Adriano Augusto Oliveira de Assis

Estudo da fadiga em Aço Carbono com o uso da Termografia

Projeto de graduação

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia mecânica da PUC-Rio, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientador

Prof. José Luiz de França Freire

Coorientador

Eng. Vitor Eboli Lopes Paiva

Rio de Janeiro

Julho 2017

Agradecimentos

Gostaria de agradecer ao meu orientador e professor José Luiz de França Freire, que me forneceu essa oportunidade para trabalhar e aprimorar os meus conhecimentos. Teve paciência e tornou a elaboração do projeto possível.

Ao meu co-orientador, Vitor Eboli Lopes, que me auxiliou, sanou minhas dúvidas e esteve presente quando precisei.

A todos que contribuíram para minha formação, principalmente aos meus pais que, com amor e incentivo, não mediram esforços para que eu chegasse até essa etapa da minha vida e sempre acreditaram no meu potencial.

A Deus por tudo que me proporcionou ao longo da minha vida.

A minha namorada, Mariana Ravanelli, que esteve presente direta e indiretamente para a conclusão desse projeto.

A todos os membros do laboratório de Fotomecânica e Fadiga pela disponibilização de material necessário para a realização do estudo.

Enfim, a todas as pessoas que fizeram parte dessa etapa decisiva da minha vida.

Resumo

Os métodos tradicionais para determinação do limite de fadiga e da curva SN são conservadores e desenvolvidos há muito tempo, pois requerem muito tempo e grande quantidade de espécimes para o ensaio. Em 2000 La Rosa e Risitano apresentaram um método que utiliza a termografia infravermelha para determinar as propriedades de fadiga dos materiais e dos componentes comumente usados no setor industrial.

Nesse projeto aplicou-se o método termográfico desenvolvido por La Rosa e Risitano para a determinação das propriedades do aço carbono para o estudo de fadiga, como: o limite de resistência à fadiga e os coeficientes de Wöhler. O método termográfico consiste na medição da variação de temperaturas entre um espécime carregado ciclicamente e um corpo de referência, que se encontra na temperatura ambiente.

Foram utilizados 20 espécimes para análise do limite de fadiga e da curva SN para diferentes razões de carregamentos, sendo que neste trabalho foram analisados os resultados de 20 espécimes, no entanto apenas 2 CP's, com $R = -1$ e $R = 0.5$ foram ensaiados, sendo os outros 18 resultados obtidos da referência [1].

Palavras-chaves: Curva SN; Termografia Infravermelha; Limite de Fadiga; Aço carbono.

Studying of fatigue in carbon steel using thermography

Abstract

The traditional methods for determining the fatigue limit and the SN curve are conservative and developed long since, they require a lot of time and a great number of specimens for the test. In 2000 La Rosa and Risitano presented a method that uses infrared thermography to determine the fatigue properties of materials and components commonly used in the industrial sector.

In this project the thermographic method developed by La Rosa and Risitano was applied to determine the properties of carbon steel for the study of fatigue, such as: the limit of fatigue resistance and the Wöhler coefficients. The thermographic method consists of measuring the temperature variation between a cyclically loaded specimen and a reference body, which is at room temperature.

Twenty specimens were used to analyze the fatigue limit and the SN curve for different loading ratios. In this work the results of 20 specimens were analyzed, however only 2 CP's with $R = -1$ and $R = 0.5$ were tested, being the other 18 results obtained from the reference [1].

Key-words: SN Curve; Infrared Thermography; Fatigue Limit; Carbon steel.

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Variação de temperatura x carregamento dos diferentes espécimes [5]....	12
Figura 1.2 - Curva de Wöhler calculada pelo método tradicional e termográfico com $f=10$ Hz, [6].	13
Figura 1.3 - Curva de Wöhler calculado pelo método termográfico e tradicional para $f=20$ Hz, [6].	13
Figura 1.4 - Limite de Fadiga obtido durante o Teste Estático e Teste de Fadiga, [8].	14
Figura 1.5 - Curva SN medida por termografia para diferentes espécimes, [9].	15
Figura 1.6 - Comparação visual da curva SN obtidos através dos métodos infravermelho e de potencial elétrico, [11].	17
Figura 1.7 - Os três primeiros espécimes mostram o campo de temperatura para carregamento abaixo do limite de fadiga, na segunda linha carregamento acima do limite de fadiga, [3].	19
Figura 2.1 - Exemplo de uma curva SN experimental de um aço C70, [3].	21
Figura 3.1 - Intensidade da radiação do corpo negro em função do comprimento de onda, [15].	23
Figura 3.2 - Aplicação da termografia ativa na detecção de defeitos.	25
Figura 3.3 – Apresentação das três fases: A) Teórica [4]; B) Experimental [9].	26
Figura 3.4 - Gráfico experimental de um policarbonato referente $\Delta T \times N$ em diferentes patamares de tensão, [9].	27
Figura 3.5 - Gráfico Temperatura de Estabilização vs Tensão equivalente de Goodman com interseção das retas indicando o limite de fadiga, [9].	28
Figura 4.1 - Curvas de Tensão x Deformação dos testes de tensão de dois espécimes, [1].	31
Figura 4.2 - Dimensões do corpo de prova cilíndrico de acordo com a norma ASTM E606M-12, [1].	32
Figura 4.3 - A esquerda o espécime pintado para uma maior emissão de radiação e a direita o espécime sem a tinta.	32
Figura 4.4 - Isolamento térmico no aparato experimental.	33
Figura 5.1 - Gráficos de Variação Térmica vs Tensão para os CP 1, CP 2, CP 3 e CP 4.	36
Figura 5.2 - Gráficos de Variação Térmica vs Tensão para os CP 5, CP 6, CP 7 e CP 8.	36
Figura 5.3 - Gráficos de Variação Térmica vs Tensão para os CP 9, CP 10, CP 11 e CP 12.	37
Figura 5.4 - Gráficos de Variação Térmica vs Tensão para os CP 13, CP 14, CP 15 e CP 16.	37
Figura 5.5 - Gráficos de Variação Térmica vs Tensão para os CP 17, CP 18, CP 19 e CP 20.	38
Figura 5.6 - Gráfico Tensão Alternada x Tensão Média para Gerber, Goodman e termográfica.	39
Figura 5.8 - Curva de Tensão Alternada vs Tensão Média para diferentes vidas.	41
Figura 5.10 - Curva SN com curvas reajustadas combinadas com os pontos experimentais de cada razão.	43

Lista de tabelas

Tabela 3.1 - Emissividade para diferentes materiais.	24
Tabela 4.1 - Composição química do aço SAE 1020 testado, [1].	31
Tabela 4.2 - Propriedades básicas do aço SAE 1020, [1].	31
Tabela 5.1 - Tabela com os valores das razões, frequências e limite de fadiga.	38
Tabela 5.2 - Valores médios do limite de fadiga para as respectivas razões.	39

Lista de Abreviaturas e Siglas

TSA	Thermoelastic Stress Analysis
IR	Infrared
NDT	Non-destructive testing
RRM	Rapid Risitano Method
PD	Pontential Drop
CP	Corpo de Prova
END	Ensaaios não destrutivos

Lista de símbolos

Φ	Integral da variação da temperatura pelos ciclos
f	Frequência do ensaio
T	Temperatura
N	Número de ciclos
σ_{min}	Tensão mínima
σ_{max}	Tensão máxima
$\Delta\sigma$	Diferença entre as tensões
S'_L	Limite de fadiga do material
S_F	Resistência a fadiga associada a uma vida finita N
B	Expoente de Wöhler
C	Coefficiente de Wöhler
S_R	Limite de ruptura do corpo de prova
ψ	Absorção do material
ε	Emissividade do material
λ	Comprimento de onda
C_1	Primeira constante de radiação
C_2	Segunda constante de radiação
B	Constante de Steffan-Boltzmann
ρ	Densidade do material
C_p	Coefficiente de capacidade térmica a pressão constante
σ_1	Tensão principal na direção 1
σ_2	Tensão principal na direção 2

N_f	Número de ciclos para falha
N_s	Número de ciclos de estabilização
ΔT	Diferença de temperatura do corpo de prova para corpo de referência
T_i	Temperatura referente ao carregamento i
T_0	Temperatura do corpo de referência
ΔT_2	Temperatura de estabilização na fase 2
σ_i	Tensão aplicada referente ao carregamento i
ΔT_{2i}	Temperatura de estabilização na fase 2 referente ao carregamento i
R	Razão entre a tensão mínima e máxima
E_c	Energia plástica de deformação
E_p	Energia devido ao escoamento por unidade de volume por ciclo
E_w	Trabalho devido ao carregamento
E_r	Vida útil em termos de energia
N_i	Número de ciclos referente ao carregamento i
Q	Energia convertida em calor
E	Módulo de Young
E_i	Energia interna acumulada
N_{fi}	Número de ciclos para falha referente ao carregamento i
N_{si}	Número de ciclos de estabilização referente ao carregamento i
ΔT_i	Diferença de temperatura do corpo de prova para corpo de referência referente ao carregamento i
ΔN_i	Número de ciclos no começo da aplicação até a estabilização referente a tensão i
c	Velocidade da Luz no vácuo
h	Constante de Planck
E_b	Energia total emitida por um corpo negro
$E_{\lambda,b}$	Energia emitida por um corpo negro em função do comprimento de onda e temperatura
E_{cinza}	Energia emitida pelo um corpo cinza
α	Coeficiente de expansão térmica
S_u	Resistência à tração
β	Expoente de ajuste

Sumário

1. Introdução	10
1.1 Objetivo.....	10
1.2 Trabalhos Importantes no Estudo da Termografia Aplicada a Análise do Comportamento Mecânico em Diferentes Materiais	11
1.3 Roteiro do Trabalho	19
2. Fadiga	20
2.1 SN e Limite de Fadiga.....	20
2.2 Procedimento Experimental para obter curva SN	21
2.3 Limite de Fadiga.....	22
3. Termografia Infravermelha.....	22
3.1 Princípios Físicos	23
3.2 Termografia Ativa e Passiva	25
3.3 Termografia Aplicada à Análise de Fadiga	26
3.4 Método Risitano	27
3.5 SN com Termografia.....	28
4. Procedimento Experimental	31
4.1 Material	31
4.2 Geometria Corpo de Prova.....	32
4.3 Isolamento térmico.....	33
4.4 Equipamentos Utilizados nos Ensaios.....	34
4.4.1 Câmera Infravermelha	34
4.4.2 Máquina para Aplicação de Carregamento Cíclico	34
5. Resultados e Discussões.....	35
5.1 Medição do Limite de Fadiga Utilizando a Termografia	35
5.2 Experimento de Medição da Curva SN Utilizando a Termografia	40
6. Conclusão	44
7. Referência Bibliográfica	45

1. Introdução

Define-se uma falha como a perda parcial ou terminal da funcionalidade ou da capacidade operacional de qualquer equipamento.

Dentro de inúmeros tipos de falhas existentes, a fadiga é um dos mecanismos de dano dominantes nas falhas de estruturas mecânicas [2]. A falha por fadiga é induzida por cargas variáveis na peça, iniciando e/ou propagando uma trinca até sua eventual ruptura.

A estimativa da resistência à falha por fadiga é geralmente baseada em ensaios destrutivos de espécimes ou de secções inteiras de estrutura, como é no caso de estruturas soldadas, cujo objetivo é prever um limite de resistência do componente submetido a carregamentos cíclicos periódicos de magnitude relevante.

Tanto os modelos analíticos quanto os numéricos, embora capazes de prever as distribuições de tensões atuantes nos componentes, devem ser nutridos com informações acerca das propriedades do material, preferencialmente obtidas experimentalmente, para melhorar a confiabilidade das análises em questão. Desta forma a medição do limite de fadiga do material se torna extremamente útil e necessária para a previsão acurada de vidas residuais de componentes em operação e de componentes que ainda serão projetados.

Existem diferentes métodos para análise e projeto de componentes submetidos à fadiga, sendo que o método mais tradicional é a curva SN. Todavia, a necessidade de uma metodologia mais simples e rápida motivou a procura por novas técnicas para análise. Nos últimos anos, uma técnica que tem sido cada vez mais aplicada é a termografia infravermelha, que correlaciona a variação de temperatura na superfície do espécime com a sua vida remanescente através de metodologias específicas, que serão descritas ao longo desse trabalho.

Nesse trabalho foi estudado o método de Risitano [3,4] para estimação do limite de fadiga e da curva SN do aço SAE 1020, onde carregamentos dinâmicos e a variação da temperatura dos espécimes são correlacionados. Os resultados obtidos foram também comparados com metodologias tradicionais para o estudo da fadiga.

1.1 Objetivo

Este trabalho teve como objetivo principal aplicar as metodologias propostas por Risitano [3,4] para o estudo do comportamento à fadiga de um aço carbono genérico, medindo seu limite de resistência e seu comportamento quando os gradientes de tensão aplicados são elásticos. Neste estudo considera-se a inexistência de trincas.

A principal motivação para analisar a aplicação do método de Risitano ao estudo do comportamento à fadiga de um aço carbono tem a ver com sua simplicidade de aplicação, pequeno número de espécimes, além de não necessitar que todos os espécimes sejam ensaiados até sua ruptura. O aço analisado foi o aço SAE 1020, porque é um dos aços mais comuns na indústria, sendo utilizado para inúmeras aplicações; agrícola, automobilística, têxtil, petroquímica, etc.

1.2 Trabalhos Importantes no Estudo da Termografia Aplicada a Análise do Comportamento Mecânico em Diferentes Materiais

Este trabalho é uma continuação de uma linha de estudo, que vem sendo desenvolvida ao longo dos últimos anos, cujo objetivo é analisar materiais sujeitos à fadiga via termografia.

Neste momento será apresentada uma revisão bibliográfica de trabalhos, artigos, teses de mestrados e graduação relevantes na linha de pesquisa do uso da termografia infravermelha.

Krstulovic-Opara, L., em [5], apresenta uma visão geral de três métodos utilizando a termografia, onde os métodos descritos permitem a visualização da distribuição de tensões, estimativa do limite de fadiga e detecção de plastificação ou propagação de trinca. Os resultados termográficos obtidos são comparados com o teste clássico de fadiga (curvas SN). As amostras utilizadas são de liga de alumínio Al 2024 com secção transversal de 20x4 mm e carregadas ciclicamente ($R = 0$) com frequência de carregamento de 20 Hz. Os espécimes de teste são usinados com concentradores de tensão na forma de; furo de 6 mm, entalhe em forma de V (3 mm de profundidade) e entalhe semi-circular (raio de 3 mm). A secção transversal é a mesma para todos os espécimes (14x4 mm).

Durante a utilização do método de Risitano, testaram-se apenas três espécimes, o que é significativamente inferior aos 23 espécimes necessários para as curvas SN tradicionais, que não forneceram resultados finais de tensões nominais máximas. O tempo de teste necessário para todos os espécimes avaliados pelo método de Risitano foram de algumas horas, enquanto que as curvas SN necessitaram de duas semanas de teste de carga.

Figura 1.1 - Variação de temperatura x carregamento dos diferentes espécimes [5].

Risitano, A., Risitano, G., em [6], mostraram que existe um aumento da temperatura equivalente com aumento do valor do carregamento cíclico. Com objetivo de quantificar a vida útil do material e validar o método de Risitano, foram realizados dois experimentos com aço SAE 1040 com diferentes frequências para comparação da curva de fadiga (Wöhler). Verificado as condições de falha por fadiga e o valor do parâmetro Φ que permanece constante, os autores concluíram que esse método permite associar a temperatura de estabilização com o valor de tensão cíclica aplicada e, então a possibilidade de levantar a curva SN do material.

Os resultados encontrados confirmaram o mesmo comportamento para duas frequências (10 Hz e 20 Hz, Figuras 1.2 e 1.3), ou seja, os limites de fadiga (258.6 MPa e 248.2 MPa) e as curvas SN ficaram muito próximos do limite calculado e da curva SN determinada pelo método tradicional como mostrado nos gráficos das figuras 1.3 e 1.3, assim validando o método utilizado.

Figura 1.2 - Curva de Wöhler calculada pelo método tradicional e termográfico com $f=10$ Hz, [6].

Figura 1.3 - Curva de Wöhler calculado pelo método termográfico e tradicional para $f=20$ Hz, [6].

Risitano, A., Fargione, G., Guglielmino, E., em [7], tinham dois objetivos neste trabalho: confirmar o procedimento para detectar o limite de fadiga em diferentes aços e fazer uma medição automática do limite, independente da experiência ou uso dos experimentais daqueles que adotam esse tipo de análise.

Risitano, G., Risitano, A., Clienti, C., em [8], 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 falha por 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 acompanhado à temperatura da superfície de análise ou analisar o calor liberado.

Os testes realizados foram de dois tipos diferentes. Utilizando 6 espécimes, 3 foram realizados como testes estáticos e 3 como testes cíclicos. Além disso, outros 2 espécimes são carregados de maneira diferente para confirmar os resultados anteriores.

O método que os autores realizaram é completamente diferente dos outros propostos por outros autores que utilizam carga cíclica para encontrar o limite de fadiga do material. De forma diferente de outros pesquisadores, os autores estão analisando a parte da curva clássica de tensão entre o fim da fase elástica completamente (para todos os cristais) e o início da fase plástica macroscópica, próximo à tensão de cedência. O método baseia-se na aquisição da variação de temperatura na superfície da amostra por um sistema remoto.

A dispersão dos dados encontrados, confirmada pela literatura, mostra que a diferença entre o limite de fadiga obtido pelo teste de tração axial estático e o limite de fadiga determinado pelo teste de fadiga térmica (método de Risitano) é da ordem de 10%. Nesta aplicação a leitura do limite de fadiga é clara e é uma boa aproximação com a encontrada pelo método tradicional e pelo método de Risitano, como pode ser observado na Figura 1.4.

Figura 1.4 - Limite de Fadiga obtido durante o Teste Estático e Teste de Fadiga, [8].

Rainer Brokamp Manhães, P., em [9], estudou e analisou a metodologia desenvolvida por Risitano para medição do limite de fadiga e obtenção da curva SN do policarbonato utilizando a termografia. Esse método se baseia na variação de temperatura entre o espécime de referência e o que está sendo analisado.

O experimento foi realizado utilizando diversos corpos de prova de policarbonato para determinação do limite de fadiga e da curva SN, como visto na Figura 1.5, envolvendo comparações das curvas SN obtidas pelo método tradicional e pelo método de Risitano.

Concluiu-se que o método de Risitano para determinar a curva de Whöler e o limite de fadiga através da termografia é confiável além de ser mais rápido e com menor custo, pois não há necessidade dos experimentos serem prolongados até a ruptura do espécime.

Figura 1.5 - Curva SN medida por termografia para diferentes espécimes, [9].

Fargione, G., Tringale, D., Guglielmo, E., Risitano, G., em [10], propuseram uma análise energética para avaliar as características mecânicas de dois tirantes de um flange de uma unidade de processamento de petróleo. Eles escolheram como indicador de energia para avaliar o início da microplastificações, a temperatura da superfície. Foi proposto a integral de temperatura no ponto mais quente no tempo de ruptura ($\Phi = \int T \, dN$) como parâmetro energético. Pode-se verificar que o parâmetro Φ é uma constante para cada material.

A fim de determinar características mecânicas do material foram realizados ensaios estáticos e testes de fadiga utilizando o método rápido de Risitano (RRM). A fabricação dos espécimes foi feita usando o trabalho mecânico de corte e fresagem. Foram realizados 8 espécimes, 4 de cada tirante.

Os testes foram acompanhados pela detecção e aquisição da temperatura superficial dos espécimes utilizando a câmera infravermelha FLIR ThermoVision 3000. Os ensaios foram realizados com a carga pulsante (razão de carga $R=0.1$), frequência de

teste 10 Hz, ciclos de 10000 para etapas de carregamentos e frequência de captação de imagens térmicas de 1/25 Hz.

Examinando os mapas térmicos foram obtidos os valores de limite de fadiga, o valor do parâmetro Φ e, portanto, a curva de Wöhler.

A análise dos resultados das simulações numéricas apontou que a falha dos tirantes não foi devida ao exercício ou às condições de montagem, mas ao mau desempenho do selo do flange: quando este quebrou, permitiu que dois dos tirantes fossem atingidos por um jato de vapor de 450 °C e uma pressão de 160 atm, sendo esta a causa do efeito mecânico associada com a deterioração da resistência do material. Os ensaios experimentais confirmaram a hipótese de quebra devido à ação mecânica do vapor no tirante e à ação térmica sobre o material.

Os resultados dos testes estáticos com a análise da temperatura superficial e dos ensaios de fadiga de acordo com o método de Risitano apontaram um comportamento diferente dos parafusos obtidos a partir dos dois tirantes. Este resultado ajudou a confirmar que a única causa para a falha dos dois parafusos foi o comportamento da vedação que permitiu que os dois parafusos fossem anormalmente carregados termicamente modificando as características de resistência dos parafusos de aço. Este tipo de estudo, que permite a caracterização da fadiga através de um número limitado de espécimes, ajuda a identificar as causas de danos necessárias para a gestão e para as futuras mudanças e opções de manutenção.

Micone, G., De Waele, W., em [11], utilizaram o método de queda potencial elétrico, pois o uso de termografia por infravermelho pode ser restringido devido ao espaço disponível, ambiente, temperatura e a falta de conhecimento prévia da seção em que ocorrem os danos, enquanto que a técnica de queda de potencial elétrico (PD) é frequentemente usada para quantificar danos de fadiga em termos de taxa de crescimento de trincas. O PD pode ser usado em ambientes diferentes, e é menos sensível a mudanças no ambiente, por exemplo, variações de temperatura, todavia, é limitado a materiais condutivos e, portanto, não é diretamente viável para uma vasta gama de materiais como vidro, plásticos e cerâmicas.

Para realização dos experimentos os espécimes foram extraídos de tubos de aço sem costura com diâmetro externo igual a 323.8 mm e espessura de parede de 23.8 mm para o grau NV F460 e espessura de parede de 12.7 mm para o grau NV F500.

Os resultados obtidos pelos diferentes métodos apontaram valores próximos para o limite de fadiga e para os coeficientes da curva SN nos dois aços estruturais.

Para comprovar a viabilidade deste conceito e a correlação entre as técnicas de instrumentação, as curvas SN de duas classes de aço offshore equivalentes a NV F460 e NV F500 foram obtidas utilizando-se as abordagens energéticas tradicionais e ambas (IR e PD). Por conseguinte, a temperatura e a tensão foram registadas em espécimes do tipo "dogbone" durante séries de testes de fadiga onde a carga foi aumentando, passo a passo. Os incrementos desses parâmetros foram relacionados à evolução dos danos associados ao processo de fadiga. Um excelente acordo entre os métodos energéticos e o tradicional foi evidenciado pela comparação dos limites de fadiga determinados e das curvas SN, como pode ser observado na Figura 1.6.

Figura 1.6 - Comparação visual da curva SN obtidos através dos métodos infravermelho e de potencial elétrico, [11].

Fargione, G., Geraci, A., La Rosa, G., Risitano, A., em [4], usaram a investigação termográfica para definir o limite de fadiga e levantar a curva SN do aço SAE 1070, do aço SAE 1030 e do ferro fundido austemperado. Os resultados dos testes foram analisados e foi possível verificar a validade da hipótese de que ocorre falha de fadiga quando a energia de deformação plástica atinge um valor constante, característica de cada material ou, mais precisamente, de cada componente mecânico.

Os autores confirmaram as alegações feitas quanto à validade do método de Risitano para a determinação do limite de fadiga e, conseqüentemente, a definição dos diagramas de fadiga clássicos (Goodman-Smith, Haigh). Em particular, as observações mais recentes e as informações relatadas no presente trabalho permitem que a curva de fadiga completa de um material ou protótipo seja determinada rapidamente usando sistemas de teste relativamente simples e sem a necessidade de máquinas complexas, que opera em altas frequências.

A determinação da curva de fadiga utilizando um número muito limitado de espécimes de ensaio significa, que na fase de protótipo do desenho mecânico, já é possível corrigir a forma e as características mecânicas de um componente de modo a obter o componente mecânico melhor projetado.

Bichara Vieira, R., em [12], teve como objetivo validar a termografia como ferramenta de estudo de iniciação e propagação de trincas por fadiga em policarbonatos, utilizando métodos termográficos como termografia ativa e TSA. A termografia ativa foi utilizada para identificar pontos onde ocorrem a fadiga, e a análise termográfica de tensões (TSA) para medir os campos de tensões e localizar concentradores de tensões.

Para determinar o limite de fadiga e os coeficientes da curva de Whöler realizou-se experimento utilizando uma câmera infravermelha micro bolométrica FLIR A655sc em conjunto com os softwares da FLIR e um de processamentos de dados de TSA (*Deltatherm 2*).

Nos experimentos utilizaram-se dois tipos de espécimes padronizados, um do tipo clássico adaptado da norma ASTM E466 e outro do tipo keyhole desenvolvido pela SAE. Os resultados obtidos comparando os dois corpos de provas são de que as técnicas de termografia são extremamente adequadas para medir e prever o comportamento à fadiga no policarbonato.

La Rosa, G., Risitano A., em [3], propuseram um novo método utilizando a termografia para caracterizar as propriedades dinâmicas de materiais e componentes comumente utilizados no setor industrial, conhecido como método rápido de Risitano. Sabe-se que quando um material é submetido a carga, a sua temperatura varia. No caso de carregamento acima do limite de fadiga, o aumento da temperatura é significativo, como pode ser observado na Figura 1.7.

Para validar a nova metodologia em comparação com a determinação tradicional da curva de Wöhler, os autores testaram uma ampla gama de materiais: aços, ligas de alumínio, ferro fundido e compósitos.

A partir das primeiras aplicações deste método, foi concluído que o limite de fadiga poderia ser determinado com um número muito limitado de espécimes ou elementos mecânicos.

A fim de evitar erros devidos ao comportamento particular de qualquer espécime, é obtido um valor médio de vários espécimes (geralmente três espécimes são suficientes). Uma vez que o método é extremamente rápido, é possível trabalhar com

frequências relativamente baixas sem usar máquinas de teste tradicionais, permitindo o uso de equipamento simples para o carregamento cíclico da amostra, que pode até ser expressamente produzido para o teste específico. O uso de uma técnica de sensoriamento remoto para a medição de temperatura por sensores infravermelhos térmicos fornece uma visão global da amostra durante a aplicação de cargas e, portanto, permite identificar a zona de maior tensão, indicando a zona onde a falha da fadiga ocorrerá não só em espécimes, mas também em componentes mecânicos.

Figura 1.7 - Os três primeiros espécimes mostram o campo de temperatura para carregamento abaixo do limite de fadiga, na segunda linha carregamento acima do limite de fadiga, [3].

1.3 Roteiro do Trabalho

Este trabalho está dividido em seis capítulos, uma parte teórica, onde é apresentado o objetivo, motivação, métodos utilizados, considerações gerais e em uma parte experimental onde através de diversos ensaios, se valida a física e a solução dos modelos matemáticos propostos.

A seguir é apresentado a organização do trabalho:

No Capítulo 1, tem como propósito apresentar o tema e objetivos que foram tratados nesse presente trabalho, além de uma revisão bibliográfica de importantes trabalhos utilizando diferentes métodos do uso da termografia.

O capítulo 2 apresenta a princípios, definição e exemplos de fadiga, desde o seu tradicional método para obter a curva de Wöhler (SN) e comenta-se sobre a importância do limite de fadiga.

No capítulo 3 são discutidos as generalidades da termografia infravermelha aplicada aos ensaios não destrutivos bem como a natureza térmica e os fatores do processo de medição por radiação infravermelha, assim como a descrição do método Risitano, o qual deseja ser validado.

O Capítulo 4 é dedicado ao procedimento experimental do trabalho, apresentando a metodologia empregada para realização dos testes, detalhando passo a passo do procedimentos e técnicas utilizadas para melhor aquisição e processamentos dos dados e imagens térmicas.

O Capítulo 5 apresenta os resultados teóricos e experimentais obtidos neste trabalho. Os resultados teóricos envolvem as considerações da condição inicial no processo de aquisição do limite de fadiga e da curva SN, assim como a comparação teórica de Gerber e Goodman com resultados experimentais.

Por fim, no Capítulo 6 se discute as conclusões obtidas neste trabalho. Analisa-se as vantagens e as desvantagens do método Risitano e as contribuições fornecidas neste trabalho.

2. Fadiga

Fadiga é a falha mecânica que ocorre devido a carregamentos cíclicos que atuam no componente durante um determinado período de tempo até sua ruptura. Muitas vezes não é possível prever a vida útil de um componente mecânico. Para que seja realizada a manutenção e a substituição do componente, o conhecimento da sua vida útil tornar-se imprescindível, a fim de que haja uma melhora da confiabilidade do sistema e também uma possível reutilização do mesmo, trazendo vantagens tanto econômicas e quanto ambientais.

2.1 SN e Limite de Fadiga

O método SN ou de Wöhler correlaciona a iniciação de uma trinca por fadiga em pontos críticos de um componente mecânico com a vida útil de um corpo de prova de mesmo material. A modelagem SN é muito utilizada na prática pelo fato ser de simples aplicação, e por fazer uso de uma análise de tensões linear elástica. Desta forma, só pode ser utilizada quando a tensão macroscópica máxima for menor que a resistência ao escoamento do material no ponto crítico da peça.

Para o dimensionamento da fadiga pelo método do SN pode-se reproduzir o que acontece numa estrutura complexa testando adequadamente pequenos corpos de provas do mesmo material de formato mais simples e de menor custo, pois o início do trincamento no ponto crítico de qualquer peça pode ser produzido em um corpo de prova que tenha a mesma resistência.

Qualquer dimensionamento SN quantifica a resistência à fadiga no ponto crítico, história das tensões nele geradas e o dano acumulado por diversos carregamentos.

O limite de fadiga está relacionado à curva SN quando a $\sigma_a = \frac{\Delta\sigma}{2} < S'_L$ não causam qualquer dano ao espécime, que poderia ter assim uma vida infinita. O limite de fadiga nos aços ocorre geralmente a partir de 10^6 ciclos, mas em outros materiais podem ocorrer em vidas menores ou maiores, para ligas de alumínio igual a $5 \cdot 10^8$ e para o policarbonato igual a 10^5 .

2.2 Procedimento Experimental para obter curva SN

O procedimento experimental para determinar a curva de Wöhler, [2], supõe que o surgimento da trinca e que seu subsequente rompimento deverá ocorrer no ponto crítico. Para isto, ensaiam-se CP's sob cargas cíclicas até que os espécimes cheguem à ruptura após um determinado número de ciclos. Através dos pontos obtidos, traça-se a curva log-log que melhor ajusta os pontos, correlacionando a resistência à fadiga e a tensão aplicada com número de ciclos, como mostrado no gráfico da Figura 2.4, abaixo.

Figura 2.1- Exemplo de uma curva SN experimental de um aço C70, [3].

2.3 Limite de Fadiga

Juvinall em [13], propõe que na ausência de resultados experimentais confiáveis, se estime o limite de fadiga através de um cálculo teórico usando a equação que descreve a curva de Wöhler, $NS_F^B = C$, se $10^3 < N < 10^6$:

$$S_F(10^3) = 0.9 \cdot S_R \quad (2.1)$$

$$S'_L(10^6) = \begin{cases} 0.5 \cdot S_R, & S_R \leq 1400 \text{ MPa} \\ 700 \text{ MPa}, & S_R \geq 1400 \text{ MPa} \end{cases} \quad (2.2)$$

Onde N é a vida em ciclos, B e C são constantes do material, S_F é a resistência a fadiga associada a uma vida finita N , S_R é o limite de ruptura do CP e S'_L é o limite a fadiga do material para uma vida infinita tradicionalmente maior ou igual a 10^6 ciclos.

3. Termografia Infravermelha [14]

A termografia é uma técnica utilizada para produzir um mapeamento térmico de um corpo. Esse mapa é chamado de termograma é essencial para inspeção industrial e para qualquer instalação elétrica ou para processos que gerem calor.

Utiliza-se a termografia como uma ferramenta técnica de monitoramento e de análise de equipamentos, pois ela permite reunir diversas informações acerca de equipamentos elétricos e mecânicos, além de ter vários benefícios e aplicações, dentro as quais podem ser citadas: a detecção de defeitos e a prevenção de acidentes e no auxílio da manutenção do equipamento.

A termografia infravermelha é um método não destrutivo amplamente aceito para análise. Lord Kelvin descobriu que os corpos quando deformados geram mudanças de temperatura devido ao carregamento aplicado. Estas variações térmicas, caracterizadas pela significativa geração de calor, da ordem de centésimos de graus Celsius, permitem a detecção e estimativa da zona plástica, e propagação de uma trinca ou ruptura final. Os métodos baseados em termografia infravermelha são aplicáveis a todos os materiais estruturais, onde sua aplicabilidade depende das características de emissibilidade da superfície.

3.1 Princípios Físicos [15]

Um corpo com temperatura acima do zero absoluto, 0K, emite radiação térmica de acordo com sua temperatura. Além de emitir radiação, ele reage de três maneiras diferentes, absorvendo, refletindo e transmitindo radiação. A termografia utiliza a radiação térmica para mapear as superfícies e regiões com diferentes temperaturas.

O infravermelho corresponde a diferentes frequências eletromagnéticas que são naturalmente emitidas por qualquer corpo. As emissões de ondas eletromagnéticas são descritas por leis de Kirchhoff, Planck e Stefan-Boltzman. A lei Kirchhoff da radiação térmica consiste nos espectros de absorção e de emissão. Para obedecer ao equilíbrio térmico um corpo deve ter:

$$\psi = \varepsilon \quad (3.1)$$

Onde ψ e ε são absorção e emissividade, respectivamente.

A lei de Planck descreve a quantidade de energia emitida por um corpo negro em função do comprimento de onda e temperatura, segunda a equação 3.2:

$$E_{\lambda,b} = \frac{C_1}{\lambda^5 \left(\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T} - 1\right) \right)} \quad (3.2)$$

Na equação 3.2, C_1 é a primeira constante de radiação de radiação, igual a $2\pi C^2 h$, h é constante de Planck, c é a velocidade da luz, C_2 é a segunda constante de radiação, que é igual $c \cdot h/k$, k é a constante de Boltzman, T é a temperatura e λ o comprimento de onda.

Figura 3.1 - Intensidade da radiação do corpo negro em função do comprimento de onda, [15].

Através da lei de Planck, chega-se à lei de Steffan-Boltzmann:

$$E_b = BT^4 \quad (3.3)$$

Na equação (3.3), acima, descreve-se a energia total emitida por um corpo negro, sendo B a constante de Steffan Boltzmann.

$$E_{cinza} = \varepsilon BT^4 \quad (3.4)$$

Corpo cinza é aquele que emite quantidade iguais de energia em todos comprimentos de onda. Como na termografia infravermelha são usadas pequenas janelas de λ , pode-se tratar a maioria dos objetos como corpo cinza.

A Tabela 3.1, apresenta a emissividade de diferentes materiais. Observa-se que o aço polido tem baixa emissividade. Entretanto, a emissividade das tintas pretas é próxima de 1, comprovando a necessidade da aplicação de uma camada de tinta fosca sobre a superfície de um CP de aço para realização da medição da sua temperatura.

Tabela 3.1 - Emissividade para diferentes materiais.

Material	Emissividade (ε)
Aço inoxidável polido	0.17
Alumínio altamente polido	0.04
Água	0.96
Areia	0.90
Concreto	0.88 – 0.93
Materiais de construção – placas de amianto	0.93 – 0.96
Materiais de construção – tijolo, vermelho	0.93 – 0.96
Materiais de construção – placa de gesso	0.90 – 0.92
Materiais de construção - madeira	0.82 – 0.92
Papel, branco	0.92 – 0.97
Pavimentação de asfalto	0.85 – 0.93
Rochas	0.88 – 0.95
Solo	0.93 – 0.96
Tecido	0.75 – 0.90
Tintas – pretas	0.98
Tintas – branca acrílica	0.90
Cobre polido	0.01
Vidro	0.92
Ferro polido	0.23
Tinta a óleo	0.94

3.2 Termografia Ativa e Passiva [14,15]

A termografia infravermelha pode ser dividida em dois tipos; ativa e passiva. Enquanto na termografia ativa, uma estimulação externa é usada para provocar um fluxo de calor interno no objeto, na termografia passiva nenhuma estimulação é necessária; o calor é gerado pelas deformações causadas pela aplicação de carregamentos.

A termografia ativa monitora o efeito gerado por uma fonte de calor na temperatura da superfície do corpo de prova. Estes fluxos de calor são alterados pela presença de anomalias no interior da peça, como trincas, descontinuidades, concentrações de tensão, como mostrado na Figura 3.2, ocasionando assim contrastes no mapa térmico da superfície em questão.

Figura 3.2 - Aplicação da termografia ativa na detecção de defeitos.

Neste presente trabalho é utilizada a termografia passiva, que é um método que não carece de nenhuma excitação externa, ou seja, a termografia passiva monitora a variação de temperatura da superfície do corpo de prova devida a geração interna de calor, tendo também aplicação na detecção de concentrações de tensões nos componentes, devido ao calor gerado pelos mesmos quando deformados.

O método do TSA é baseado no efeito termoelástico. Aplicado a análise de tensões, é uma técnica de termografia passiva que usa a equação desenvolvida por Lord Kelvin para medir a variação de temperaturas sob um estado de tensões, utilizando uma câmera infravermelha:

$$\Delta T = -\frac{\alpha T}{\rho C_p} (\sigma_1 + \sigma_2) \quad (3.5)$$

onde α é o coeficiente de expansão térmica, T é a temperatura ambiente, ρ a densidade da amostra, C_p capacidade térmica a pressão constante, enquanto σ_1 e σ_2 são tensões principais.

3.3 Termografia Aplicada à Análise de Fadiga

A termografia infravermelha [14], encontra-se dentro do grupo de técnicas conhecidas como ensaios não destrutivos (END), em tempo real e sem contato. Ela permite identificar visualmente a distribuição de temperatura na superfície de um componente mecânico sujeito a carregamentos.

A aplicação da termografia à análise de fadiga está correlacionada com a energia térmica gerada durante a coalescência de discordâncias para a formação de uma trinca de fadiga, fato que leva ao aumento da temperatura no material. No caso de um carregamento acima do limite de fadiga, essa variação de temperatura é significativa e pode ser observada por diferentes métodos experimentais.

Quando o material está submetido a esforços cíclicos, podem ser observadas três fases de temperaturas na superfície do CP; a primeira descreve um breve aumento da temperatura até a estabilização da mesma, onde começa a segunda fase, na qual a temperatura permanece constante e estabilizada e depois uma terceira fase onde há um aumento abrupto de temperatura devido a propagação súbita de uma trinca até a fratura do CP, como mostrado na Figura 3.3.

Figura 3.3 – Apresentação das três fases: A) Teórica [4]; B) Experimental [9].

3.4 Método Risitano

O método denominado de Risitano foi desenvolvido por La Rosa e Risitano [3,4], os quais foram pioneiros na utilização da termografia para determinar o limite de fadiga de seu material.

Quando um material é carregado, sua temperatura sofre uma variação, no caso de carregamentos acima do limite de fadiga, essa variação é considerável.

Para o ensaio só é de interesse conhecer a primeira e a segunda fase, obtendo a temperatura de estabilização para cada patamar de tensão, como mostrado na Figura 3.4.

Figura 3.4 - Gráfico experimental de um policarbonato referente $\Delta T \times N$ em diferentes patamares de tensão, [9].

No método são aplicados diferentes carregamentos no CP, e através da câmera termográfica é medida a variação da temperatura na sua superfície. A partir da medição das temperaturas de estabilização pode-se traçar uma curva da variação de temperatura *versus* tensão aplicada. O limite de fadiga é estimado como o ponto de intercessão entre as duas retas ajustadas pelos dos conjuntos de pontos, os abaixo do limite e os acima do limite, que tem maior inclinação, como demonstrado na Figura 3.5.

Figura 3.5 - Gráfico Temperatura de Estabilização vs Tensão equivalente de Goodman com interseção das retas indicando o limite de fadiga, [9].

Seguindo o método de Risitano, primeiramente, é traçado um diagrama de temperatura *versus* número de ciclos. Quando a tensão aplicada é maior que o limite de fadiga há aumento contínuo da temperatura na primeira fase, após um número baixo de ciclos N_s , o espécime atinge o valor estabilizado ΔT_2 na fase 2 e por último um aumento abrupto da temperatura até a falha na fase 3. Se o carregamento for abaixo do limite de fadiga a variação da temperatura da superfície externa ($\Delta T = T_i - T_0$) é muito pequena.

O método começa com aplicação da tensão σ_i e o aumento da temperatura de estabilização ΔT_{2i} que estão correlacionados, ou seja, quanto maior a tensão σ_i maior será a temperatura de estabilização ΔT_{2i} como pode ser observado na Figura 3.4, a razão de tensões $R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$ e a frequência f permanecendo constantes durante todo o teste.

Com base nesse modelo matemático e estudos experimentais, é possível determinar o limite de fadiga, estabelecer a vida útil do material ou componente mecânico utilizando apenas um CP, mas é recomendado que utilizar um número maior para evitar erros.

3.5 SN com Termografia

Como foi observado e relatado por Risitano e La Rosa em [3], na análise termográfica é possível observar a temperatura de cada zona (pixel por pixel) em toda a superfície do espécime e a evolução da temperatura ao longo do tempo. Em todos os testes pode-se verificar que para tensões acima do limite de fadiga a variação térmica aumenta

durante a primeira fase do teste (fase 1), então permanece praticamente constante até pouco tempo antes da falha (fase 2) e, finalmente a temperatura aumenta abruptamente até a falha.

Em visto disso, Renato Vieira descreveu o conceito do método em [15], “Risitano et al. [4] propôs um método, com base na metodologia para medir o limite de fadiga, para determinar toda a curva de fadiga de um material usando termografia. Este método, mais uma vez, é muito mais rápido do que o método tradicional para exibir esses dados e, teoricamente, apenas um espécime. Na prática, três espécimes são o mínimo recomendado.

A principal ideia por trás desse método é uma abordagem energética ao dano

$$E_c = \int_0^{N_f} E_p dN \quad (3.6)$$

Onde, E_c é a quantidade de energia de deformação micro-plástica para falha por unidade de volume, uma propriedade de material, N_f é o número de ciclos de falha e E_p é a energia devido ao rendimento por unidade de volume por ciclo.

O argumento do equilíbrio de energia é então usado,

$$E_w = E_i + Q \quad (3.7)$$

Equilibrando o trabalho feito sobre o sistema pelo carregamento (E_w), a energia interna armazenada (E_i) e a energia convertida em calor (Q). Supondo que E_i seja pequeno em comparação com Q , e usando os resultados de Risitano, que mostraram que E_w é proporcional ao E_p , os autores de [4] propuseram

$$E_c = \int_0^{T_f} dQ \quad (3.8)$$

Para pequenas variações de temperatura (abaixo de 100K, implica pequenas frequências de carga), o calor transferido da amostra para o ambiente pode ser considerado proporcional à diferença de temperatura $T(n)$. Por isso, Q pode ser avaliado através de um parâmetro Φ , que é a integral da curva T vs N da Figura 3.3: A).

$$Q \propto \Phi \propto E_c \quad (3.9)$$

Com

$$\Phi = \int_0^{N_f} T(n) dN \quad (3.10)$$

Ou, aproximadamente, a soma das áreas abaixo da curva, negligenciando a fase 3, que normalmente é muito rápido.

$$\Phi \approx \frac{\Delta T_2 \cdot N_s}{2} + \Delta T_2 \cdot (N_f - N_s) = constante \quad (3.11)$$

Onde ΔT_2 é a temperatura de estabilização, N_s é o número de ciclos até a temperatura estabilizar e N_f é o número de ciclos até a falha.

Na prática, Φ é usado como um valor crítico (propriedade do material) que levaria uma amostra à falha de fadiga, e as medidas de ΔT_2 e N_s em vários níveis de estresse para uma única amostra poderiam produzir toda a curva de fadiga.

A Figura 3.5 ilustra como o processo de medição ocorre e torna o método fácil de entender.

Figura 3.5 - Procedimento de carregamento escalonado para determinação da integral de Φ , [4].

O espécime é carregado em um modo de caixa de escada, com vários níveis de tensão (σ_i), para cada um desses a N_{si} é medido como indicado na Figura 3.5

$$N_{si} = \frac{\Delta N_i \Delta T_i}{\Delta T_i - \Delta T_{i-1}} \quad (3.12)$$

Onde ΔN_i e ΔT_i são os números de ciclos desde o início do carregamento até a estabilização e a temperatura de estabilização para cada nível, respectivamente.

Para cada σ_i , com os respectivos ΔT_i e N_{si} , supondo que Φ tenha sido previamente medido, a equação 3.11 pode ser usada para determinar N_{fi} (fazendo $\Delta T_2 = \Delta T_i$ e $N_s = N_{si}$), e cada par (N_{fi}, σ_i) é um ponto na curva de fadiga SN do material.

Teoricamente, Φ poderia ser medido dentro da mesma amostra, se fosse levado a falha, só exigiria integrar a curva mostrada na Figura 3.5. Neste trabalho, o valor de Φ foi medido com um espécime de tração CR carregado com um nível de estresse cíclico constante até a falha, e dois espécimes subsequentes foram usados para reunir pontos de dados para a curva de fadiga.”

4. Procedimento Experimental

4.1 Material

O material escolhido para os ensaios foi o aço carbono SAE 1020, que normalmente é utilizado em componentes mecânicos como engrenagens, eixos, virabrequins, colunas, catracas entre muitas outras aplicações.

Os aços SAE 1020 são constituídos basicamente de ferro, carbono, silício e manganês, como pode ser visto na tabela 4.1. Este aço é um dos aços mais utilizados, devido a sua baixa temperabilidade, excelente forjabilidade e soldabilidade.

Tabela 4.1- Composição química do aço SAE 1020 testado, [1].

Elemento	Mn	Si	C	Cr	Cu	Ni
%	0.36	0.24	0.2	0.19	0.1	0.04

Na Tabela 4.2, abaixo, são apresentadas as propriedades mecânicas medidas do aço SAE 1020.

Tabela 4.2 - Propriedades básicas do aço SAE 1020, [1].

Propriedade	Valor	Unidade
Módulo de Young	197	GPa
Limite de Escoamento	313	MPa
Limite de Resistência	490	MPa

No gráfico da Figura 4.1, abaixo, são apresentadas duas curvas Tensão x Deformação para dois espécimes diferentes do mesmo aço SAE 1020.

Figura 4.1 - Curvas de Tensão x Deformação dos testes de tensão de dois espécimes, [1].

A disponibilidade do aço SAE 1020 no laboratório de Fotomecânica da PUC-Rio foi decisivo na sua escolha para o trabalho, pois além de haver resultados de trabalhos anteriores disponíveis [1], também haviam diversos CP's disponíveis para serem testados.

4.2 Geometria Corpo de Prova

Os espécimes utilizados neste trabalho são de acordo com a norma ASTM E606M-12, foram retirados e usinados de uma placa plana de aço SAE 1020, suas dimensões são mostradas nas Figuras 4.2 e 4.3.

Figura 4.2 - Dimensões do corpo de prova cilíndrico de acordo com a norma ASTM E606M-12, [1].

Para otimizar a emissão de radiação descrito no item 3.1, o espécime foi pintado por uma tinta Spray Multi Uso Suvinil cor preto fosco, como pode ser visto na Figura 4.3.

Figura 4.3 - A esquerda o espécime pintado para uma maior emissão de radiação e a direita o espécime sem a tinta.

4.3 Isolamento térmico

O isolamento térmico é de extrema importância para que não haja interferências externas na aquisição de dados de temperatura, pois a aproximação de pessoas, intensidade luminosa, funcionamento de outros equipamentos, dentre outros podem afetar o experimento, uma vez que essas também são fontes emissoras de calor e podem interferir na realização do ensaio.

Para isto foram utilizadas placas de madeira e sacos plásticos como uma camada protetora em volta do ensaio, como pode ser visto na Figura 4.4.

Figura 4.4 - Isolamento térmico no aparato experimental.

4.4 Equipamentos Utilizados nos Ensaios

4.4.1 Câmera Infravermelha

A câmera utilizada para o experimento foi a FLIR A655sc, Figura 4.5, que possui uma resolução de 640x480 LWIR com pixels de 17 microns, janela de plano focal FPA e frequência de 50 Hz.

Figura 4.5 - Câmera FLIR A655sc, [16].

4.4.2 Máquina para Aplicação de Carregamento Cíclico

A máquina de atuador hidráulico para aplicação de cargas foi a MTS 311.31, Figura 4.6, com a capacidade de 1000 kN para ensaios estáticos e dinâmicos.

O atuador hidráulico dispõem de um sistema completo automatizado com interfaces que possibilitam medições de carga, aquisição e armazenamento dos dados de modo que todo processo possa ser gerenciado automaticamente.

Figura 4.6 – A) Máquina servo-hidráulica para ensaios universais MTS 311.31; B) interface computacional da máquina.

5. Resultados e Discussões

5.1 Medição do Limite de Fadiga Utilizando a Termografia

Neste projeto, 20 espécimes foram submetidos a carregamentos cíclicos com controle de tensão. Os resultados de 15 testes com razões de carregamentos $R=0.1$, $R=-1$ e frequências de 5, 15 e 25 Hz estão referenciados em [1,17], sendo que os resultados de outros 3 testes com razão $R=0.1$ e frequência de 15 Hz estão referenciados em [1,17]. O presente trabalho ensaiou 2 espécimes com razões $R=-1$, $R=0.5$ e frequências de 15 e 6 Hz.

Os testes foram realizados usando uma máquina hidráulica MTS 311.3. A câmera FLIR A655sc foi usada para medir e registrar a temperatura na superfície dos CP's a cada 5000 ciclos.

Todos os dados dos 20 espécimes foram trabalhados para este projeto, afim de realizar o estudo do limite de fadiga do material. Nas Figuras 5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5 são mostrados os gráficos de temperatura *versus* tensão aplicada e valores das razões R , as frequências aplicadas e os valores dos limites de resistência S_L encontrados por meio das intercessões das retas que ajustam os resultados experimentais (valores de S_L para cada CP estão mostrados na tabela 5.1).

Figura 5.1 - Gráficos de Variação Térmica vs Tensão para os CP 1, CP 2, CP 3 e CP 4.

Figura 5.2 - Gráficos de Variação Térmica vs Tensão para os CP 5, CP 6, CP 7 e CP 8.

Figura 5.3 - Gráficos de Variação Térmica vs Tensão para os CP 9, CP 10, CP 11 e CP 12.

Figura 5.4 - Gráficos de Variação Térmica vs Tensão para os CP 13, CP 14, CP 15 e CP 16.

Figura 5.5 - Gráficos de Variação Térmica vs Tensão para os CP 17, CP 18, CP 19 e CP 20.

Tabela 5.1 - Tabela com os valores das razões, frequências e limite de fadiga.

CP	R	f (Hz)	SL (MPa)
1	0.1	5	169.06
2	0.1	5	178.63
3	0.1	5	202.11
4	0.1	5	188.22
5	0.1	15	161.34
6	0.1	15	164.30
7	0.1	15	161.00
8	0.1	15	177.71
9	0.1	15	177.40
10	0.1	15	178.29
11	0.1	15	179.51
12	0.1	25	178.78
13	0.1	25	177.95
14	-1	15	246.75
15	-1	15	225.62
16	-0.5	15	230.72
17	-0.5	15	219.37
18	-0.5	15	226.87
19	-1	15	243.12
20	0.5	6	112.10

A partir desses dados da tabela 5.1, calculou-se a média do limite de fadiga para cada razão. Os valores podem ser visto na tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Valores médios do limite de fadiga para as respectivas razões.

R	S _L Médio (MPa)
-1	238.50
-0.5	225.65
0.1	176.48
0.5	112.10

Para cada razão R aplicada foram calculados valores das tensões alternadas (σ_a) e médias (σ_m). Para a razão R=-1, os pontos (σ_m , σ_a) foram plotados num gráfico tensão alternada vs tensão média.

Por esses pontos experimentais ajustou-se uma curva $\frac{\sigma_a}{S_L} + \left(\frac{\sigma_m}{S_u}\right)^\beta = 1$, onde S_L é o limite da resistência à fadiga, S_u é a resistência à tração e β é o expoente de ajuste. Pode-se perceber que os pontos dos ensaios termográficos ficaram bem ajustados para o expoente calculado igual 1.628, que está entre os expoentes de Goodman igual 1 e Gerber igual a 2.

Figura 5.6 - Gráfico Tensão Alternada x Tensão Média para Gerber, Goodman e termográfica.

5.2 Experimento de Medição da Curva SN Utilizando a Termografia

Implementando a metodologia de Risitano combinada com o método tradicional para a curva SN, foi possível através dos dados de N_f e S_L obtidos para cada espécime traçar a curva SN, como pode ser visto na Figura 5.7, para diferentes razões de carregamentos e patamares superiores aos limites de fadiga vistos na tabela 5.1.

Para verificar a validade da curva SN em escala logarítmica de base 10 obtida na Figura 5.7, uma curva teórica para $R=-1$ (considerando S_L igual a $0.5S_u$ e S_{10^3} igual a $0.7S_u$) foi adicionada ao gráfico para efeito de comparação com os pontos obtidos experimentalmente.

Apesar de alguns espécimes possuírem pontos com vida útil maior que 10^6 ciclos, no gráfico somente foram inseridos pontos entre o intervalo de 10^3 e 10^6 ciclos.

Após os pontos experimentais para todos os R 's serem plotados no gráfico da Figura 5.7, foram determinadas linhas de tendência para as respectivas razões.

Figura 5.7 - Curva SN para diferentes razões.

Com intuito de plotar curvas σ_a vs σ_m para diversas vidas (10^3 , 10^4 , 10^5) extrapolaram-se as curvas SN traçadas anteriormente e determinaram-se os pontos referentes a estas vidas para serem plotados no gráfico σ_a vs σ_m . Na figura 5.8 são apresentadas as curvas ajustadas para as vidas de 10^3 , 10^4 , 10^5 e vidas consideradas infinitas que levam em consideração o efeito da tensão média usando o valor $\beta = 1.628$.

Posteriormente, traçaram-se retas para as razões de $R=-1$, -0.5 , 0.1 , 0.5 , 1 que interceptaram as curvas referentes a estas vidas. Os valores de σ_a referentes a estes pontos de intersecção foram replotados no gráfico SN.

Figura 5.8 - Curva de Tensão Alternada vs Tensão Média para diferentes vidas.

Para efeito de comparação, o gráfico abaixo apresenta as curvas ajustadas aos dados experimentais (Figura 5.7) e as novas curvas SN recalculadas, com base nas inclinações das retas das razões da Figura 5.8, para as vidas de 10^3 , 10^4 , 10^5 e vida infinita.

Figura 5.9 - Gráfico SN com curvas experimentais e ajustadas para diferentes razões

Pode-se notar que as curvas replotadas calculadas usando $\beta = 1.628$ estão bem ajustadas com relação às curvas originais. Entretanto, há uma distorção razoável na curva de razão igual a 0.1. Isto pode ter ocorrido porque alguns resultados de CP's apresentaram limites de fadiga diferentes em aproximadamente 10 MPa do valor da resistência à fadiga média ($S_L = 176.48$).

A Figura 5.10. mostra as novas curvas ajustadas plotadas para comparação com os pontos experimentais de cada razão.

Figura 5.10 - Curva SN com curvas reajustadas combinadas com os pontos experimentais de cada razão.

6. Conclusão

O método de termografia infravermelha originalmente proposto por Risitano e coautores [3,4], apesar de ser recente em comparação aos métodos tradicionais, vem acumulando dados e resultados positivos que incentivam a utilização da técnica para sua aplicação à fadiga.

A termografia infravermelha foi aplicada para determinar o limite à resistência à fadiga e a curva SN do aço SAE 1020.

Neste trabalho foi possível comprovar que o método de Risitano e coautores é confiável como ferramenta para a determinação da curva SN e da resistência à fadiga para prever a vida útil do material aço carbono.

7. Referência Bibliográfica

- [1] Alarcón, M. V. G.: “Short fatigue cracks departing from elongated notched specimens and their effect on fatigue limit”. PUC – Rio, 2017.
- [2] Ted, A. L.: “Fracture Mechanics – Fundamentals and Applications. Second Edition”. Department of Mechanical Engineering Texas A&M Univesertiy.1995.
- [3] La Rosa, G.. Risitano, A.: “Thermographic methodology for rapid determination of the fatigue limit of materials and mechanical componentes”. International Journal of Fatigue 22 (2000) 65–73.
- [4] Fargione, G.. Geraci, A.. La Rosa, G.. Risitano, A.: “Rapid determination of the fatigue curve by the thermographic method”. International Journal of Fatigue 24 (2002) 11–19.
- [5] Krstulovic-Opara, L.: “Application of Thermography in Analysis of Fatigue Strength of Material and Structures”. Disponível em: < <http://hrcak.srce.hr/file/219012>>. Acessado em 16/05/2017.
- [6] Risitano, A.. Risitano, G.: “Cumulative damage evaluation of steel using infrared thermography”. Theoretical and Applied Fracture Mechanics. Volume 54, Issue 2, October 2010, Pages 82-90.
- [7] Risitano, A.. Fargione, G.. Guglielmino, E.: “Definition of the linearity loss of the surface temperature in static tensile tests”. A. Risitano et alii, Frattura ed Integrità Strutturale, 30 (2014) 201-210; DOI: 10.3221/IGF-ESIS.30.26.
- [8] Risitano, G.. Risitano, A.. Clienti, C.: “Determination of the fatigue limit by semi static tests”. G. Risitano et alii, Convegno Nazionale IGF XXI, Cassino (FR), Italia, 13-15 Giugno 2011, 322 – 330.
- [9] Rainer Brokamp Manhães, P.: “Estudo da fadiga em Policarbonato com uso da termografia”. PUC – Rio. 2016.
- [10] Fargione, G.. Tringale, D.. Guglielmio, E.. Risitano, G.: “Fatigue characterization componentes in servisse”. G. Fargione et alii, Frattura ed Integrità Strutturale, 26 (2013) 143-155; DOI: 10.3221/IGF-ESIS.26.14.
- [11] Micone, G.. De Waele, W.: “On the Application of Infrared Thermography and Potential Drop for the Accelerated Determination of an SN Curve”. Experimental Mechanics (2017) 57:143–153.
- [12] Bichara Vieira, R.: “Termography Applied to the Study of Fatigue in Polycarbonate”. PUC – Rio. 2016.

- [13] Castro. J. T. P. D.; Meggiolaro. M. A.: “Fadiga – Técnicas e Práticas de Dimensionamento Estrutural sob Cargas Reais de Serviço. Volume I – Iniciação de Trincas.” CreateSpace. 2009.
- [14] Rodríguez, F.J.L: “Detecção de defeitos em materiais cerâmicos usando a termografia”. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. 2010.
- [15] Vieira, R.: “Termografia aplicada a análise experimental de tensões”. PUC-Rio. Acessado 14/06/2017.
- [16] Galeria de imagens da câmera termográfica FLIR A655sc. Disponível em: <http://www.flir.com/science/display/?id=46802>>. Acessado em 06/06/2017.
- [17] M.V. Guamán A.1, J.T.P. Castro1, R.B. Vieira1, V.E.L. Paiva1, and J.L.F. Freire1a: “Fatigue Limit Assessment of a Low Carbon Steel using Dixon's Up-And-Down and Infrared Thermography Methods”. Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro, PUC-Rio. 2017.