meio do método de Nixon, foram utilizados 25 espécimes submetidas a 140 Hz por 5.106 ciclos, totalizando aproximadamente 250 horas de experimento e obtendo resultados com desvio padrão de 1,1. RISITANO (2011) utiliza 4 espécimes, sendo a primeira para caracterização da fase estática, a segunda para caracterização da fase de fadiga e as outras duas para a análise termográfica de limite de fadiga. Entre os dois corpos, com geometria reta, foi obtido um erro de 10%.

A câmera térmica, calibrada pela equipe técnica da Fluke®, está dentro da data de validade de calibração, registrada até o final deste ano, com precisão garantida de 2%. Durante todo o ensaio de fadiga, foi feito o monitoramento e a gravação utilizando a câmera Fluke®, modelo VT04 A com resolução de 0,1 °C e intervalo de temperatura de -10 °C até 250 °C. Um diferencial importante deste equipamento de medição é a sua mesclagem de mapa infravermelho, o visor permite sobrepor imagens de forma 0%, 25%, 50%, 75% ou até totalmente infravermelho, permitindo visualização dupla do experimento. Outro diferencial é a configuração para que as fotos sejam tiradas com cronometragem automática em, no mínimo, 30 segundos. A desvantagem deste modelo se dá pela forma de informação, a câmera informa a temperatura no ponto focado do CP durante o

teste, sendo necessário o direcionamento manual no ponto de maior temperatura.

Sendo a relação entre energia infravermelha e temperatura superficial, para se aumentar a precisão do experimento e reduzir variações causadas por fontes de calor externas, coloca-se um manto escuro envolto a máquina axial e a câmera e também se aproxima o equipamento do espécime. Desligar o máximo de aparelhos que possam gerar ou retirar calor do meio durante o processo experimental auxiliou, juntamente com sua aproximação, na redução da transmitância de energia do corpo. Para se reduzir a refletância, é preciso tornar os corpos o mais próximo possível das características de um corpo negro, sendo assim, o CP foi pintado com tinta preta para aumentar sua emissividade. A câmera é regulada para emissividade igual a 0,95, logo a tinta fosca preta é ideal para o experimento pois possui uma emissividade entre 0,95 e 0,98, além de não alterar as características mecânicas do material.

A validação da máquina de teste de fadiga deve ser feita por meio da verificação de seu funcionamento, a máquina usada nesta experiência exerce uma força axial vertical no corpo. Sua frequência de aplicação de carga é regulada através de controles automáticos de Servo motor que seguem os valores definidos pelo operador, sua estrutura é composta com uma garra superior fixada em uma haste rígida e uma garra inferior fixada em uma haste hidráulica, responsável por realizar os movimentos cíclicos. Com o objetivo de se reduzir as variáveis do teste, a frequência de aplicação da carga foi mantida equalizada em 12 Hz durante todos os experimentos. A máquina, aplicará então a σ_a definida de forma alternada, realizando o movimento cíclico desejado, com tensão definida pela relação da força axial pelo diâmetro do corpo.

O material para constituição dos corpos de prova passou pelo tratamento térmico de normalização com objetivo de se obter as propriedades mecânicas naturais do aço SAE 1045, os corpos de prova já cortados em tamanhos adequados foram postos dentro do forno pré-aquecido à 850 °C por tempo suficiente para temperatura do núcleo atinga o mesmo valor da superfície, em seguida foram retirados e resfriados à ar a temperatura ambiente.

A geometria do corpo de prova foi feita conforme norma ASTM E606-04, com comprimento total de 130 mm, cada cabeça possui um comprimento de 30 mm e diâmetro de 15 mm, o modelo em ampolheta garante que apenas um ponto da secção transversal possua diâmetro de 8 mm, facilitando a marcação do ponto na qual a câmera termográfica deve ser focada, exibido pela Figura 3, usinados em Torno CNC afim de se garantir um dimensionamento menos instável, com avanço lento, baixa profundidade de corte e baixa velocidade (no último passe). Apesar de ser feito em CNC, o torneamento ainda sim pode gerar rugosidade descontínua e propiciar rupturas mais facilmente, então após usinagem, para se evitar as microfissuras, um lixamento é realizado utilizando-se as lixas de número 240, 320, 400, 600, 800, 1200 e 2500 respectivamente, obtendo rugosidade inferior à 0,2 micrômetros. O processo de lixamento pode gerar mudanças (mesmo que mínimas) na microestrutura do material e alterar sua dureza ou resistência, para se corrigir tais alterações, um novo processo de normalização deve ser feito, o eletro-polimento é um processo que proporciona uma normalização com mesmo aspecto além de reduzir a rugosidade do CP.

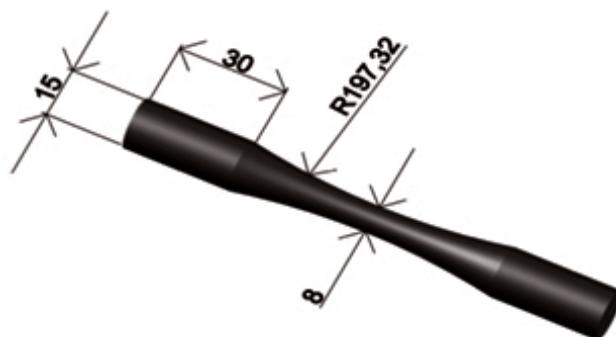


Figura 3: Projeto do Corpo de Prova. Fonte: Do autor

Com os CP finalizados, o teste de fadiga, através do método de Risitano, necessita de um primeiro carregamento empírico para determinação do ponto de partida da amplitude de tensão (σ_a). BANDEIRAS (2017) utilizou

como primeiro carregamento, a relação 30% entre σ_a e limite de fadiga. Utilizando-se do limite de resistência a tração, considerado pela Tabela 1, o limite de fadiga pode ser definido, de acordo com a literatura básica de Norton e outros afins de Resistência dos Materiais, utilizando-se a relação de 50% para limites de fadiga fletores multiplicado pela correção de 70% para axiais. Isto significa que o limite de fadiga axial equivale à 35% do valor do limite de resistência a tração do mesmo aço, sendo assim para nosso caso, equivale a 210 MPa. Para se reduzir o desvio padrão o valor inicial do primeiro carregamento a ser usado nos testes foi estimado em 200 MPa, com um incremento de aproximadamente 10% para cada número de ciclos até o seu rompimento.

BANDEIRAS (2017) sugere um teste com um número de 10000 ciclos. Com a obtenção de valores de gradiente de temperatura (ΔT) é calculada a variação de temperatura entre o ponto central e as extremidades dos corpos. Devido à questão da garra inferior da máquina de fadiga ser hidráulica, uma quantidade constante de calor é dissipada no corpo de prova, para se evitar impactos nos resultados e, ainda assim, levar em consideração a temperatura da garra, antes de se calcular a variação de temperatura do corpo, é preciso definir um valor médio para a temperatura das extremidades (garras) que é dissipada no CP.

Após a definição da temperatura média nas extremidades do corpo, juntamente às temperaturas centrais obtidas por meio da câmera termográfica, é calculado ΔT que o corpo de prova sofreu durante todo o ensaio em relação ao ciclo de trabalho da máquina de tração. Esta diferença de temperatura pode ser chamada de gradiente pois define um grau de variação da temperatura do corpo.

O primeiro corpo de prova, foi aplicado um aumento de amplitude de tensão na casa dos 10 MPa, enquanto que os demais CP's a aplicação é entre 10 e 20 MPa até o rompimento. A aplicação de tal metodologia tem por objetivo uma maior clareza da linha de limite de fadiga, com um número maior de pontos disponíveis, a dispersão da reta se reduz e sua precisão aumenta. O aumento das quantidades de σ_a aplicadas ao corpo significa também um aumento no tempo de experimento e no custo de hora

máquina, a hipótese do método de Risitano define uma redução em ambas as características, dessa forma, vale-se avaliar se os demais CPs, que possuem menor quantidade de pontos também tendem ao mesmo valor de fadiga que seus anteriores.

O gráfico traçado por intermédio dos valores tabelados de $\Delta T \times N$ é similar ao demonstrado na Figura 2, sendo que, propositalmente, o gráfico “finaliza” dentro da fase II, fase correspondente ao limite da zona elástica do material. A fase II é caracterizada pelo gradiente de temperatura ser nulo ou próximo de 0. Dessa forma, uma temperatura média aproximada, também chamada de temperatura de estabilização, é definida para cada amplitude de tensão aplicada ao mesmo corpo. Um segundo gráfico é feito a partir de ambas informações “amplitude de tensão (σ_a) x Variação da Temperatura de Estabilização da Fase II (ΔT_{est})”. A quantidade de ciclos utilizados por BANDEIRAS (2017) foi suficiente para atingir a fase II, sendo assim, também é o valor estipulado para este trabalho.

Aumentando-se a σ_a do corpo de prova até seu rompimento, é possível definir de 4 a 8 pontos da curva SN para limite de fadiga. O gráfico característico é formado por duas retas concorrentes, sendo a primeira com inclinação quase nula e a segunda com inclinação significativa. O ponto concorrente é determinante para a obtenção do limite de fadiga, podendo-se estender a linha inclinada até que a mesma atinja o eixo das abscissas e assim definir o limite de fadiga ou, para autores menos conservadores, refletir o valor do ponto concorrente no eixo das abscissas e definir um maior limite de fadiga do material.

Resultado

Desenvolvendo a metodologia descrita, os valores encontrados para os quatro corpos de prova condizem com a literatura atual. As tabelas a seguir relaciona os valores da σ_a aplicado com a variação da temperatura de estabilização da Fase II (ΔT_{est}):

Tabela 2: Relação amplitude de tensão x Temperatura de estabilização do CP 1. **Fonte:** Autor

Corpo 1	σ_a [MPa]	200	210	220	230	240	250	260	270	280
	ΔT_{est} [°C]	0,47	1,37	2,85	12,71	17,92	18,65	34,61	42,10	52,79

A Tabela 2 exibe os valores de temperatura de estabilização do primeiro corpo de prova, pode-se observar a obtenção de 8 amplitudes de tensão aplicadas, iniciando-se em 200 MPa e indo até sua ruptura em 280 MPa, além da temperatura de estabilização de 52,79 °C.

Tabela 3: Relação amplitude de tensão x Temperatura de estabilização do CP 2. **Fonte:** Autor

Corpo 2	σ_a [MPa]	200	220	240	260	270	280	290
	ΔT_{est} [°C]	0,14	3,66	7,18	15,35	19,17	23,84	32,37

Para o corpo 2, apresentado na Tabela 3, foram usadas 7 amplitudes de tensão. Para definir um padrão na coleta dos resultados, os primeiros valores seguiram acréscimo de 20 MPa, ao atingir 260 MPa os acréscimos passaram a ser de 10 MPa até seu rompimento. A σ_a onde ocorreu o rompimento do corpo equivale à 290 MPa em temperatura de estabilização de 32,37 °C.

Tabela 4: Relação amplitude de tensão x Temperatura de estabilização do CP 3. **Fonte:** Autor

Corpo 3	σ_a [MPa]	200	220	240	260	280	300
	ΔT_{est} [°C]	0,23	0,18	3,31	19,16	18,91	45,30

O terceiro corpo de prova, apresentado na Tabela 4, foi configurado para o padrão de 10% de acréscimo, contudo não foi rompido ao atingir 280 MPa, sendo necessária a aplicação de uma amplitude de tensão superior. Para se manter o padrão estabelecido, a amplitude submetida foi de 300 MPa, embora a convergência das linhas de tendência do Gráfico 1

se aproxime de 210 MPa, é observado um aumento súbito de temperatura, equivalente à 45,30 °C, para a amplitude de 300 MPa que condiz com o comportamento da relação.

Tabela 5: Relação amplitude de tensão x Temperatura de estabilização do CP 4. **Fonte:** Autor

Corpo 4	σ_a [MPa]	200	220	240	260	280
	ΔT_{est} [°C]	0,51	3,20	19,59	19,32	35,60

A Tabela 5 exibe os valores do quarto corpo de prova, seguindo o padrão definido no teste anterior, rompendo-se a 280 MPa e temperatura estabilizada de 35,60 °C. Pode-se notar que o corpo não atingiu uma variação da temperatura de estabilização excessiva em comparação à mesma amplitude de tensão do CP 1, contudo, o valor se aproximou do CP 2.

O Gráfico 1, feito em software específico, exibe a dispersão dos pontos para cada corpo de prova e calcula sua linha de tendência. A linha de tendência exibe o perfil de fadiga do corpo e através dela pode-se definir o limite de fadiga do material.

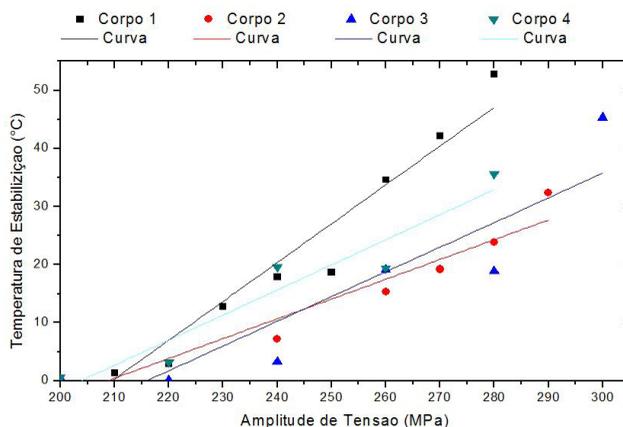


Gráfico 1: Tendência de Fadiga. **Fonte:** Autor

O Gráfico 1 gera, juntamente aos cálculos da linha de tendência, a equação que caracteriza a inclinação da reta. Os valores obtidos na Tabela 6 foram retirados conforme as mesmas equações e exibe as equações características de cada corpo, em termos de x e y, onde x representa a Amplitude de Tensão σ_a aplicada ao corpo e y, a Variação da Temperatura de Estabilização ΔT_{est} .

Tabela 6: Limite de Fadiga. **Fonte:** Autor

Espécimes	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4
S_L [MPa]	209,47	208,61	215,82	203,74
Inclinação	$y = 0,6682x - 139,970$	$y = 0,3402x - 70,970$	$y = 0,4249x - 91,704$	$y = 0,4315x - 87,914$
R^2	0,9376	0,9233	0,8292	0,9181

LA ROSA e RISITANO (2000) definem que o Limite de Fadiga do corpo é definido quando, não importando o número de ciclos realizados pelo carregamento da força, a variação da temperatura estabilizada se torna nula, ou seja, a temperatura do corpo não se variou desde o início do teste. Sendo assim, é válido considerar pela hipótese que, ao definir o valor de y igual a 0, os valores resultantes de x indicam a amplitude de tensão onde não se há variação da temperatura do corpo e, sendo assim, o limite de fadiga S_L do material.

Pode-se observar, pelo Gráfico 1 e pela Tabela 6, que os CPs convergem para um valor de 210 MPa, embora aqueles que possuem menor quantidade de pontos tratados (σ_a aplicada) estão mais dispersos que os demais. Ao se aplicar uma média dos valores de limite de fadiga, pode-se definir um valor de 208,85 MPa com um Desvio Padrão Amostral de 4,48. Em comparação à bibliografia básica, na qual os valores para o limite de fadiga flexional do Aço SAE 1045 Normalizado equivalem à 50% do limite de Resistência a Tração do próprio aço e que, para fadigas axiais é necessário aplicar uma correção de 0,7 na relação matemática, é obtido um desvio de 0,55%. É possível relacionar, então, que a precisão dos valores obtidos pelo Método de Risitano se torna maior à medida que são aplicados mais números de σ_a .

A problematização inicial encontrada, foi o impacto da temperatura da garra hidráulica em relação ao ponto

central medido. A avaliação da temperatura do corpo durante os experimentos não pôde ser feita sem que se levasse em consideração o aquecimento gerado pela garra hidráulica. Contudo, conforme descrito pelas equações 7 a 9, a interferência da garra hidráulica só se torna válida durante o início dos testes, em que a temperatura do corpo ainda está relativamente baixa. Mesmo que em momentos definidos, ajustes nas tratativas dos dados foram feitos para se corrigir o erro da garra.

Antes de se regular a posição da câmera termográfica para captar o ponto central dos corpos de prova, essa foi posicionada para captar a temperatura da garra superior, em seguida, após a máquina axial ligada, a câmera foi posicionada para captar a temperatura da garra hidráulica inferior, após a obtenção de ambas as temperaturas que a câmera foi posicionada ao centro do corpo de prova. Obteve-se então, três valores de temperatura, a temperatura da garra superior, a temperatura da garra inferior e a temperatura do centro.

Observou-se que ambas as temperaturas das garras permanecem constantes durante a operação da máquina, sendo assim, é válido calcular um valor médio de temperatura de ambas as garras e realizar a diferença com a temperatura do centro do corpo. Este valor foi definido, anteriormente, como o gradiente de temperatura. No primeiro ciclo de cada carregamento de força é definido o gradiente de referência, ou gradiente zero, todos os demais ciclos tomam seu valor de temperatura conforme a variação gerada a partir da referência do gradiente zero. Dessa forma,

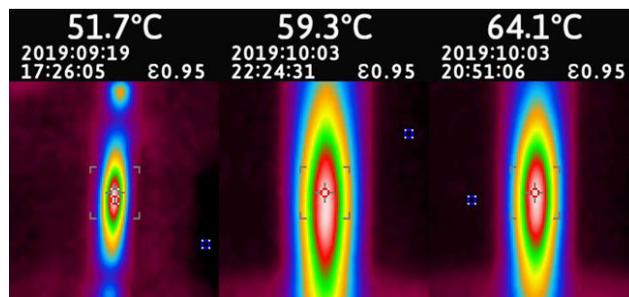


Figura 4: Perfil de temperatura do corpo de prova. **Fonte:** Autor

a diferença de temperatura das garras se torna insignificante para a tratativa dos dados obtidos no ponto central do corpo de prova, pois o valor constante é levado em consideração em todos os cálculos de cada ciclo.

Durante todo o processo de trabalho da máquina axial, a câmera termográfica captura a temperatura central do corpo, a Figura 4 mostra um exemplo de medição feita pela câmera termográfica.

Nela é possível ver que a hipótese de que, para temperatura elevadas, a transmissão de calor por condução e convecção se tornam insignificantes, é verdadeira. Pode-se notar também que o perfil de temperatura do corpo demonstra uma maior temperatura no centro, onde posteriormente ocorre a falha do material e, conforme se afasta em direção às extremidades, vai se reduzindo a temperatura. A câmera termográfica foi posicionada exatamente no centro do corpo de prova, porém o perfil oval de temperatura demonstra um leve deslocamento para a direção inferior, onde está localizada a garra hidráulica de maior temperatura, demonstrando a leve interferência que a temperatura das garras pode causar no Método de Risitano.

Porém, tal forma de se tratar os dados não exhibe, na definição dos gráficos, a temperatura real do corpo de prova durante o teste, e sim a variação do gradiente de temperatura desde a temperatura ao qual o corpo possuía no início do mesmo. Pegando como exemplo a variação da temperatura de estabilização do corpo 1 sujeito à σ_a de 280 MPa, conforme a Tabela 2, o valor descrito não indica a temperatura à qual o corpo de prova estava sujeito, mas sim que o corpo possui 52,79 °C a mais do que quando havia começado o ciclo de trabalho na mesma amplitude de 280 MPa.

Os valores obtidos do gradiente de temperatura foram utilizados para a criação dos Gráficos em que se é definido o perfil de fases para cada amplitude de tensão, por meio do perfil pode-se observar, empiricamente, qual o ponto onde se inicia a fase II (fase de estabilização de temperatura) e calculado a temperatura média de estabilização para obtenção das Tabelas 2 a 5. O Gráfico 2 mostra o perfil de fase para cada amplitude de tensão do CP 1:

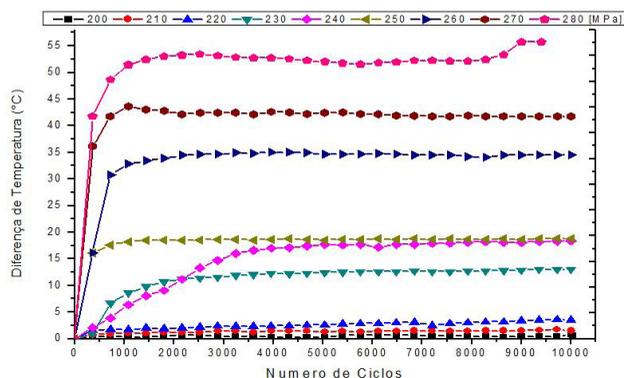


Gráfico 2: Perfil de Fase do CP 1. Fonte: Autor

A partir do gráfico, é possível verificar que a maioria dos carregamentos atingiram a fase II entre 1000 e 2000 ciclos de trabalho, com exceção das cargas de 200, 230 e 240 MPa. O primeiro carregamento, por estar próximo do limite de fadiga do material, apresentou pequena variação do gradiente de temperatura e atingiu a fase de estabilização térmica antes dos 1000 ciclos. O carregamento de 230 e 240 MPa atingiu a temperatura de estabilização apenas no ciclo 5040, embora o retardo ao atingir a temperatura de estabilização tenha sido grande, comparando-se com o Gráfico 1, a amplitude que não demonstrou um padrão nos resultados foi a amplitude de 250 MPa, isso por que a amplitude de tensão não obteve uma variação do gradiente de temperatura de estabilização tão elevada quanto as demais em relação à amplitude imediatamente anterior. A curva de 280 MPa, no ciclo 8640, pode-se observar um aumento súbito de gradiente de temperatura no perfil da curva, imediatamente antes da falha do corpo, caracterizando a fase III conforme a Figura 2. A Tabela a seguir mostra o ciclo onde foi atingida a temperatura de estabilização e o desvio padrão amostral que indica a precisão da temperatura:

Tabela 7: Ciclo de Estabilização e Desvio Padrão da Temperatura de Estabilização. **Fonte:** Autor

Amplitude de Tensão [MPa]		200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300
CP1	Nº Ciclo de Estabilização	360	1080	2520	5040	5040	1440	2160	2160	1800	*	*
	Desvio Padrão Amostral	0,15	0,16	0,43	0,17	0,32	0,10	0,25	0,33	0,56	*	*
CP2	Nº Ciclo de Estabilização	360	*	1800	*	3240	*	1800	2520	2160	1080	*
	Desvio Padrão Amostral	0,14	*	0,22	*	0,45	*	0,24	0,20	0,61	0,55	*
CP3	Nº Ciclo de Estabilização	360	*	360	*	2880	*	3240	*	1800	*	1800
	Desvio Padrão Amostral	0,23	*	0,15	*	0,48	*	0,24	*	0,23	*	1,17
CP4	Nº Ciclo de Estabilização	360	*	3240	*	3240	*	1800	*	2880	*	*
	Desvio Padrão Amostral	0,41	*	0,57	*	0,21	*	0,74	*	1,24	*	*

Os valores marcados com “*”, na Tabela 7, indicam que aquele corpo de prova não foi submetido à amplitude de tensão relacionada. Observa-se que somente em dois carregamentos a temperatura de estabilização foi atingida após os 5000 ciclos, representando que não é necessário um grande número de ciclos para a resolução dos testes de fadiga através do Método de Risitano. O desvio padrão amostral dos valores de gradiente de temperatura de estabilização indica a precisão das medições. Vale observar que apenas o CP 3, quando submetido a 300 MPa, e o CP 4, quando submetido a 280 MPa, apresentaram um desvio padrão elevado, ao relacioná-los com o Gráfico 1, é possível verificar que são os pontos que mais se dispersaram da linha de tendência de fadiga, embora ainda assim representem uma aproximação aceitável de acordo com a bibliografia básica dos testes de fadiga.

Apesar dos valores de número de ciclo na qual a estabilização do gradiente foi atingida possa parecer dispersa, representa pouca variação de acordo com as medições feitas pela câmera, isso se dá pela relação entre a frequência de aplicação de força da máquina e pelo time de captura da

câmera, em que a primeira foi regulada à uma constante de 12 Hz e a câmera termográfica, regulada ao seu time mínimo de 30 segundos por captura de imagem. Portanto, para cada uma das amplitudes submetidas a cada um dos corpos, foi coletado um total de 28 temperaturas distintas.

De acordo com LA ROSA e RISITANO (2000), o corpo de prova rompe onde a temperatura aumentará desde o início do teste. Para que as temperaturas coletadas fossem mais precisas, os corpos de prova, além de lixados, polidos e pintados, também foram feitos em perfil diferente, conforme exhibe a Figura 5.



Figura 5: Perfil do CP após rompimento. **Fonte:** Autor

O corpo de prova em formato ampulheta, para as análises termográficas, proporcionou maior precisão aos testes, a câmera termográfica possui a limitação da necessidade de direcioná-la ao ponto de maior temperatura (não há uma varredura térmica nas imagens), logo, com um corpo ampulheta, o ponto de menor secção teoricamente é o ponto de rompimento e também o ponto onde há a maior variação térmica. Os resultados das fotos termográficas, como a Figura 4, confirmam tal hipótese, exceto que os corpos não romperam no ponto de menor secção. Relacionando a Figura 5 com a Figura 4, é válido considerar que a garra hidráulica inferior influenciou no ponto de rompimento, mesmo que minimamente.

Conclusão

Esta pesquisa relatou e realizou uma análise comprobatória da metodologia para rápida determinação do limite de fadiga do aço médio carbono SAE 1045, as bibliografias têm utilizado esse método a mais de 15 anos. Baseia-se basicamente no aumento da temperatura quando o stress atinge valores acima do limite de fadiga, devido à conversão de parte do calor do sistema em deformações das redes cristalinas do material. Os resultados obtidos pelo Método de Risitano, ao serem comparados com demais, se mostraram receptivos e coesos, quanto às bibliografias básicas e métodos mais antigos, pode-se determinar a utilização de menores quantidades de corpos de prova e tempo útil.

Em relação ao tempo de experimento e custos necessários, pode-se concluir que o método de Risitano se mostrou eficiente em relação ao subitamente anterior, Método de Nixon. BANDEIRAS (2017), ao realizar o experimento do Método de Nixon, utilizou-se de 25 espécimes e pouco mais de 250 horas de experimento enquanto que, no mesmo experimento, utilizou-se de 4 espécimes e 40 horas de experimento para o Método de Risitano, uma redução de 84% do tempo e custo. Neste experimento também foram ensaiados 4 CPs num tempo útil de máquina de aproximadamente 10 horas, uma redução de 84% no custo de matéria prima e 96% do custo de tempo

útil da máquina em relação a um experimento padrão de Método de Nixon.

Em relação à confirmação dos resultados, os desvios obtidos por meio de Nixon e Risitano de BANDEIRAS (2017) são respectivamente 1,1 e 0,8 em relação aos teóricos definidos em bibliografias, enquanto que neste experimento foi encontrado um desvio de 0,55 da bibliografia básica teórica de 210 MPa. RISITANO (2011), apesar de ter usado somente 2 corpos para a real determinação do limite de fadiga, obteve um desvio padrão amostral de 10 % entre seus resultados. Os valores obtidos referentes ao experimento demonstraram um desvio padrão amostral entre os corpos de prova de 4,49%, contudo foram feitos 4 espécimes.

Devido às conclusões, é válido definir que o Método de Risitano se torna mais preciso a medida que se aumenta a quantidade de Corpos de Prova usados, contudo mesmo em quantidades baixas de corpos de prova, o método se mostrou mais eficiente que os métodos mais antigos, como o de Nixon (up-and-down).

O método de Risitano, em geral, mostrou-se coeso quanto às definições teóricas de fadiga. O Gráfico 2 demonstra claramente as fases 1, 2 e 3 onde são definidas as características da trinca durante um rompimento por fadiga. As Figuras 4 e 5 demonstram as relações das irradiações dos corpos durante os ensaios e seu ponto de ruptura. Por fim, a termografia se mostra um promissor ramo de análises para estruturas metálicas e não-metálicas, ao passo que as definições de energia interna e energia irradiada por corpos é mais explorada dentro da comunidade científica.

Referências Bibliográficas

1. Bandeira CFC, Kenedi PP, Castro JTP de. Determinação do limite de fadiga de um aço carbono trêfilado a frio utilizando o método termográfico. **2017**;
2. Manhães PRB. Estudo da fadiga em Policarbonato com o uso da Termografia. **2016**;1-49.
3. Castro JTP de, Meggiolaro MA. Fadiga – Técnicas e Práticas de Dimensionamento Estrutural sob Cargas Reais de Serviço. **2009**.
4. Rosa G La, Risitano A. Thermographic methodology for rapid determination of the fatigue limit of materials and mechanical components. *Int. J. Fatigue*. **2000**;22(1):65-73.

5. Risitano G, Risitano A, Clienti C. Determination of the fatigue limit by semi static tests. *Igf Xxi*. **2011**;322–330.
6. Assis AAO de. Estudo da fadiga em Aço Carbono com o uso da Termografia Agradecimentos. PUC - RJ. **2017**;
7. Branco C, Fernandes A, Castro P. *Fadiga de Estruturas Soldadas*. 1st ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian; **1999**.
8. Callister WDJ, Rethwisch DG. *Ciência e Engenharia do Materiais: Uma Introdução*. 9th ed. Iwoa - Utha: **2018**.
9. Dudynas RG, Nisbett JK. *Shigley's Mechanical Engineering Design*. 10th ed. New York: **2016**.
10. Schettini LCV, Ribeiro GDO. Análise Estrutural da Propagação Mecânica De Trincas Em Uma Viga da Estrutura do Forno de Reaquecimento. *UFMG*. **2016**;6:117.
11. Guimarães SR, Pertence AE de M. Desenvolvimento e aplicação de uma metodologia para previsão de vida de eixos de mandris de bobinadeiras de laminação a frio submetidos a danos acumulados por fadiga. *UFMG*. **2009**;(2).
12. Pêcego AL, Pereira MVS. Análise Fractográfica e Metalográfica de uma Região de Fratura. PUC - RJ. **2015**;13(3):1576–1580.
13. MatWeb: Online Materials Information Resource [Internet]. **2019**; Available from: <http://www.matweb.com/>
14. Barber JR. *Elasticity (Solid Mechanics and Its Applications)*. Springer; **2010**. p. 219–225.
15. Corigliano P, Crupi V, Epasto G, Guglielmino E, Risitano G. Fatigue assessment by thermal analysis during tensile tests on steel. *Procedia Eng*. **2015**;109:210–218.
16. Lipski A. Thermographic Method Based Accelerated Fatigue Limit Calculation for Steel X5CrNi18-10 Subjected to Rotating Bending. *Polish Marit. Res*. **2015**;22(4):64–69.
17. Fargione G, Geraci A, Rosa G La, Risitano A. Rapid determination of the fatigue curve by the thermographic method. *Int. J. Fatigue*. **2002**;24(1):11–19.
18. Usamentiaga R, Venegas P, Guerediaga J, Vega L, Molleda J, Bulnes FG. Infrared thermography for temperature measurement and non-destructive testing. *Sensors (Switzerland)*. **2014**;14(7):12305–12348.
19. Howell JR, Siegel R, Menguc MP. *Thermal Radiation Heat Transfer*. 5th ed. New York: CRC Press; **2010**.
20. Kreith F, Manglik R, Bohn M. *Princípios de Transferência de Calor*. 2nd ed. Rio de Janeiro - RJ: Cengage Learning; **2010**.

João V. C. G. Alves*, Felipe A. V. Araújo, Gabriel A. Honorato, Rosemberg F. N. Rodrigues & Hélio S. Queiroz

Departamento de Engenharias, Cursos de Engenharia Mecânica.
Centro Universitário de Anápolis – UniEVANGÉLICA. Avenida
Universitária, km 3,5, Centro Universitário, Anápolis, Goiás, Brasil.

*E-mail: joaocarcute1@gmail.com