

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA  
DO RIO DE JANEIRO



**Gustavo Ferreira Lemos**

**Estudo da Fadiga em Aço SAE 1020 com o uso  
da Termografia**

**Projeto de Graduação**

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia  
Mecânica da PUC-Rio

**Orientador**

Prof. José Luiz de França Freire

**Coorientador**

Vitor Eboli Lopes Paiva

Rio de Janeiro

Dezembro 2017

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao meu orientador, José Luiz de França Freire, por compartilhar todo seu valioso conhecimento e abrir as portas do laboratório de Fotomecânica da PUC-Rio, me ajudando decisivamente a trilhar o caminho deste trabalho de conclusão de curso.

Ao meu coorientador, Vitor Eboli Lopes Paiva, por sanar minhas dúvidas, me ajudar nos ensaios e iluminar todo o caminho que já foi trilhado e desenvolvido nessa linha de pesquisa até então, sempre que precisei.

À minha família, que me apoiou durante todos esses anos e aos meus avós, que desempenharam um papel fundamental nesses últimos anos: cederam-me um espaço em sua casa e tornaram do seu lar um ambiente de estudo em virtude da minha faculdade, para que eu pudesse estudar.

À minha namorada, Aurora Meirelles Laureano e toda sua família que, nesses últimos anos, mudaram minha perspectiva de vida, me ajudando a ser uma pessoa melhor e mais equilibrada. Assim, me ajudando não só na conclusão deste trabalho, mas em quase toda minha graduação, involuntariamente.

A todos meus amigos da PUC nesses tantos momentos de aprendizado e dedicação, compartilhando conhecimento e ajudando uns aos outros. Não poderia deixar de citar os meus amigos mais chegados Isabel Camerini, Brenno Koelblinger, Lucas Silva, Maria Eduarda Pfeiffer, Juliana Emery, Thiago Ramos, João Henrique Lima, André Baronowski, entre muitos outros.

Sem todos esses fatores alinhados nada seria possível. Sou grato a tudo e a todos.

## **RESUMO**

### **Estudo da Fadiga em Aço 1020 com o uso da Termografia**

Tendo em vista a importância de das propriedades mecânicas dos materiais em termos de projeto de engenharia, o trabalho em questão tem por finalidade a obtenção da propriedade mecânica relacionada à área da fadiga, chamada de limite de fadiga, fazendo uso da técnica da termografia infravermelha. Essa propriedade foi estudada em aços carbono SAE 1020 por meio de métodos termográficos como o método Risitano cíclico e estático e o método de Luong. Este estudo foi feito utilizando-se de cargas compressivas cíclicas, cujas razões de tensão foram iguais a  $R=2$ ,  $R=7,7$ ,  $R=-3$  e cargas estáticas. No total foram realizados nove ensaios, dos quais seis cíclicos, dois estáticos trativos e um de compressivo. Foi estudada também a flambagem, visto a natureza compressiva dos carregamentos utilizados nos ensaios. Todos os resultados foram comparados entre si e comparados também a referências bibliográficas, continuando a linha de pesquisa que vem sendo desenvolvida no laboratório de Fotomecânica da PUC-Rio.

Palavras chaves: Termografia infravermelha, fadiga, limite de fadiga, método de Luong, método Risitano, aço SAE 1020.

## **ABSTRACT**

### **Study of Fatigue in Steel 1020 with the use of Thermography**

Considering the importance of the mechanical properties of the materials in terms of engineering design, the work in question has the purpose of obtaining the mechanical property related to the area of fatigue, called the fatigue limit, using infrared thermography technique. This property was studied in SAE 1020 carbon steels by thermographic methods such as the Risitano cyclic and static method and the Luong method. This study was carried out using cyclic compressive loads, whose stress ratios were equal to  $R = 2$ ,  $R = 7.7$ ,  $R = -3$  and static loads. In total, nine tests were performed, of which six were cyclic, two static and one compressive. The buckling was also studied, considering the compressive nature of the loads used in the tests. All the results were compared among themselves and also compared to bibliographical references, continuing the line of research that has been developed in the Photomechanical laboratory of PUC-Rio.

Key-words: Infrared Thermography, fatigue, fatigue limit, Luong's Method, Risitano's method, SAE 1020 steel.

## Sumário

1	Introdução.....	13
1.1	Objetivo .....	14
1.2	Revisão Bibliográfica .....	14
2	Termografia Infravermelha.....	22
2.1	Princípios Físicos .....	23
2.2	Termografia Ativa e Passiva.....	26
2.3	Métodos Termográficos de Análise de Fadiga.....	26
2.3.1	Cíclicos.....	26
2.3.2	Estáticos.....	29
3	Flambagem.....	31
3.1	Elástica.....	31
3.2	Inelástica .....	35
4	Procedimento Experimental .....	36
4.1	Material .....	36
4.2	Geometria .....	38
4.3	Máquinas dos Ensaios .....	38
4.4	Câmera Infravermelha.....	40
4.5	Isolamento.....	40
5	Resultados e Discussões.....	42
5.1	Métodos Cíclicos .....	44
5.2	Estático .....	57
5.3	Flambagem .....	62
6	Conclusão.....	67
7	Referências.....	68

## Lista de figuras

Figura 1.1 - Aumento de temperatura em uma amostra de aço recozido C70. ....	15
Figura 1.2 - Variação térmica no ponto sem entalhe do espécime. ....	17
Figura 1.3 - Evolução da temperatura versus tensão aplicada durante um teste estático.....	18
Figura 1.4 - Limite de fadiga obtido em testes estáticos e de fadiga. ....	19
Figura 2.1 - Caixa de disjuntores sendo visualizada a partir de uma câmera de termografia infravermelha, acusando um possível defeito por meio da variação de temperatura ( <a href="http://mixeiletrica.com.br/wp-content/uploads/2016/08/Termografia-300x300.png">http://mixeiletrica.com.br/wp-content/uploads/2016/08/Termografia-300x300.png</a> , acessado 19/11/2017).....	22
Figura 2.2 - Gráfico da intensidade da radiação em função do comprimento de onda, mostrando Lei de Planck para várias curvas de nível de temperatura ( <a href="https://chriscolose.files.wordpress.com/2010/02/planck_black-body_radiation.png">https://chriscolose.files.wordpress.com/2010/02/planck_black-body_radiation.png</a> , acessado 20/11/2017).....	24
Figura 2.3 - (A) Desenho explicitando as 3 fases [3]. (B) Aumentos térmicos máximos em espécimes sob fadiga carregando em diferentes tensões aplicadas entre 215 e 275 MPa. As tensões aplicadas ( $\Delta\sigma = \sigma_{máx} / 2$ , $R = 0$ ) são indicados em MPa na legenda. As três fases são mostradas para o teste realizado a 245 Mpa [2]. ....	27
Figura 2.4 - Gráfico do teste cíclico 3 indicando os pontos nos patamares com aproximadamente a mesma temperatura de estabilização (quadrados) e patamares com gradual aumento na temperatura de estabilização (losango) com a reta traçada no método Risitano [2].....	28
Figura 2.5 - Gráfico do teste cíclico 3 indicando os pontos nos patamares com aproximadamente a mesma temperatura de estabilização (quadrados), os patamares com gradual aumento na temperatura de estabilização (losango), ambos com retas traçadas....	29
Figura 2.6 - Desenho esquemático da tensão aplicada e a variação de temperatura, durante um ensaio estático [5]. ....	30
Figura 3.1 - Desenho esquemático explicitando todas as formas de flambagem e os valores de $K$ teóricos e recomendados ( <a href="https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/a/a2/ColumnEffectiveLength.png/600px-ColumnEffectiveLength.png">https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/a/a2/ColumnEffectiveLength.png/600px-ColumnEffectiveLength.png</a> , acessado 24/11/2017).....	32
Figura 3.2 - Gráfico da curva de Euler para flambagens elásticas.....	34
Figura 3.3 - Gráfico reproduzido de [17] da continuação da curva elástica de Euler (D-C) até o limite inelástico da flambagem (A-C). ....	35
Figura 4.1 - Curva tensão deformação de engenharia de dois espécimes de aço SAE 1020 obtidas em ensaios de tração. ....	37

Figura 4.2 - Curva tensão deformação de engenharia de um espécime de aço SAE 1020 obtidas em ensaio de compressão. ....	37
Figura 4.3 - Geometria dos CPs utilizado nos testes [12].....	38
Figura 4.4 - (A) Máquina de Ensaio Universais modelo MTS 311.31 e (B) sua interface computacional. ....	39
Figura 4.5 - Máquinas de ensaios Instron 5500R. ....	39
Figura 4.6 - Câmera termográfica FLIR A655sc [11]. ....	40
Figura 4.7 - Isolamento térmico utilizado nos ensaios. ....	41
Figura 4.8 – Ao lado esquerdo um CP com a tinta preta aplicada e à direita um CP sem [12]. ....	41
Figura 5.1 - CPs após os testes. ....	42
Figura 5.2 - Coordenadas cilíndricas aplicada em $R$ e $R_s$ . ....	43
Figura 5.3 - (A) Gráfico de $R$ em função de $\theta$ . (B) Gráfico de $R_s$ em função de $\theta$ .....	43
Figura 5.4 – Gráfico $\Delta T \times N$ apresentando o comportamento do Teste cíclico 1. ....	44
Figura 5.5 - Gráfico $\Delta T \times N$ apresentando o comportamento do Teste cíclico 2. ....	45
Figura 5.6 - Gráfico $\Delta T \times N$ apresentando o comportamento do Teste cíclico 3. ....	45
Figura 5.7 - Gráfico $\Delta T \times N$ apresentando o comportamento do Teste cíclico 4. ....	46
Figura 5.8 - Gráfico $\Delta T \times N$ apresentando o comportamento do Teste cíclico 5. ....	46
Figura 5.9 - Gráfico $\Delta T \times \sigma a$ indicando os valores para o limite de fadiga ( $SL$ ) de Risitano (em verde) e de Luong (em vermelho), para o teste cíclico 1. ....	49
Figura 5.10 - Gráfico $\Delta T \times \sigma a$ indicando os valores para o limite de fadiga ( $SL$ ) de Risitano (em verde) e de Luong (em vermelho), para o teste cíclico 2. ....	49
Figura 5.11 - Gráfico $\Delta T \times \sigma a$ indicando os valores para o limite de fadiga ( $SL$ ) de Risitano (em verde) e de Luong (em vermelho), para o teste cíclico 3. ....	50
Figura 5.12 - Gráfico $\Delta T \times \sigma a$ indicando os valores para o limite de fadiga ( $SL$ ) de Risitano (em verde) e de Luong (em vermelho), para o teste cíclico 4. ....	50
Figura 5.13 - Gráfico $\Delta T \times \sigma a$ indicando os valores para o limite de fadiga ( $SL$ ) de Risitano (em verde) e de Luong (em vermelho), para o teste cíclico 5. ....	51
Figura 5.14 - Gráfico $\Delta T \times N$ apresentando o comportamento do Teste cíclico 6. ....	53
Figura 5.15 - Gráfico $\Delta T \times \sigma a$ indicando os valores para o limite de fadiga ( $SL$ ) de Risitano (em verde) e de Luong (em vermelho), para o teste cíclico 6. ....	54
Figura 5.16 - Resumo dos resultados de Risitano, Luong, flambagem e fadiga, juntos às curvas de Goodman, Gerber e aos resultados referentes à [20]. ....	55
Figura 5.17 - Pontos no diagrama $\sigma a \times \sigma m$ para o lado compressivo, segundo Dowling [21] e Juvinall [20], mostrados em (A) e (B), respectivamente.....	55

Figura 5.18 - Desenho esquemático do resultado do teste cíclico 5, mostrando a região dos patamares sugestionados, em elipses azuis, e a região dos patamares que devem ser evitados, demarcada pelo círculo vermelho. ....	56
Figura 5.19 - Gráfico tensão deformação do CP1. ....	57
Figura 5.20 - Gráfico tensão deformação do CP2, relevando as deformações residuais. ....	58
Figura 5.21 - As curvas azuis e cinza correspondem à temperatura, sendo que a azul é considerada a sua fase linear e a cinza o resto da curva. A curva vermelha corresponde à tensão. (CP estático 1). ....	59
Figura 5.22 - As curvas azuis e verde correspondem à temperatura, sendo que a azul é considerada a sua fase linear e a verde o resto da curva. A curva vermelha corresponde à tensão. (CP estático 2 – Parte 1 (1%)). ....	59
Figura 5.23 - As curvas azuis e verde correspondem à temperatura, sendo que a azul é considerada a sua fase linear e a verde o resto da curva. A curva vermelha corresponde à tensão. (CP estático 2 – Parte 2 (1%)). ....	60
Figura 5.24 - As curvas azuis e verde correspondem à temperatura, sendo que a azul é considerada a sua fase linear e a verde o resto da curva. A curva vermelha corresponde à tensão. (CP estático 2 – Parte 3 (1%)). ....	60
Figura 5.25 - As curvas azuis e verde correspondem à temperatura, sendo que a azul é considerada a sua fase linear e a verde o resto da curva. A curva vermelha corresponde à tensão. (CP estático 2 – Parte 4 (3%)). ....	61
Figura 5.26 - As curvas azuis e verde correspondem à temperatura, sendo que a azul é considerada a sua fase linear e a verde o resto da curva. A curva vermelha corresponde à tensão. (CP estático 2 – Parte 5 (5%)). ....	61
Figura 5.27 - Gráfico com a curva de Euler (para colunas curtas) até seu limite elástico junto às tensões críticas reais de flambagem, limite de resistência do material, hipérbole e reta interpolada para a região de coluna intermediária e reta horizontal para colunas curtas. ....	66



## Lista de tabelas

Tabela 2.1 - Emissividade para diversos materiais [12]. .....	25
Tabela 4.1 - Composição do aço utilizado nos testes [12]. .....	36
Tabela 4.2 - Propriedades do aço utilizado nos testes extraídos de ensaios de tração e compressão. ....	36
Tabela 5.1 – Resultados numéricos para o teste 1 .....	47
Tabela 5.2 - Resultados numéricos para o teste 2. ....	47
Tabela 5.3 - Resultados numéricos para o teste 3. ....	47
Tabela 5.4 - Resultados numéricos para o teste 4. ....	48
Tabela 5.5 - Resultados numéricos para o teste 5. ....	48
Tabela 5.6 - Resultado do limite de fadiga ( $SL$ ) para cada corpo de prova testado segundo o método Risitano e o método de Luong e os seus erros relativos. ....	51
Tabela 5.7 - Média dos resultados do limite de fadiga ( $SL$ ) para cada razão $R$ de tensão corpo de prova testado segundo o método Risitano e o método de Luong e os seus erros relativos. ....	52
Tabela 5.8 - Resultados numéricos para o teste 6. ....	53
Tabela 5.9 - Resultados para o limite de fadiga $SL$ dos ensaios estáticos, analisados pelo método Risitano, e das referências [19], obtidos pelo método de Luong. ....	62
Tabela 5.10 - Dados iniciais e finais dos corpos de prova ensaiados dinamicamente. ....	63
Tabela 5.11 - Resumo de todos os resultados obtidos nos testes referentes à flambagem. ....	64

## Lista de abreviaturas e siglas

TSA	Thermoelastic Stress Analysis
CP	Corpo de Prova
SAE	Society of Automotive Engineers
DIC	Digital Image Correlation
SFRP	Secreted Frizzled-Related Protein
SN	Stress Number of cycles

## Lista de símbolos

$I_{cn}$	Energia espectral irradiada de um corpo negro
$I_{obj}$	Energia espectral irradiada de um objeto
$\lambda$	Comprimento de onda e coeficiente de esbeltez
$T$	Temperatura
$h$	Constante de Planck
$c$	Velocidade da luz no vácuo
$\kappa$	Constante de Boltzmann
$\epsilon$	Emissividade
$\epsilon_{cn}$	Emissividade de um corpo negro perfeito
$\epsilon_{obj}$	Emissividade de um objeto
$\alpha$	Coeficiente de expansão térmica
$T_0$	Temperatura de referência (ambiente)
$\rho$	Massa específica e Raio da coordenada cilíndrica no diagrama $\sigma_a \times \sigma_m$
$C_p$	Calor específico à pressão constante
$\sigma_1$	Tensão principal máxima
$\sigma_2$	Tensão principal mínima
$E$	Módulo de Young
$A$	Área da seção transversal
$P_{cr}$	Carga crítica de flambagem
$I$	Momento de inércia de área
$L_{ef}$	Comprimento efetivo de colunas
$L$	Comprimento da coluna
$S_{cr}$	Tensão crítica de flambagem

$\Delta\sigma$	Gama de tensões
$S_L$	Limite de fadiga
$k$	Fator do comprimento efetivo de flambagem
$r$	Raio de giração
$\lambda_{ef}$	Coeficiente de esbeltez efetivo
$S_{pl}$	Limite de proporcionalidade
$S_y$	Limite de escoamento
$\lambda_{pl}$	Coeficiente de esbeltez do limite de proporcionalidade
$\lambda_{cr}$	Coeficiente de esbeltez
$S_u$	Limite de resistência compressivo
$d_0$	Diâmetro inicial
$I_0$	Momento de inércia de área inicial
$A_0$	Área inicial
$d_{real}$	Diâmetro final
$d$	Diâmetro
$I_{real}$	Momento de inércia de área final
$A_{real}$	Área final
$r_0$	Raio de giração inicial
$r_{real}$	Raio de giração final
$\lambda_y$	Coeficiente de esbeltez do limite de escoamento
$\lambda_u$	Coeficiente de esbeltez do limite de resistência
$\sigma_{cr}$	Tensão crítica de flambagem
$P_{cry}$	Carga crítica do limite de escoamento
$P_{cr_u}$	Carga crítica do limite de resistência segundo Euler
$\sigma_{cry}$	Tensão crítica do limite de escoamento
$\sigma_{cr_u}$	Tensão crítica do limite de resistência segundo Euler
$P_{cr_{real}}$	Carga crítica real
$\sigma_{cr_{real}}$	Tensão crítica real, razão entre carga crítica real e área real
$\sigma_{cr_0}$	Tensão crítica real, razão entre carga crítica real e área inicial
$C_1$	Constante hiperbólica
$n$	Constante exponencial da hipérbole
$C_2$	Coeficiente angular da reta interpolada

$C_3$	Coeficiente linear da reta interpolada
$\sigma_{hip}$	Interpolação hiperbólica da tensão crítica para colunas intermediárias
$\sigma_{reta}$	Interpolação linear da tensão crítica para colunas intermediárias
$T_{est}$	Temperatura de estabilização
$\Delta T_{est}$	Variação de temperatura estabilizada
$R$	Razão entre a tensão mínima sobre a máxima
$\sigma_{mín}$	Tensão mínima
$\sigma_{máx}$	Tensão máxima
$\sigma_a$	Tensão alternada
$t$	Tempo
$\theta$	Ângulo no diagrama $\sigma_a \times \sigma_m$
$S_{uc}$	Limite de resistência compressivo

# 1 Introdução

Entrando na concepção do tema, primeiro é preciso ter em mente a relevância desse assunto perante a engenharia. Fadiga é um tipo de falha mecânica causada pela repetição de cargas variáveis, cuja principal característica é gerar e/ou propagar paulatinamente uma trinca, até a eventual fratura da peça [1]. A Fadiga é a falha mecânica de maior incidência, estando presente em mais de 90% das falhas mecânicas ocorridas. Dessa forma, seu estudo é de suma importância para prever a vida de um componente mecânico em serviço, iniciação e propagação de trincas e todos os efeitos que modificam o comportamento do material, como acabamento, tamanho, carregamento, temperatura, tamanho de trinca, entre outros.

Por ora, é preciso evidenciar também a importância do material estudado em questão, o aço, este material com características tão peculiares, como condução elétrica e térmica, revolucionou as técnicas de construção civil e viabilizou a criação das máquinas principalmente por, diferentemente das cerâmicas, resistir não só aos esforços compressivos, mas também principalmente aos esforços trativos. Isto é notório apenas visualizando as construções de civilizações antigas, como, por exemplo, na Roma antiga: Por não haver ainda técnicas que empregassem o uso dos metais na construção, as edificações normais praticamente não passavam de 3 andares de altura. Isto ocorre, pois a cerâmica, material utilizado na época, não resiste bem à tração, apenas à compressão. O coliseu foi criado com vigas em forma de arco justamente para desviar dos esforços trativos e atender a única demanda possível de esforços, que são os compressivos.

A introdução recente, em meados dos anos 1970, do uso da termografia no estudo da fadiga é um marco importante, pois viabiliza a aquisição de dados térmicos com considerável confiabilidade, possibilitando a obtenção da temperatura à cerca do material analisado de uma forma rápida. Dessa maneira, são viabilizados estudos térmicos perante o comportamento dos materiais postos em serviço com primor.

Como foi estudada a fadiga em espécimes sujeitos a cargas compressivas, o estudo da flambagem é iminente, visto o efeito de instabilidade provocado por essas cargas axiais em colunas esbeltas.

## 1.1 Objetivo

Como nos estudo da fadiga são normalmente analisados os efeitos das tensões trativas no diagrama  $\sigma_a \times \sigma_m$ , nesse presente trabalho serão estudados os efeitos dos esforços compressivos na fadiga, com o uso da termografia empregando métodos térmicos como o método de Risitano cíclico e estático e método de Luong. A meta é analisar o limite de fadiga ( $S_L$ ) do aço SAE 1020 para diferentes razões de tensões ( $R = \sigma_{min}/\sigma_{max}$ ), abrangendo tensões compressivas e verificando seu comportamento por meio desse diagrama. É objetivo também comparar os diferentes métodos térmicos de determinação do limite de fadiga e realizar um estudo da flambagem, elástica e inelástica, ocorridas nos corpos de prova (CPs) testados em compressão.

## 1.2 Revisão Bibliográfica

Nesta seção será apresentada uma revisão dos trabalhos mais atuais e mais relevantes no campo da termografia aplicada ao estudo da fadiga, englobando artigos, dissertações, teses e trabalhos dessa área.

Este trabalho é uma continuação da linha de pesquisa que vem sido desenvolvida no laboratório de Fotomecânica da PUC-Rio, orientado pelo professor José Luiz de França Freire.

### 1.2.1 “Thermographic methodology for the rapid determination of the fatigue limit of materials and mechanical componentes”

Em [2], **G. La Rosa e A. Risitano** propuseram um método para determinação do limite de fadiga. Sabendo do aumento da temperatura dos materiais quando sujeitos a carregamentos cíclicos e que, quando estes carregamentos superiores a resistência à fadiga do material, o aumento da temperatura se torna ainda mais acentuado.

Com o uso da termografia infravermelha como instrumento de medição da temperatura, mediu-se o incremento térmico de um aço recozido C70 (UNI-3545-68) de seção transversal retangular (2 mm x 9 mm, com comprimento de 60 mm) sem entalhes, testado sob carregamento senoidal ( $\sigma_{max}=550$  MPa,  $R=0$ ) de 75 Hz em

uma máquina trativa-compressiva de ensaios mecânicos (Amsler 10 HPF 422), vide figura abaixo:

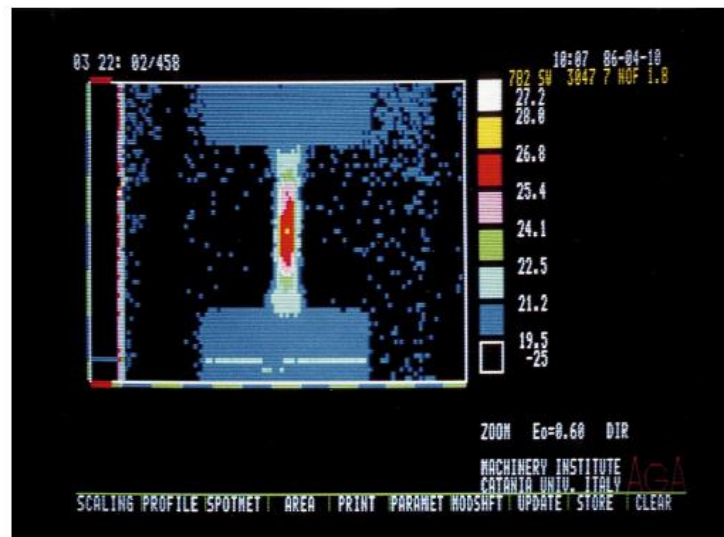


Figura 1.1 - Aumento de temperatura em uma amostra de aço recozido C70.

Assim, a partir do incremento da temperatura  $\Delta T$ , que mede a variação de temperatura ponto mais quente do corpo de prova em relação ao ambiente, mediu-se o limite de fadiga do material. Esse método foi chamado de método Risitano e também apresenta informações sobre a energia retida nos espécimes ou componentes mecânicos.

### 1.2.2 “Rapid determination of the fatigue curve by the thermographic Method”

Em [3], **G. Fargione, A. Geraci, G. La Rosa, A. Risitano** apresentam um rápido método para a determinação do limite de fadiga e parâmetros dinâmicos da mecânica das trincas, relativos à micro-mecânica do material.

Seguindo com o uso do método da termografia como principal método e análise, foram determinados os parâmetros mecânicos dos materiais comumente usados na indústria, entretanto apresentando um novo procedimento para a determinação da curva de fadiga SN (curva de Wöhler).

Assim, foi validada a hipótese de que a falha por fadiga ocorre quando a energia plástica de deformação do material alcança um valor constante, o que é uma característica dos materiais e dos componentes mecânicos. Ainda, complementando [2], confirma a validade da relação entre energia e limite de fadiga e,

consequentemente, a relação entre os diagramas clássicos da fadiga (Goodman-Smith, Haigh, etc.).

### **1.2.3 "A first approach to the analysis of fatigue parameters by thermal variations in static tests on plastics"**

Em [4], **C. Clienti, G. Fargione, G. La Rosa, A. Risitano** apresentaram uma primeira abordagem para determinação de parâmetros de fadiga, por meio da análise da variação térmica em ensaios estáticos em espécimes de plástico policloreto de vinila (PVC).

Os testes foram feitos utilizando-se de corpos de prova de PVC com geometria de barras planas regulares 30,2 mm × 4.7 mm × 200 mm (largura × espessura × comprimento) com diversos furos centrais (4,5; 6,5; 8,0 and 10,0 mm de diâmetro). Foi feito o uso de uma câmera termográfica FLIR SC3000 operando a longa banda infravermelha com raio de 8-9  $\mu\text{m}$ , com uma lente 20° × 15° FOV, com 1,1 mrad de resolução espacial, usando 20 mK de sensibilidade térmica e taxa de aquisição de 1 frame/s.

Medindo-se a temperatura em 4 pontos espaçados, o primeiro a 1 mm do furo e o último a 3 mm da borda, formando uma linha normal a carga aplicada, sendo constatada uma queda da temperatura na medida onde carga aumentava até que, quando a mesma se estabilizou, registrou-se um aumento na temperatura. Como mostra a figura abaixo, a primeira tangente no início do teste mostra uma queda acentuada da temperatura e em seguida uma queda menos acentuada, seguida de um aumento de temperatura.



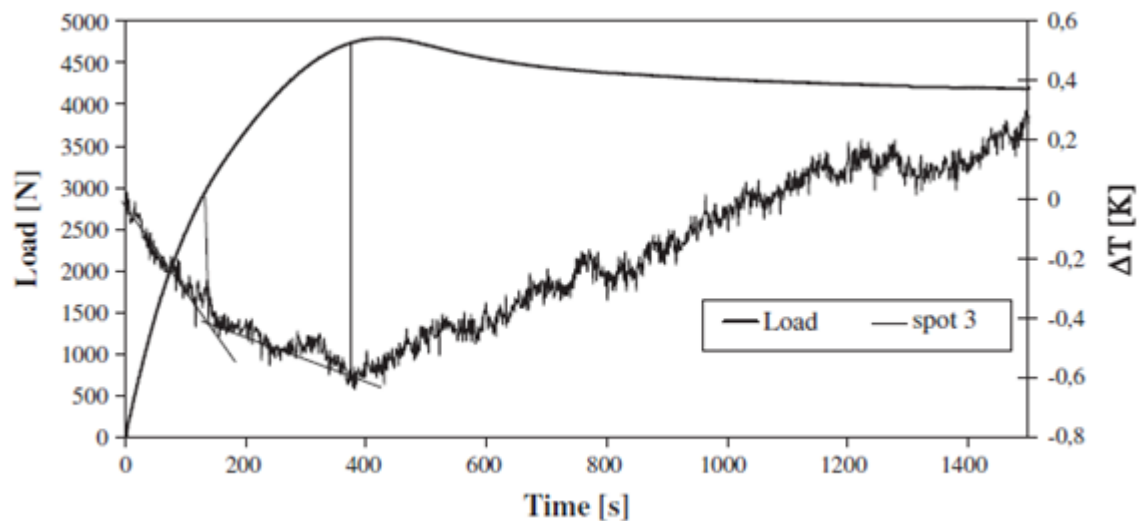


Figura 1.2 - Variação térmica no ponto sem entalhe do espécime.

Assim, os autores descreveram que a fase termo elástica, pelo aumento da temperatura, começava logo em que a temperatura se tornava crescente, caracterizando o início da “real plastificação” do material.

#### 1.2.4 “Static and fatigue characterisation of new basalt fibre reinforced composites”

Em [5], **C. Colombo, L. Vergani, M. Burman**, a fim do uso em aplicações estruturais, caracterizaram o novo material compósito fibra de basalto reforçado em termos estáticos e de fadiga fazendo uso da termografia. Este material foi recém-desenvolvido e é uma alternativa para os materiais fibra de carbono pelo seu preço, e fibra de vidro pela sua resistência.

Em todos os ensaios estáticos de tração foram utilizados espécimes de 25 × 250 mm<sup>2</sup> de seção transversal e 50 mm de comprimento. Foi usada também uma câmera termográfica FLIR Titanium SC7000, 320 × 256 de resolução, com banda de onda de 2,5 – 5 μm, taxa de frames aior ou igual a 380 Hz e sensibilidade térmica de 25 mK.

Através da variação da temperatura do espécime, foi possível estudar o comportamento plástico relativo e determinar assim o limite de fadiga do material, através do método Risitano para ensaios estáticos.

### 1.2.5 “Experimental analyses of SFRP material under static and fatigue loading by means of thermographic and DIC techniques”

Em [6], V. Crupi, E. Guglielmino, G. Risitano, F. Tavilla fizeram um estudo analisando experimentalmente o material SFRP (do inglês, Secreted frizzled-related protein) sob cargas estáticas e de fadiga via termografia e técnicas DIC (Digital Image Correlation).

Por meio dessas duas técnicas, os autores concluem que, conforme as imagens, a melhor técnica para a zona de fratura no material estudado é a de DIC. Ainda, mostram o comportamento da equação 2.5 de Willian Thomson (Lord Kelvin), juntamente com os dados amostrais da termografia infravermelha depois de uma regressão linear, comparando-os.

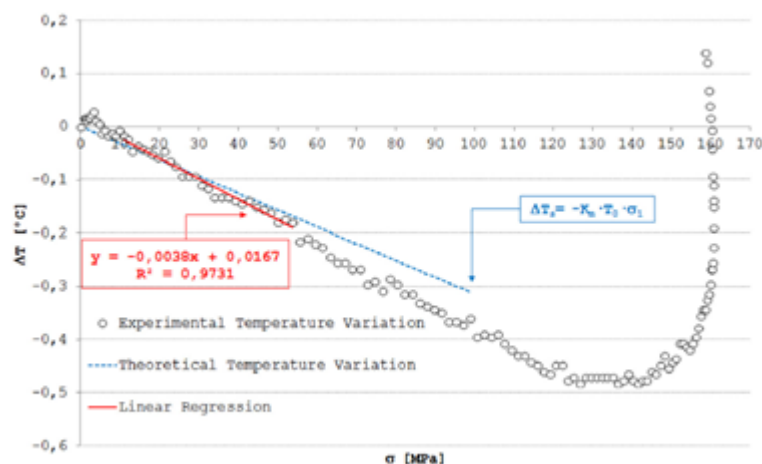


Figura 1.3 - Evolução da temperatura versus tensão aplicada durante um teste estático.

Além disso, foi proposta uma relação entre o incremento da temperatura e a frequência aplicada nos ensaios de fadiga e também foi proposta uma abordagem teórica para prever a evolução da temperatura nos compósitos SFRP durante os testes, usando diferentes cargas e frequências.

### 1.2.6 “Fatigue limit by thermal analysis of specimen surface in mono axial traction test”

Em [7], A. Risitano, G. Risitano, C. Clienti indicam como é possível avaliar o limite de tensão da fase termo-elástica via análise termográfica da superfície do espécime durante o ensaio estático de tração. Adicionando a curva da temperatura medida em uma pequena área da superfície (a mais quente) ao gráfico clássico

tensão deformação, foi possível avaliar a temperatura coincidente com o início da tendência não linear.

Os testes assim, conseguiram demonstrar qual é o limite de fadiga do material, com  $R=-1$  de dois espécimes com entalhes, a partir da mudança da linearidade da curva temperatura.

### 1.2.7 "Determination of the fatigue limit by semi static tests"

Em [8], **A. Risitano, G. Risitano, C. Clienti** mostram os resultados a respeito da determinação do limite de fadiga por meio de ensaios estáticos de tração, explicando sobre o processo de falha do espécime. Foi posto em evidência a conexão entre a fase termo elástica sob tração e o início de pontuais deformações plásticas por meio do gráfico clássico tensão deformação, mesmo estando abaixo do limite de escoamento.

Os testes foram feitos em 6 espécimes de aço AISI 304 e analisados via termografia, dos quais 3 foram feitos ensaios estáticos e os outros 3 ensaios cíclicos de fadiga a  $R=-1$ , a fim de determinar e comparar os limites de fadiga adquiridos pelo método convencional e o novo proposto. Seguem os resultados na Figura 1.4:

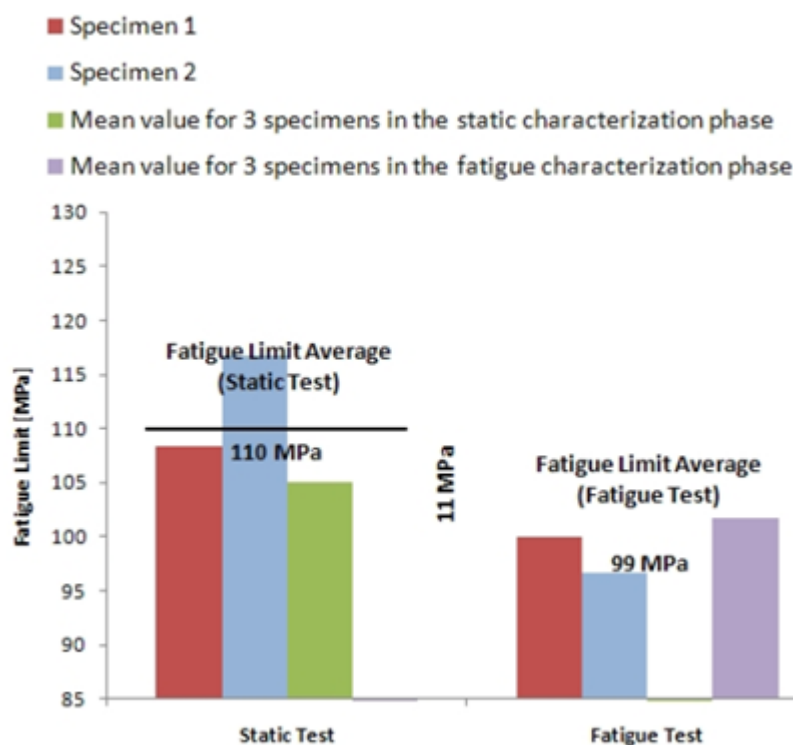


Figura 1.4 - Limite de fadiga obtido em testes estáticos e de fadiga.

O método se mostrou relativamente eficaz, com erros na ordem de 10%. Mais dois espécimes foram testados para a comprovação dos dados.

#### **1.2.8 "Fatigue limit evaluation of metals using an infrared thermographic technique"**

Em [9], **M. P. Luong** aponta três vantagens da termografia infravermelha por ser uma técnica não ser destrutiva, por adquirir dados em tempo real e por não haver contato com o corpo de prova.

O trabalho discorre sobre a medição quantitativa do dano, o mecanismo de produção de calor ao longo dos testes, termografia infravermelha e estimativa do limite de fadiga.

#### **1.2.9 "Thermography Applied to the Study of Fatigue in Polycarbonate"**

Em [10], **R. B. Vieira** usou de bases teóricas e testes experimentais para validar a viabilidade do uso da termográfica como ferramenta de iniciação e propagação de trincas por fadiga. Foi testada uma placa de policarbonato isenta de tensões residuais, usando-se da termografia ativa, com o objetivo de localizar o ponto crítico.

Dessa forma, mediu-se o campo de tensões via análise termoelástica de tensões (TSA) e a concentração de tensão(ponto crítico) para o surgimento das trincas. Foi possível também a determinação do limite de fadiga do material e todos os coeficientes necessários para criação da curva de Wöhler, do método SN que prevê a iniciação de trincas. Ainda, o TSA auxiliou também na determinação dos coeficientes da lei de Paris.

#### **1.2.10 "Estudo da fadiga em Policarbonato com uso da termografia"**

Em [11], **P. R. B. Manhães** validou o uso da termografia para a obtenção de propriedades da fadiga como limite de fadiga e coeficientes da equação de Wöhler necessários para a criação da curva SN.

O material utilizado foi o policarbonato, que sofreu um recozimento antes de ensaiado, para aliviar as tensões residuais provenientes do processo de fabricação.

Assim, foram feitos testes aplicando o método Risitano, constatando sua rapidez e confiabilidade em diversas razões de  $R$ , todas elas contemplando apenas tensões trativas.

#### **1.2.11 "Estudo da fadiga em Aço Carbono com uso da termografia"**

Em [12], **A. A. O. de Assis** fez o uso da termografia para obter propriedades na área da fadiga como limite de fadiga e contabilizou a integral do gráfico da variação de temperatura (entre o ambiente e a área da superfície mais quente do corpo de prova) e o número de ciclos para estabelecer valores para os coeficientes da curva de Wöhler para em seguida traça-la.

Foram feitos dois experimentos usando o material aço SAE 1020, sob as razões  $R = 0,5$  e  $R = -1$  e comparados com mais 18 valores referência com a finalidade de comparação e validação do experimento.

## 2 Termografia Infravermelha

A termografia infravermelha é uma técnica que permite mapear a variação de temperatura, por meio de imagem, transformando a radiação infravermelha, insensível ao olho humano, em imagem visível.

Está técnica tem ampla aplicação na indústria e pode ser usada: para detectar componentes em atrito devido à má lubrificação na área da mecânica; em instalações elétricas em curto, sobre carga ou que estejam sob o Efeito Joule emitindo calor sem promover qualquer risco (diferentemente da aplicação de outros equipamentos como que exigem proximidade, como multímetros e osciloscópios); nas edificações e construção civil anunciando trincas ou deformidades em paredes, vazamentos em dutos e tubos de água, drenos de ar condicionado ou qualquer outro processo que sua identificação seja feita pela variação de temperatura [14].



Figura 2.1 - Caixa de disjuntores sendo visualizada a partir de uma câmera de termografia infravermelha, acusando um possível defeito por meio da variação de temperatura (<http://mixeletrica.com.br/wp-content/uploads/2016/08/Termografia-300x300.png>, acessado 19/11/2017).

De forma geral, está técnica auxilia no processo de operação e manutenção de componentes industriais, podendo acusar problemas à distância assim que o visor indicar a variação de temperatura por diferença de cores. Portanto, é um meio rápido, seguro e barato.

## 2.1 Princípios Físicos

É possível enxergar elevadas temperaturas a olho nu quando um objeto está incandescente. Isto acontece, pois à medida que a temperatura aumenta, o comprimento de onda do espectro da radiação diminui, chegando até o comprimento de onda visível ao olho humano, que está na faixa de 400 a 700 nm.

Portanto, para qualquer objeto com temperaturas acima de 500 °C que esteja aquecendo, seu comprimento de onda diminui e acaba cruzando a faixa visível de 700 nm (aproximadamente), tornando-se então um espectro visível em forma de luz. Não obstante, para temperatura abaixo de 500 °C o espectro ultrapassa a faixa visível e não há mais como interpretarmos a temperatura a olho nu a não ser pelo uso da termografia infravermelha [11].

A termografia infravermelha detecta a presença da radiação eletromagnética emitida por todos os corpos que não estejam à temperatura zero absoluto (0 K). Essa radiação é uma oscilação em fase do campo elétrico e magnético que oscilam perpendiculares entre si, sendo entendidas como ondas transversais, já que oscilam perpendicularmente à direção do movimento da onda. Essas ondas podem se propagar no vácuo e são entendidas na mecânica quântica como deslocamento de pequenas partículas de fótons.

Quando se encontram com um corpo, parte dessa radiação atravessa o corpo (é transmitida), outra parte é absorvida e outra refletida. No entanto para os corpos negros, idealmente não há reflexão nem transmissão da radiação, sendo tudo absorvido. Na natureza não existem corpos negros perfeitos, visto que nenhum objeto é capaz de emitir e absorver perfeitamente, sem transmissão ou reflexão. Ainda, a absorção e irradiação nesses corpos são de mesma taxa.

A radiação em corpos negros foi estudada primeiramente por Gustav Kirchhoff em meados de 1860, quando formulou a Lei de Kirchhoff, propondo que a emissividade de um corpo negro perfeito  $\epsilon_{cn} = 1$ . Isto acontece, pois a emissividade de um objeto (Equação (2.1)),  $\epsilon_{obj}$ , nada mais é que a razão de sua energia da radiação espectral,  $I_{obj}$ , sobre a energia da radiação espectral de um corpo negro,  $I_{cn}$  [14].

$$\epsilon_{obj} = \frac{I_{obj}}{I_{cn}} \quad \text{Equação (2.1)}$$

Contudo, só com estudos datados de 1900 e publicado em 1901, feitos por Max Planck, essa energia pôde ser quantificada, formulando-se a Lei de Planck para os corpos negros, através da Equação (2.2).

$$I_{cn}(\lambda, T) = \frac{2\pi hc}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda\kappa T} - 1)} \quad \text{Equação (2.2)}$$

onde  $\lambda$  é o comprimento de onda,  $T$  é a temperatura,  $h$  é a constante de Planck ( $6,626 \times 10^{-34}$  js),  $c$  é a velocidade da luz no vácuo ( $299792458$  m/s) e  $\kappa$  é a constante de Boltzmann ( $1,381 \times 10^{-23} \frac{\text{m}^2\text{kg}}{\text{s}^2\text{K}}$ ) [10].

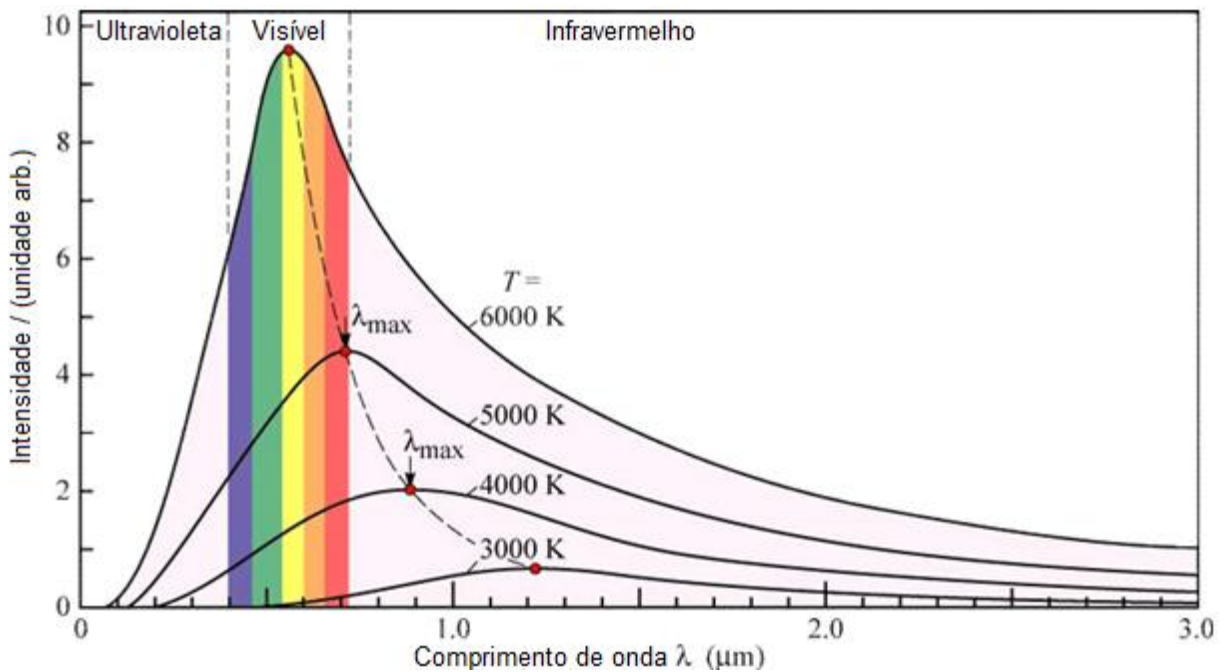


Figura 2.2 - Gráfico da intensidade da radiação em função do comprimento de onda, mostrando Lei de Planck para várias curvas de nível de temperatura ([https://chriscolose.files.wordpress.com/2010/02/planck\\_black-body\\_radiation.png](https://chriscolose.files.wordpress.com/2010/02/planck_black-body_radiation.png), acessado 20/11/2017).

Integrando a Lei de Planck em termos do comprimento de onda, descrevemos a energia irradiada total de um corpo negro em termos da temperatura:

$$I_{cn} = \int_{\lambda} I_{cn}(\lambda, T) = \sigma T^4 \quad \text{Equação (2.3)}$$

onde  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann ( $5,67 \times 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}^4}$ ).



Combinando a Equação (2.2) e a Equação (2.3) determinamos a energia irradiada total de um objeto temos a Equação (2.4):

$$I_{obj} = \epsilon \sigma T^4 \quad \text{Equação (2.4)}$$

onde a emissividade varia de  $0 < \epsilon < 1$ , já que a máxima é a de um corpo negro ( $\epsilon = 1$ ).

Tabela 2.1 - Emissividade para diversos materiais [12].

<b>Material</b>	<b>Emissividade (<math>\epsilon</math>)</b>
Aço inoxidável polido	0,17
Alumínio altamente polido	0,04
Água	0,96
Areia	0,9
Concreto	0,88 - 0,93
Materiais de construção - placa 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
Tinta branca acrílica	0,9
Cobre polido	0,01
Vidro	0,92
Ferro polido	0,23
Tinta a óleo	0,94

## 2.2 Termografia Ativa e Passiva

A termografia pode ser feita de duas modalidades, podendo ser passiva ou ativa. Na termografia ativa é necessário que se tenha troca de calor induzida para que haja variação térmica do material, resfriando ou aquecendo do objeto, revelando então as discontinuidades provenientes do processo que se deseja ser analisado.

Já na termografia passiva o objeto analisado produz sua própria variação de temperatura pela troca de calor ao longo do processo analisado, como o nome mesmo sugere, passivamente [15].

O presente trabalho faz o uso da termografia passiva nos corpos de prova, detectando o aumento da temperatura proveniente do aumento da tensão aplicada. Este efeito se chama efeito termoelástico e foi documentado por Willian Thomson (Lord Kelvin) pela primeira vez no final do século 19.

Assim, constatou-se que a variação de temperatura do corpo em uma parte da superfície,  $\Delta T$ , era proporcional à variação da soma das tensões principais atuantes,  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$ , como podemos ver a seguir na Equação (2.5), considerando o caso biaxial, adiabático e linear elástico:

$$\Delta T = -\frac{\alpha T_0}{\rho C_p} (\sigma_1 + \sigma_2) \quad \text{Equação (2.5)}$$

onde  $\alpha$  é o coeficiente de expansão térmica,  $T_0$  a temperatura de referência (ambiente),  $\rho$  é a massa específica do material,  $C_p$  é o calor específico a pressão constante do material e  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$  são as tensões principais [10].

## 2.3 Métodos Termográficos de Análise de Fadiga

### 2.3.1 Cíclicos

Os métodos cíclicos a seguir se aproveitam do aquecimento da superfície do material quando submetidos a um carregamento cíclico. Suas análises partem da interpretação do gráfico da temperatura de estabilização ( $T_{est}$ ) versus tensão flutuante ( $\sigma_a$ ) englobando cada patamar medido.

Verifica-se que se a tensão está abaixo do limite de fadigas  $S_L$  quando o aumento da temperatura  $\Delta T$  no ponto da superfície da amostra é bem limitada,

praticamente nula, essa variação correspondendo ao efeito termoelástico. Se o espécime é submetido a tensões acima do limite de fadiga, o comportamento da variação de temperatura torna-se relevante e depende do número de ciclos. Podemos classificar esse comportamento em 3 fases: aumento da temperatura (fase 1); estabilização da temperatura (fase 2); aumento súbito da temperatura, precedendo a falha (fase 3) [1]. Vale ressaltar que este comportamento é verificado usando cargas trativas.

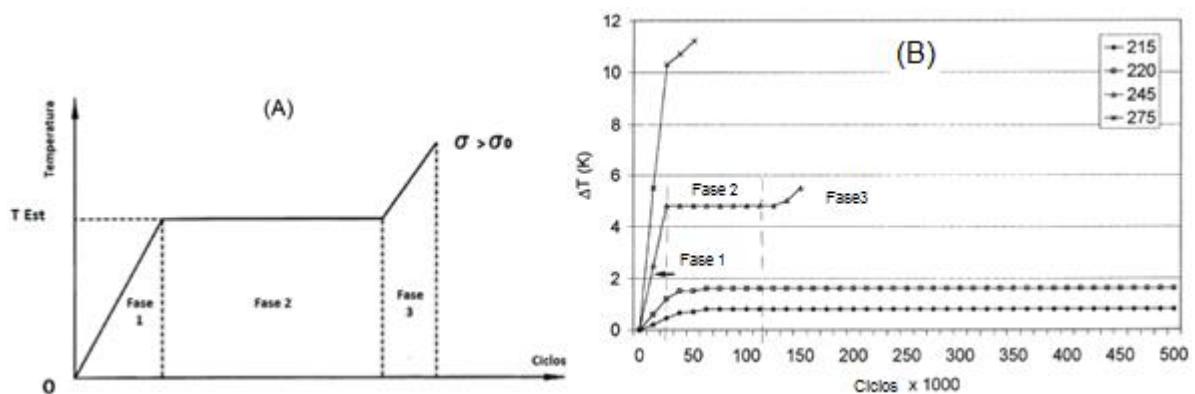


Figura 2.3 - (A) Desenho explicitando as 3 fases [3]. (B) Aumentos térmicos máximos em espécimes sob fadiga carregando em diferentes tensões aplicadas entre 215 e 275 MPa. As tensões aplicadas ( $\Delta\sigma = \sigma_{máx}/2$ ,  $R=0$ ) são indicados em MPa na legenda. As três fases são mostradas para o teste realizado a 245 Mpa [2].

### 2.3.1.1 Método Risitano

O método Risitano, apresentados pelos italianos G. La Rosa e A. Risitano [2] tem como principal objetivo obter o limite de fadiga do material em ensaios cíclicos de tração. Para isso, mede-se a variação de temperatura da superfície do corpo de prova em que a câmera termográfica indica estar mais quente em relação à temperatura referência. A temperatura referência usada é a ambiente e é extraída de uma placa aço que fica próxima ao corpo de prova enquanto este está sendo testado. No início do teste, o corpo de prova e a placa de referência estão em conformidade com a Lei zero da termodinâmica.

Este método tem como característica o pequeno uso de espécimes e assim pode prover valores confiáveis para o limite de fadiga. Diferentemente de outros métodos, o método Risitano não tem efeito destrutivo, sendo muito prático, particularmente para a obtenção do limite de fadiga, já que pode ser usado também para a determinação da curva SN (de Wöhler).

Os criadores do método relatam a facilidade do método Risitano, utilizado desde meados da década de 1980, que se baseia no aumento da temperatura no momento em que a tensão ultrapassa o limite de fadiga, devido à liberação de energia proveniente da plastificação do material.

O método consiste em traçar uma reta no gráfico da variação de temperatura versus tensão flutuante utilizando as temperaturas de estabilização e tensão alternada de cada patamar. Para efetuar a estabilidade da temperatura, os patamares de tensões flutuante aplicadas são da ordem de 5000 ciclos. O método indica que o limite de fadiga é a tensão indicada na interseção dessa reta com o eixo x (tensão alternada) e a mesma é traçada assim que os patamares de temperatura aumentam consideravelmente [2-3].

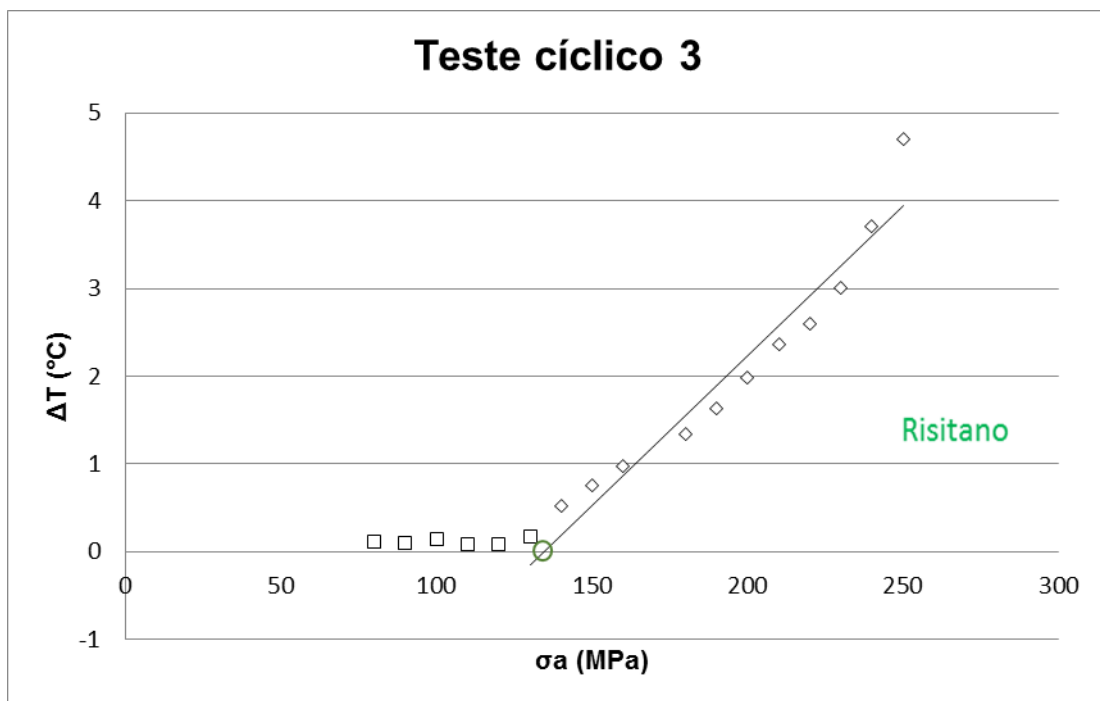


Figura 2.4 - Gráfico do teste cíclico 3 indicando os pontos nos patamares com aproximadamente a mesma temperatura de estabilização (quadrados) e patamares com gradual aumento na temperatura de estabilização (losango) com a reta traçada no método Risitano [2].

### 2.3.1.2 Método de Luong

O método de Luong, apresentando por M. P. Lung [9] utiliza-se do mesmo princípio de análise do método Risitano, no qual a temperatura de estabilização dos patamares dá um salto, indicando que o limite de fadiga está próximo.

Contudo, esse método proposto por Luong se utiliza de duas retas, uma identificando os patamares abaixo do limite de fadiga e a outra identificando os patamares após o limite de fadiga. O limite de fadiga é obtido então por meio da interseção entre essas duas retas.

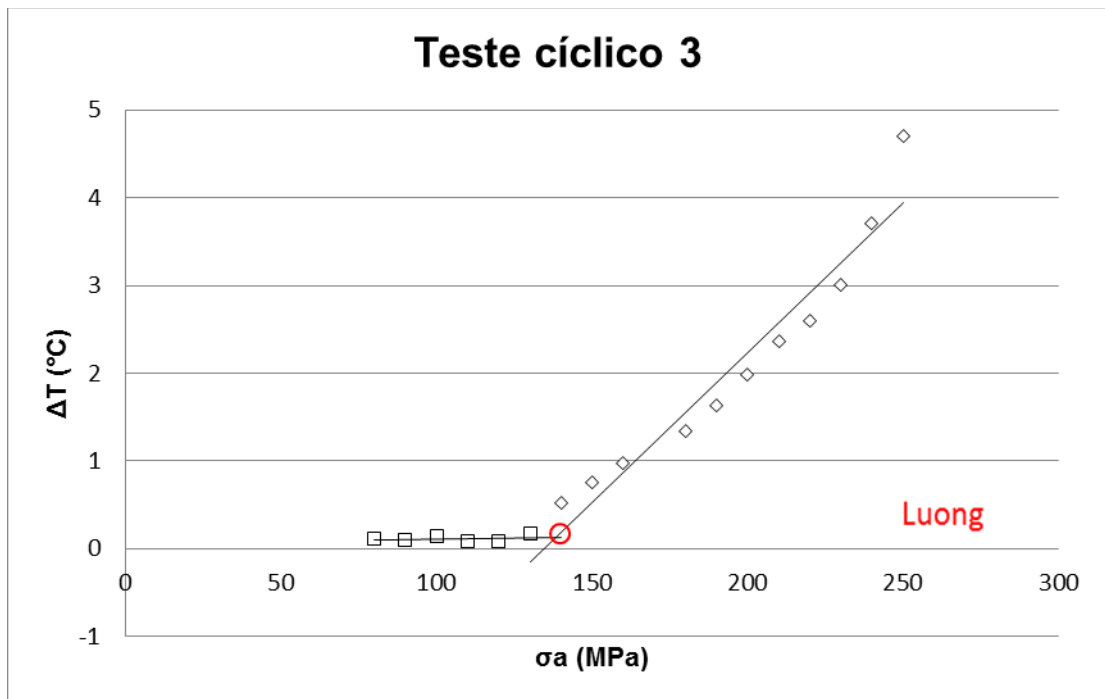


Figura 2.5 - Gráfico do teste cíclico 3 indicando os pontos nos patamares com aproximadamente a mesma temperatura de estabilização (quadrados), os patamares com gradual aumento na temperatura de estabilização (losango), ambos com retas traçadas.

Este método é também extremamente vantajoso, por sua rapidez, confiabilidade e custo, já que não é um método destrutivo [9]. Em métodos mais usuais, como o de Dixon, por exemplo, se faz o uso de 10 a 20 espécimes, dos quais quase todos necessitam ser destruídos nos ensaios ou serem extremamente comprometidos devido ao dano acumulado, muitas vezes consumindo muito tempo em ensaios de baixa frequência.

## 2.3.2 Estáticos

### 2.3.2.1 Método Risitano

O método Risitano estáticos trativos faz o uso de ensaios de tração e tem por finalidade determinar o limite de fadiga do material analisado. Apesar de não

trabalhar com carregamentos cíclicos, o método é capaz de prover o limite de fadiga para a razão de tensão cíclica  $R = -1$ .

Nos testes estáticos são evidenciados os comportamentos termoelásticos do material e a influência do efeito da plastificação do material em 3 fases: diminuição linear da temperatura (fase 1); início do efeito calorífico do calor devido às plastificações, terminando o decrescimento da temperatura (fase 2); intensificação das plastificações do material, aumentando a taxa de calor liberado no corpo de prova, aumentando sua temperatura [5].

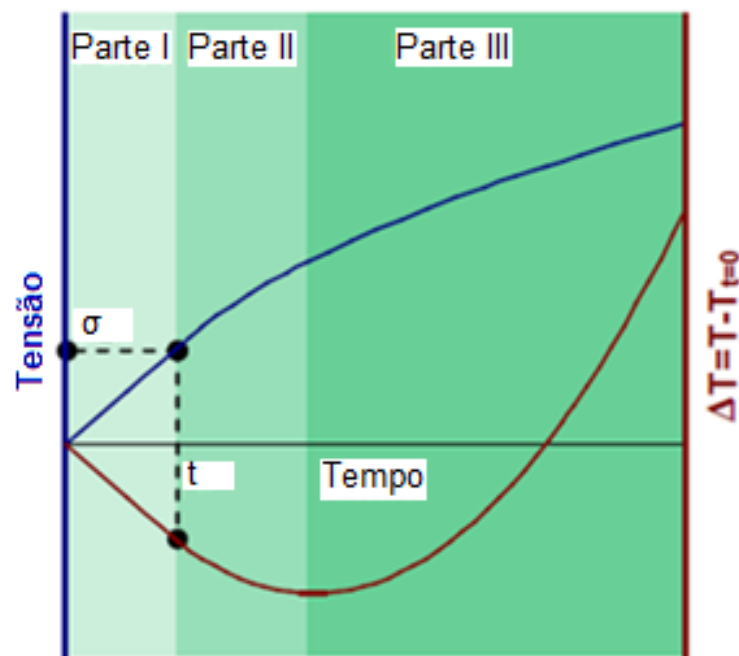


Figura 2.6 - Desenho esquemático da tensão aplicada e a variação de temperatura, durante um ensaio estático [5].

O método consiste em analisar a variação da variação de temperatura com a carga aplicada durante a primeira fase, em que a variação de temperatura e a carga aplicada têm comportamento linear. Ao final da primeira fase, o início da plastificação marca o fim da primeira fase e também a carga referente ao limite de fadiga do material para  $R = -1$  [5].

### 3 Flambagem

Flambagem é uma falha mecânica resultado da instabilidade em membros esbeltos sob cargas axiais compressivas. Esses membros esbeltos, tais como colunas, sob compressão podem sofrer deflexões características a partir de um valor de carga compressiva, chamado de carga crítica. A flambagem é uma falha mecânica comum quando se trata de carregamentos compressivos e sempre deve ser considerada no dimensionamento de uma estrutura mecânica [16].

#### 3.1 Elástica

A intensidade de carga que essa falha mecânica ocorre é chamada de carregamento crítico ( $\sigma_{cr}$ ). Acima do carregamento crítico, a coluna é considerada instável e, abaixo desse valor estáveis.

As colunas podem ter diversos apoios em suas extremidades, podendo ser classificada como engastada, rotulada ou livre. Com significado profundo, estas classificações sugerem quais condições de contorno essenciais – ou seja, impostas – deverão ser usadas na equação diferencial proposta para a resolução do problema. Isto quer dizer que as mesmas podem significar a limitação do deslocamento transversal (sem translação) ou da rotação do apoio/extremidade ou não.

A partir da segunda derivada da equação da deflexão, foi obtida a Equação (3.1) para a carga crítica  $P_{cr}$ , admitindo a hipótese que a carga não tem excentricidade:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_{ef}^2} \quad \text{Equação (3.1)}$$

onde  $E$  é o módulo de Young,  $I$  é o momento de inércia de área e  $L_{ef}$  é o comprimento efetivo da coluna. Essa carga crítica depende unicamente da combinação das condições da extremidade da coluna, o que faz variar o comprimento efetivo. O comprimento efetivo, matematicamente falando, é a distância entre as inflexões – ou seja, quando há mudança de concavidade – criada

pela curva da coluna e, à medida que mudam as condições, varia da seguinte forma em relação ao comprimento  $L$  da coluna, como mostra Equação (3.2):

$$L_{ef} = \frac{L}{k} \quad \text{Equação (3.2)}$$

onde  $k$  o fator de comprimento efetivo. A Figura 3.1 mostra os valores do fator  $k$  para diversas formas de flambagem em seus valores teóricos e valores recomendados (mais conservadores), classificando cada extremidade perante a sua rotação e translação:


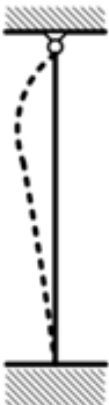
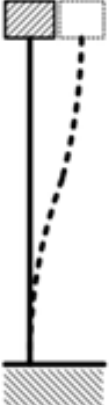
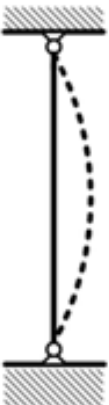


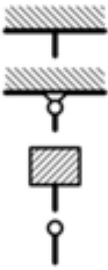
Tipos de Flambagem						
K Teórico	2,0	1,43	1,0	1,0	0,5	0,5
K Recomendado	1,54	1,25	0,83	1,0	0,48	0,5
Condições das Extremidades		Rotação fixa e translação fixa Rotação livre e translação fixa Rotação fixa e translação livre Rotação livre e translação livre				

Figura 3.1 - Desenho esquemático explicitando todas as formas de flambagem e os valores de  $K$  teóricos e recomendados (<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/a/a2/ColumnEffectiveLength.png/600px-ColumnEffectiveLength.png>, acessado 24/11/2017).



Para achar a tensão crítica  $\sigma_{cr}$  correspondente basta dividir a Equação (3.1) pela área da seção transversal  $A$ , encontrando então a Equação (3.3):

$$\sigma_{cr} = \frac{P_{cr}}{A} = \frac{\pi^2 EI}{L_{ef}^2 A} \quad \text{Equação (3.3)}$$

e, introduzindo a notação  $r$ , que é da seção transversal do plano de flexão, visto na Equação (3.4):

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad \text{Equação (3.4)}$$

Combinando a Equação (3.3) e a Equação (3.4), obtém-se a tensão crítica ( $\sigma_{cr}$ ), mais conhecida como a curva de Euler de flambagem:

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{L_{ef}}{r}\right)^2} \quad \text{Equação (3.5)}$$

onde  $L_{ef}/r$  é a razão adimensional chamada de razão ou coeficiente de esbeltez ( $\lambda_{ef}$ ), mostrada abaixo na Equação (3.6):

$$\lambda_{ef} = \frac{L_{ef}}{r} \quad \text{Equação (3.6)}$$

A tensão crítica é a tensão de compressão média aplicada na seção transversal da coluna no instante em que atinge seu valor máximo. Dessa maneira, é possível traçar o gráfico dessa tensão em função do coeficiente de esbeltez e obter a curva mais conhecida como a curva de Euler, mostrada na Figura 3.2:

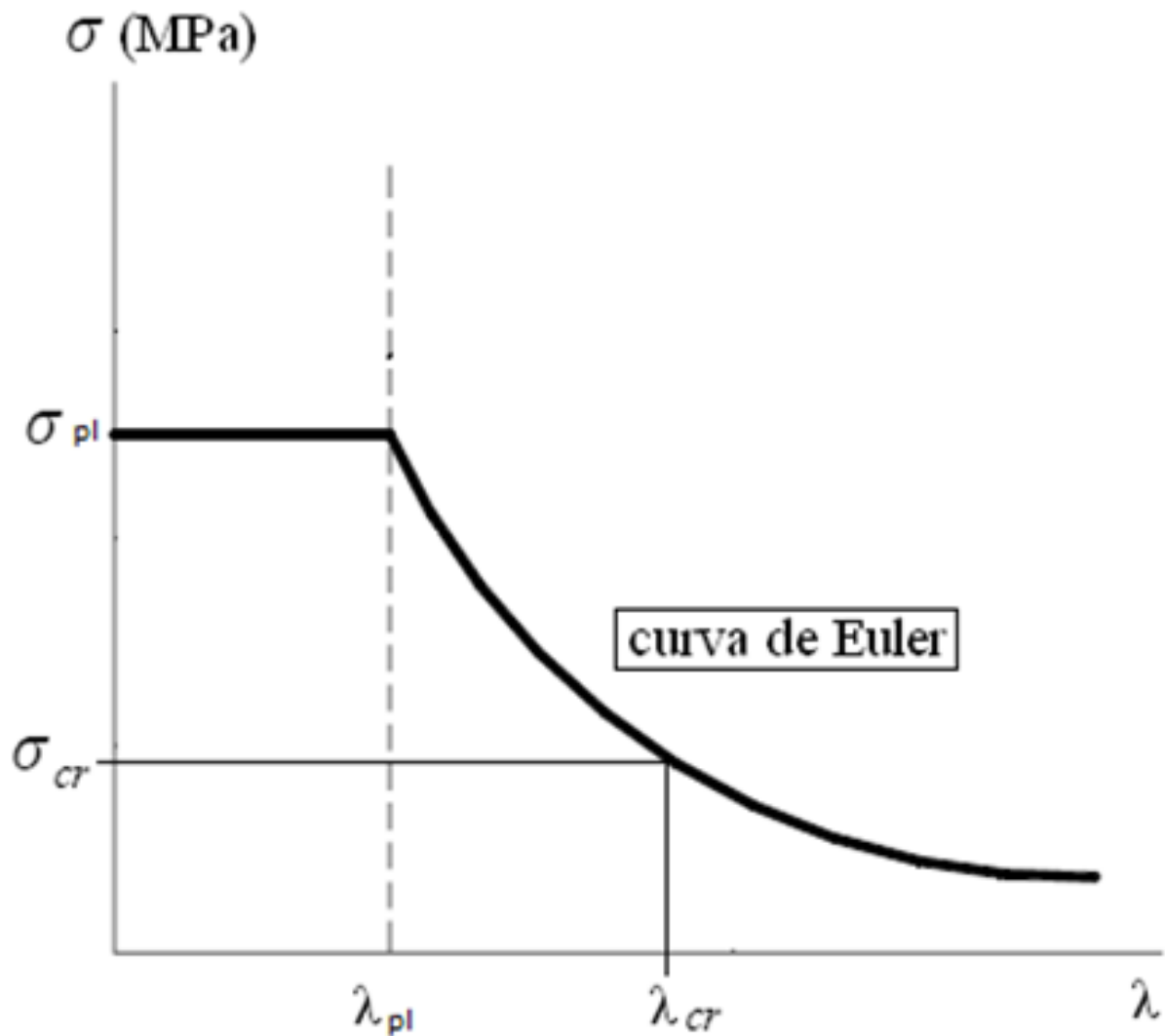


Figura 3.2 - Gráfico da curva de Euler para flambagens elásticas.

A curva é válida apenas quando as tensões críticas estão abaixo do limite de proporcionalidade ( $\sigma_{pl}$ ), visto que as equações foram deduzidas admitindo o regime elástico do material, usando a lei de Hooke. Por isso, quando a curva alcança a tensão do limite de proporcionalidade,  $\sigma_{pl}$ , a curva segue horizontalmente até  $\lambda = 0$ , para não descaracterizar a teoria elástica. Acima desta curva horizontal o regime é inelástico [16]. Muitas vezes, por desconhecer-se o valor de  $\sigma_{pl}$ , utiliza-se no lugar o valor do limite de escoamento  $S_y$ .

### 3.2 Inelástica

Considerando colunas suficientemente longas, sua flambagem ocorrerá elasticamente e sua carga crítica poderá facilmente ser calculada pela fórmula de Euler, vista na Equação (3.5). Nesse caso, a coluna é considerada longa quando seu coeficiente de esbeltez é maior que a esbeltez correspondente ao limite de proporcionalidade ( $\lambda_{pl}$ ), dado pela Equação (3.7).

$$\lambda_{pl} = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{\sigma_{pl}}} \quad \text{Equação (3.7)}$$

Caso a coluna seja muito curta, a mesma não flambará, mas simplesmente falhará com o esmagamento do material de acordo com seu limite de resistência compressivo  $S_{uc}$ . Muitas vezes, desconhecendo-se  $S_{uc}$ , utiliza-se o limite de resistência à tração do material,  $S_u$  (Figura 3.3). Já as colunas esbeltez entre o limiar das colunas curtas e longas são classificadas como colunas intermediárias [17].

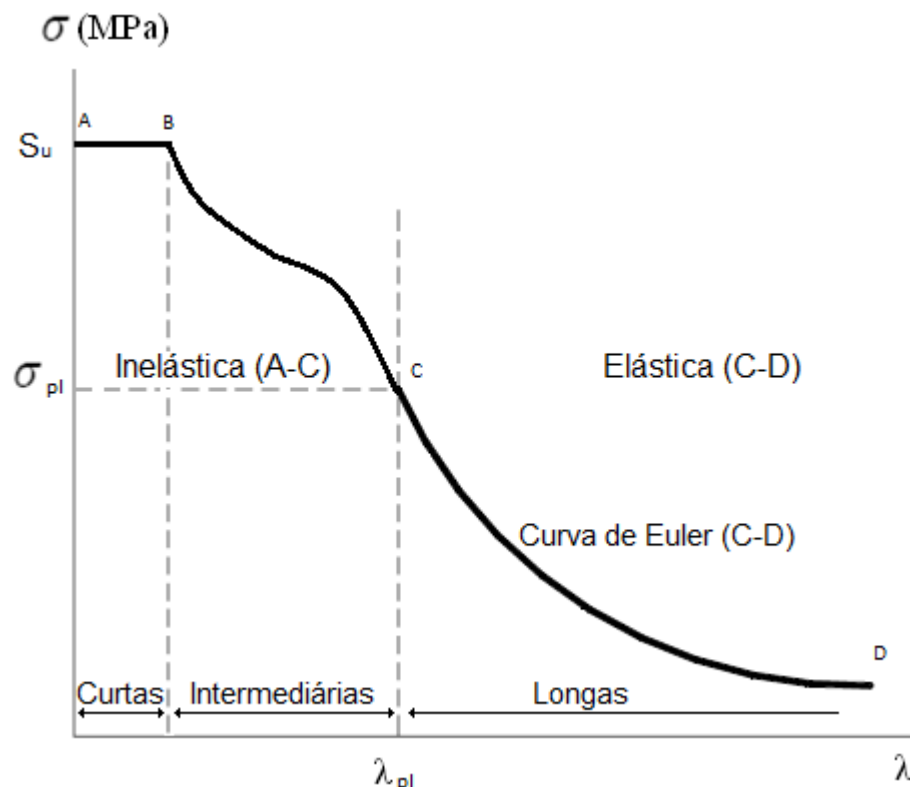


Figura 3.3 - Gráfico reproduzido de [17] da continuação da curva elástica de Euler (D-C) até o limite inelástico da flambagem (A-C).

## 4 Procedimento Experimental

### 4.1 Material

O material utilizado nos testes foi o aço SAE\* 1020, muito usado em aplicações estruturais por ter baixo custo e ainda assim ter boas propriedades mecânicas, como boa soldabilidade, resistência mecânica, temperabilidade, etc. Outro motivo para escolha é a vasta gama de resultados experimentais publicados com o uso desse aço, ampliando as referências.

A Tabela 4.1 mostra a composição química medida para o aço utilizado na tese. Ele é um aço de baixo carbono, mais especificamente com a composição abaixo:

Tabela 4.1 - Composição do aço utilizado nos testes [12].

Composição	Mn	Si	C	Cr	Cu	Ni
%	0,36	0,24	0,2	0,19	0,1	0,04

Foram medidas as propriedades mecânicas do material a partir de um ensaio de tração e outro de compressão, cujas curvas tensão x deformação estão mostradas na Figura 4.1 e na Figura 4.2, respectivamente. As propriedades mecânicas estão dadas na tabela 4.2. Os ensaios do aço foram feitos com CPs tipo ASTM E606M-12, na máquina de ensaios Instron 5500R, com velocidade 1mm/min.

Tabela 4.2 - Propriedades do aço utilizado nos testes extraídos de ensaios de tração e compressão.

Propriedades	Valor
Módulo de Young	197 GPa
Módulo de compressão	193 GPa
Limite de resistência à tração	490 MPa
Limite de resistência à compressão	464 MPa
Limite de Escoamento	313 MPa

---

\* SAE (Society of Automotive Engineers) é uma classificação normativa para aços, criada nos Estados Unidos pela sociedade de engenheiros automotivos. O primeiro número indicando os elementos de liga principais, o segundo indicando os elementos de liga secundários (presentes em menor quantidade) e os dois últimos indicam os centésimos da composição de carbono.

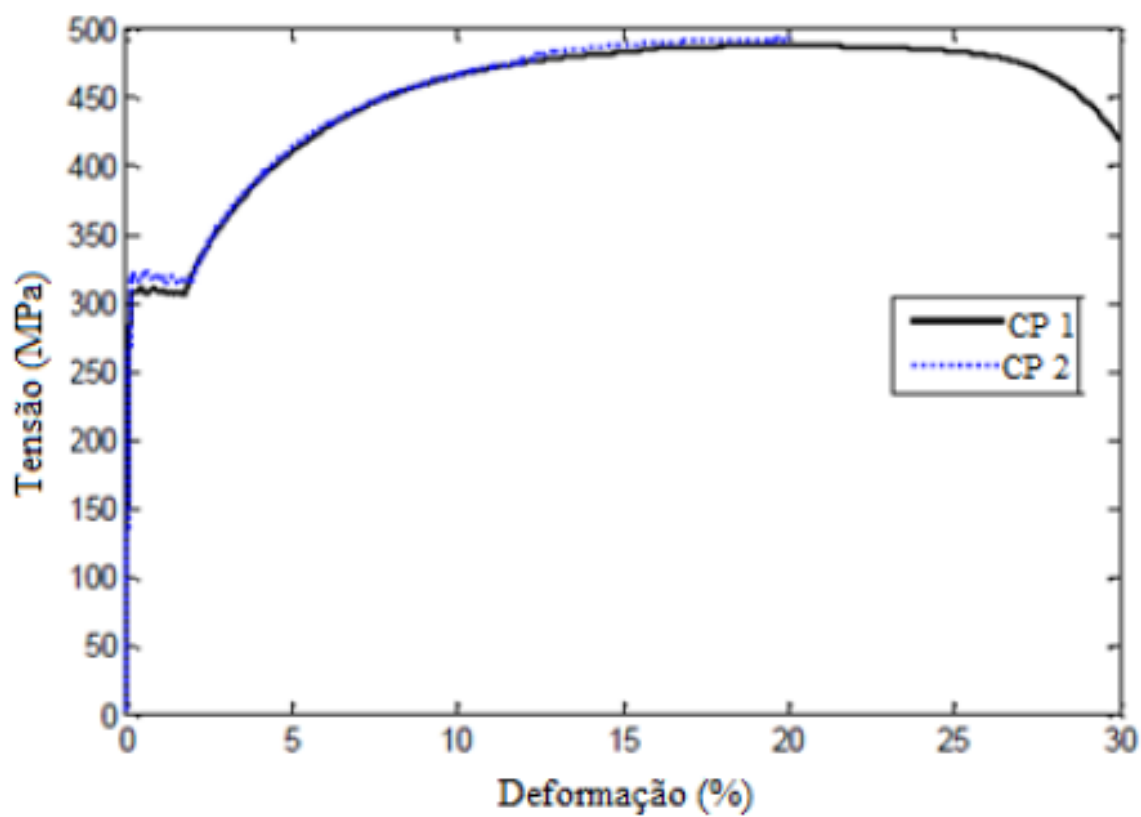


Figura 4.1 - Curva tensão deformação de engenharia de dois espécimes de aço SAE 1020 obtidas em ensaios de tração.

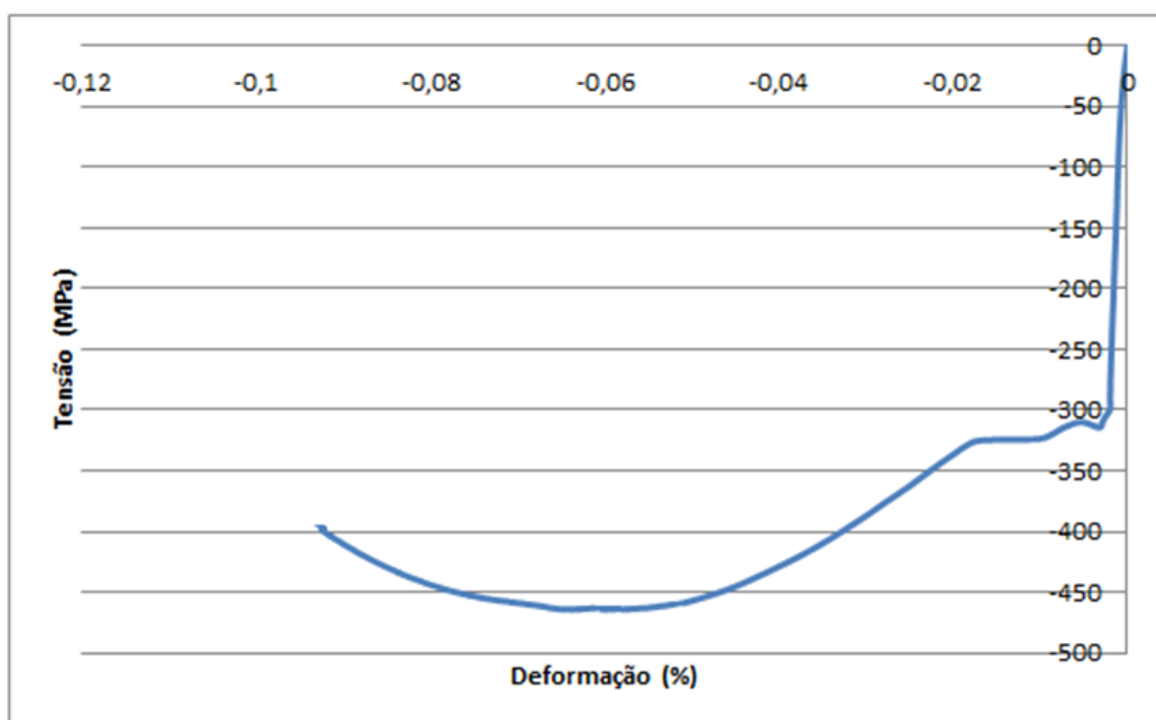


Figura 4.2 - Curva tensão deformação de engenharia de um espécime de aço SAE 1020 obtidas em ensaio de compressão.

## 4.2 Geometria

A geometria utilizada para os corpos de prova em todos os ensaios foi o de forma cilíndrica, conforme a norma ASTM E606M-12, cortados e usinados de uma placa plana e depois polidos. Seguem suas dimensões na Figura 4.3 [12]:

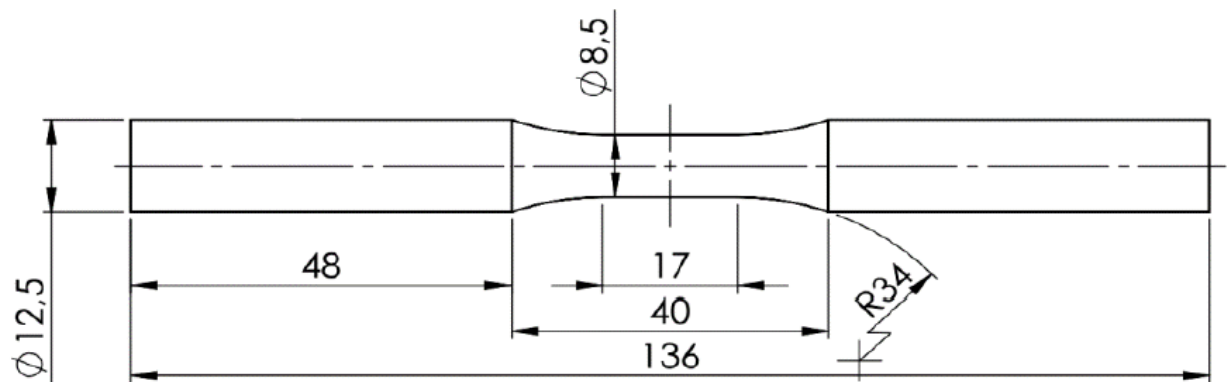


Figura 4.3 - Geometria dos CPs utilizado nos testes [12].

## 4.3 Máquinas dos Ensaios

Os ensaios cíclicos foram feitos em uma Máquina de Ensaio Universal modelo MTS 311.31, mostrado na Figura 4.4 (A), com capacidade de 1000 KN (estático e dinâmico), disponíveis no laboratório de estruturas e materiais do departamento de engenharia civil da PUC-Rio [18]. A máquina acompanha um software, cuja sua interface está exibida na Figura 4.4 (B) que torna possível prescrever as cargas mínimas e máximas, além da frequência dos ensaios de fadiga.



Figura 4.4 - (A) Máquina de Ensaio Universais modelo MTS 311.31 e (B) sua interface computacional.

Nos o ensaio estático simples foi usada uma máquina de ensaios de tração Instron modelo 5500R, mostrado na figura 4.5, presente no laboratório de tração do ITUC (Instituto Tecnológico da PUC-Rio):



Figura 4.5 - Máquina de ensaios Instron 5500R.

#### 4.4 Câmera Infravermelha

A câmera infravermelha, de modelo FLIR A655sc (figura 4.6), utilizada na aquisição dos dados fazia uso de uma resolução de 640 x 480 LWIR com 17 micro pixels, com taxa máxima de 50 quadros por segundo. Sua faixa de comprimento de onda do espectro infravermelho é de 7,5 a 14  $\mu\text{m}$ .



Figura 4.6 - Câmera termográfica FLIR A655sc [11].

A câmera funciona com o auxílio do software FLIR ResearchIR, que necessita de um computador para o funcionamento. Este programa cria histograma e gráficos em tempo real, além de salvar todos os dados e disponibilizando a localização dos pontos de interesse pós-ensaio [12]. Para o uso do software, foi utilizado um computador modelo Dell Latitude E6540.

#### 4.5 Isolamento

Para evitar a entrada de radiação indesejada, foi usado corpos de alta emissividade para isolar o corpo de prova durante o procedimento. O local do experimento, mostrado na Figura 4.7, foi coberto com um tecido azul, para que toda a radiação externa não entrasse e refletisse nos pontos de interesse, como na superfície mais quente do corpo de prova. Assim, seriam evitadas as reflexões e, logo, mudança de temperatura no experimento por conta de radiações externas.





Figura 4.7 - Isolamento térmico utilizado nos ensaios.

Pelo mesmo motivo, os CPs também foram pulverizados de tinta preta Spray Multi uso Suvinil com intuito de aumentar a emissividade, para que não houvesse radiação refletida nem transmitida, apenas a emitida pelo espectro infravermelho, proveniente da variação de temperatura local.



Figura 4.8 – Ao lado esquerdo um CP com a tinta preta aplicada e à direita um CP sem [12].

## 5 Resultados e Discussões

Foi ensaiado um total de nove CPs, dos quais seis foram cíclicos, dois estáticos e um compressivo. Os CPs, pós-ensaios, estão mostrados na Figura 5.1.



Figura 5.1 - CPs após os testes.

Todos os seis ensaios cíclicos foram executados a uma frequência de 15 Hz. Já os ensaios estáticos de tração e no de compressão foram executados a uma velocidade de 1 mm/min e -1 mm/min, respectivamente.

Como o objetivo da razão entre as tensões  $R$  é relacionar os diferentes valores de  $\sigma_{\min}$  e  $\sigma_{\max}$ , proponho para trabalhos futuros o uso de  $R = \sigma_a / \sigma_m$ , vejamos as diferenças. Tendo em vista que o foco é localizar os pontos no diagrama  $\sigma_a \times \sigma_m$  intuitivamente analisando todas as retas de razões  $R$ , vejamos como as mesmas, a usada ( $R$ ) e a sugerida ( $R_s$ ), se comportam propondo a mudança de coordenada cartesiana para cilíndrica  $\sigma_a = \rho \cos \theta$  e  $\sigma_m = \rho \sin \theta$ . Assim,  $R = (\cos \theta - \sin \theta) / (\cos \theta + \sin \theta)$  e  $R_s = \sin \theta / \cos \theta = \tan \theta$ . Vejamos graficamente, na Figura 5.2:

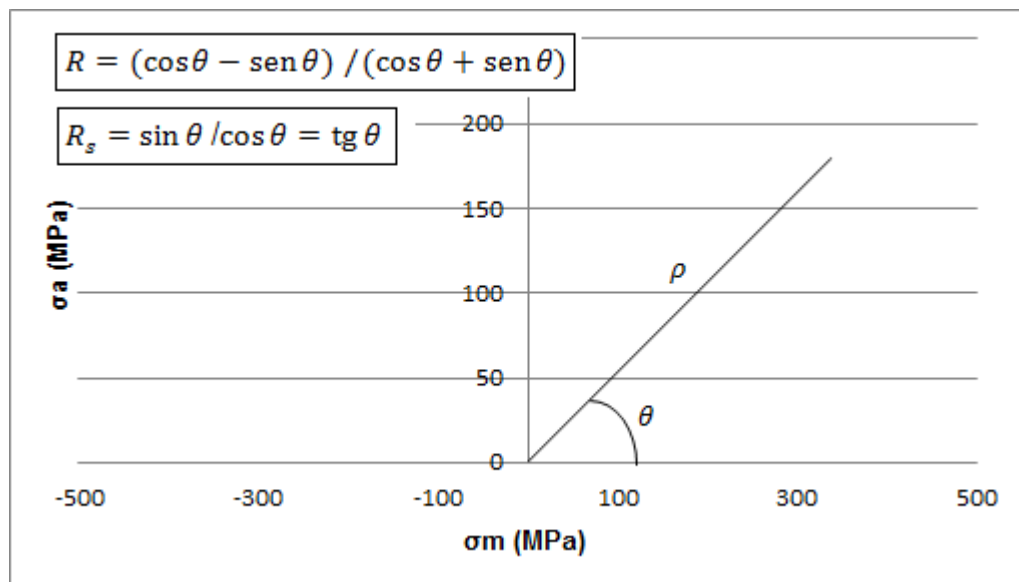


Figura 5.2 - Coordenadas cilíndricas aplicada em  $R$  e  $R_s$ .

Nas razões de tensão  $R$ , fazendo uma análise numérica direta, não se sabe se estão sendo trabalhadas tensões compressivas ou trativas diretamente ou qual o lado que está sendo referenciado no diagrama  $\sigma_a \times \sigma_m$ . Para  $R_s$ , sabe-se qual o lado do diagrama está sendo tratado apenas verificando o sinal de  $R_s$ , sendo positivo no lado direito e negativo ao lado esquerdo, já que  $R_s$  é uma função ímpar. Esse comportamento pode ser visto na Figura 5.3.

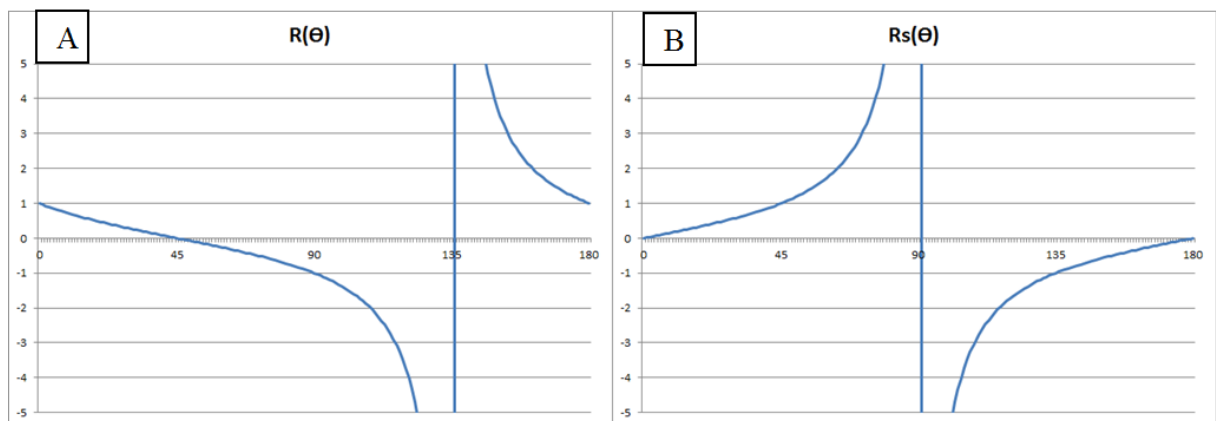


Figura 5.3 - (A) Gráfico de  $R$  em função de  $\theta$ . (B) Gráfico de  $R_s$  em função de  $\theta$ .

## 5.1 Métodos Cíclicos

A princípio, com o intuito de analisar o comportamento térmico, cinco testes cíclicos de compressão pura foram realizados para duas razões de tensão  $R = 2,0$  e  $R = 7,7$ . Em todos os testes foram elevadas as tensões, patamar por patamar, que duravam aproximadamente 5000 ciclos. Os testes um e quatro foram feitos com razão  $R = 2,0$ , já os testes dois, três e cinco com razão  $R = 7,7$ . Os resultados do comportamento térmico em função do número de ciclos ( $\Delta T \times N$ ) encontram-se na Figura 5.4 a Figura 5.8, mostrados com o  $\Delta T$  variando de 0 a 5 °C.

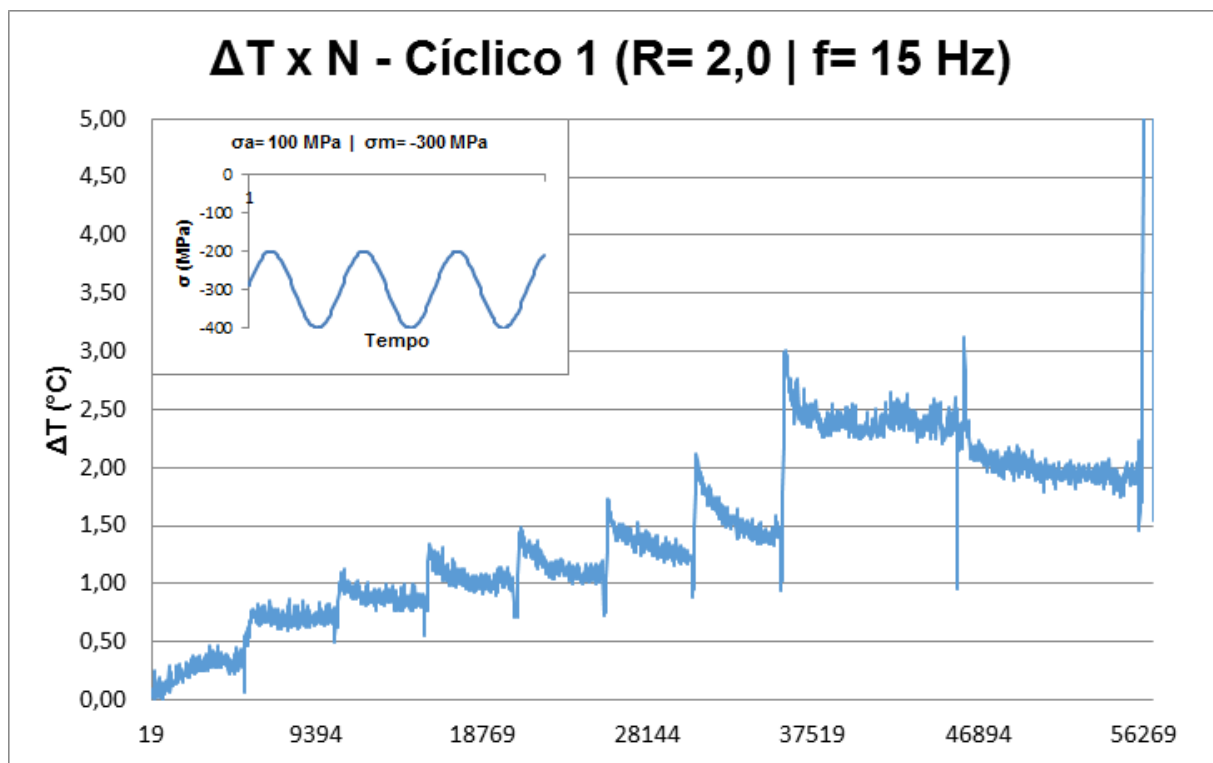


Figura 5.4 – Gráfico  $\Delta T \times N$  apresentando o comportamento do Teste cíclico 1.

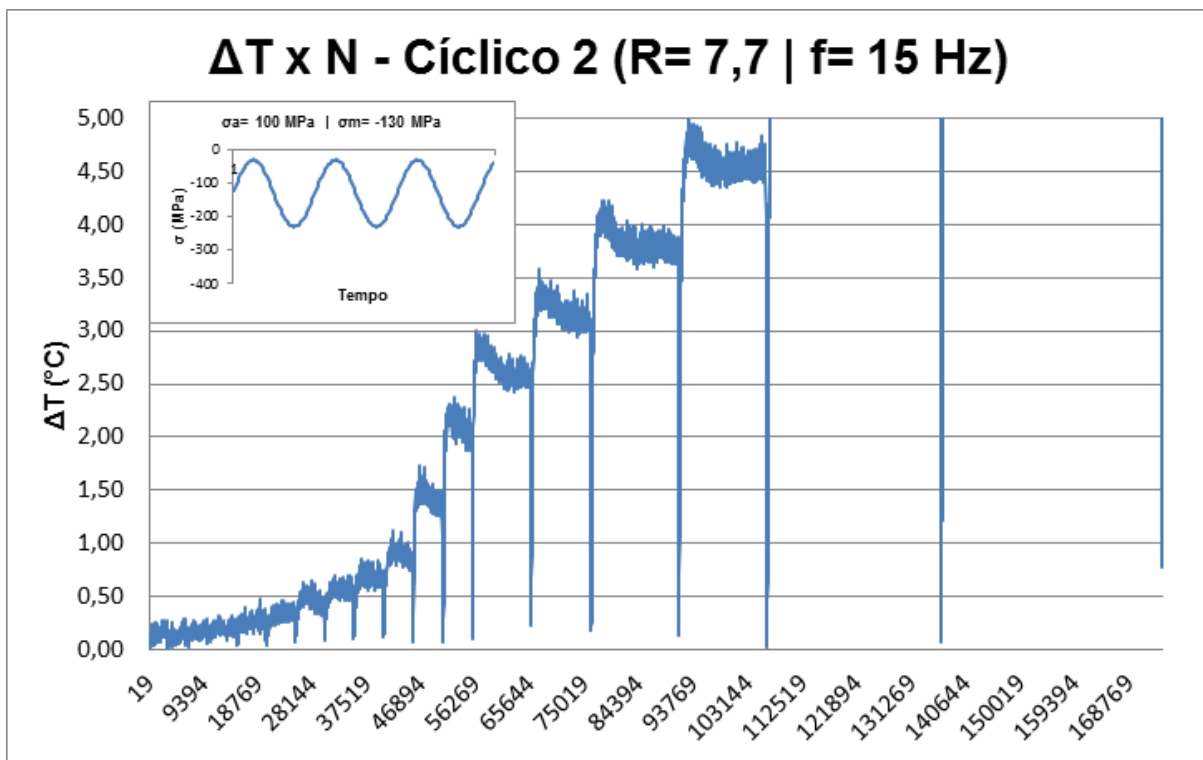


Figura 5.5 - Gráfico  $\Delta T \times N$  apresentando o comportamento do Teste cíclico 2.

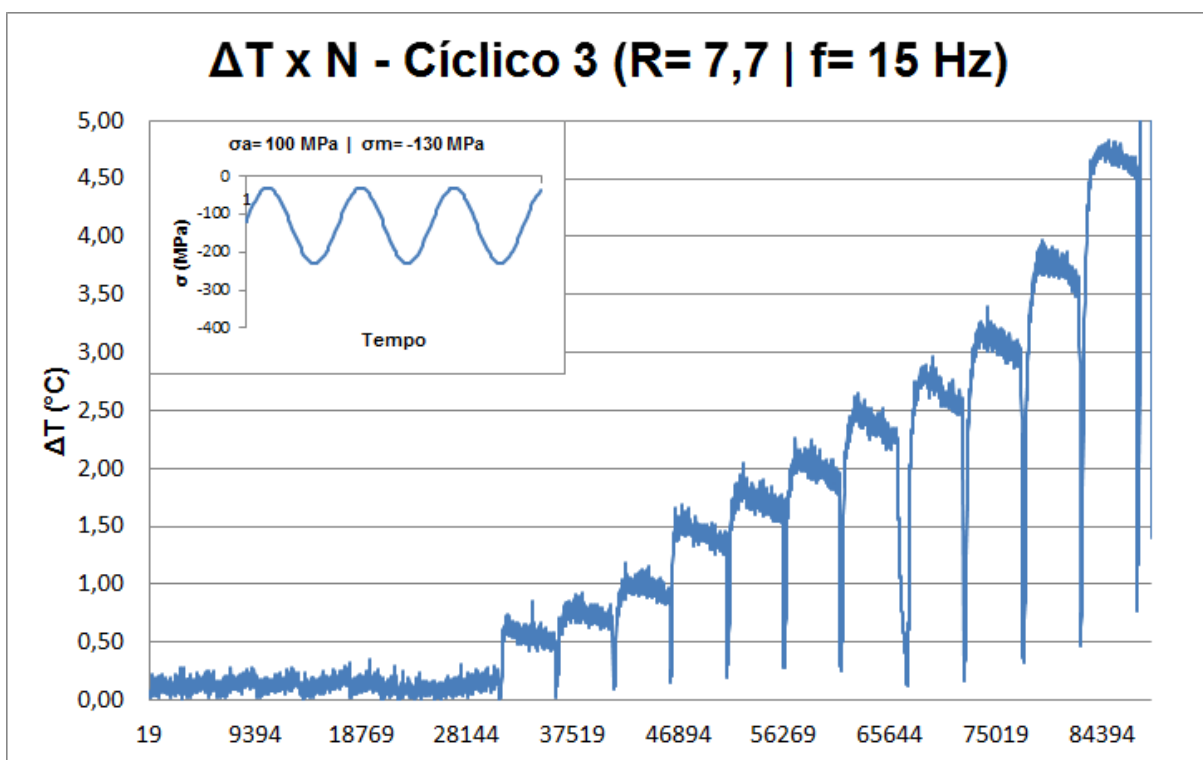


Figura 5.6 - Gráfico  $\Delta T \times N$  apresentando o comportamento do Teste cíclico 3.

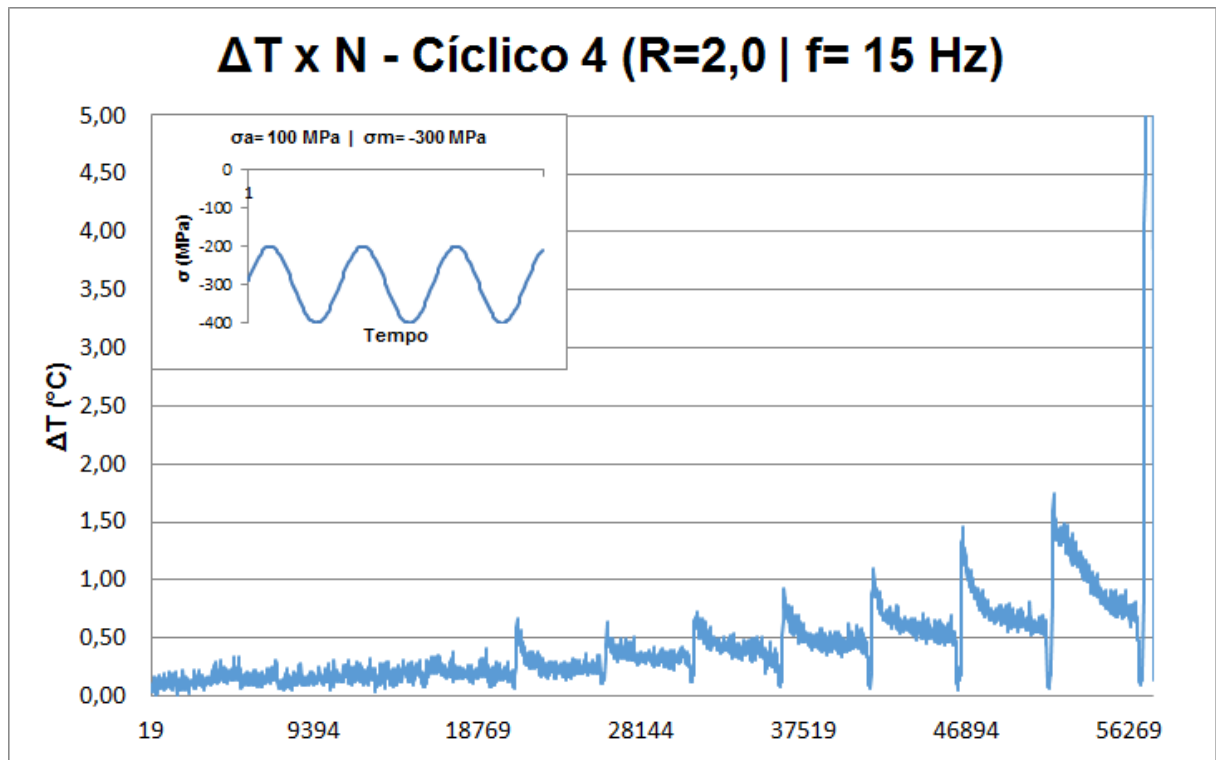


Figura 5.7 - Gráfico  $\Delta T \times N$  apresentando o comportamento do Teste cíclico 4.

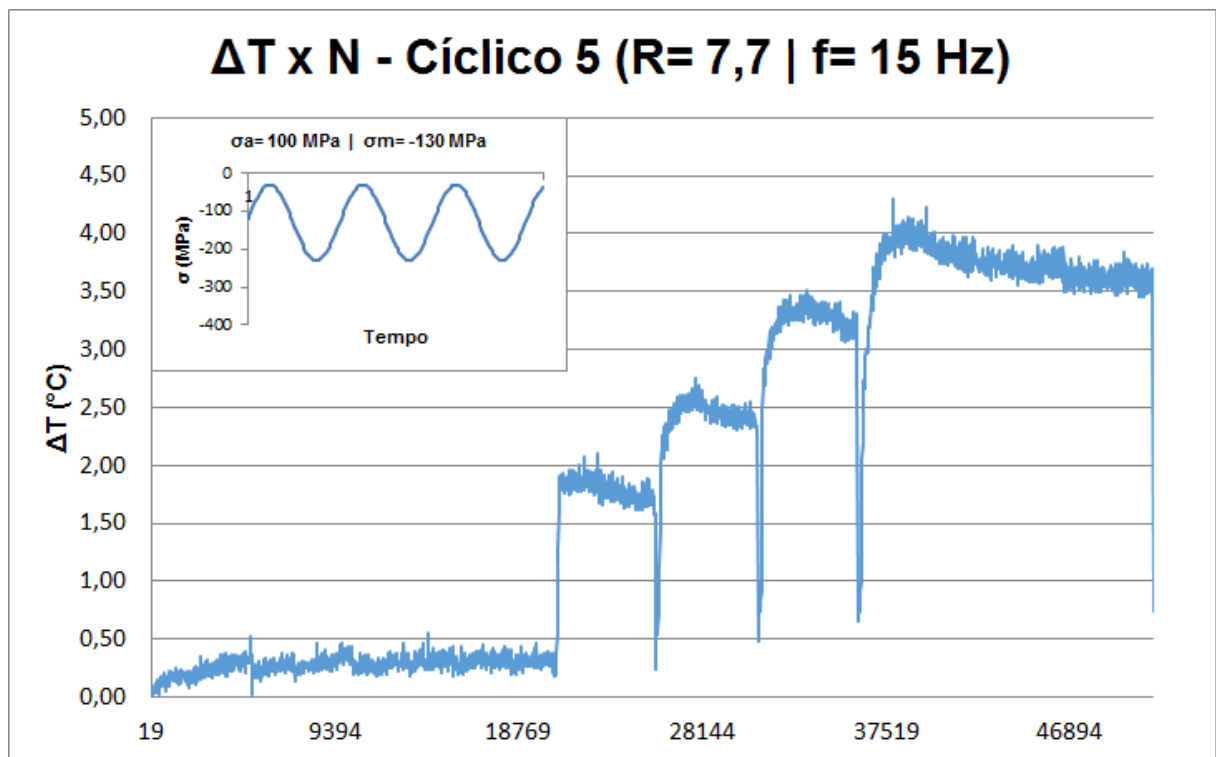


Figura 5.8 - Gráfico  $\Delta T \times N$  apresentando o comportamento do Teste cíclico 5.

Para cada patamar foram obtidas as variações de temperaturas no momento em que a temperatura se estabiliza ao longo do número de ciclos e a respectiva tensão alternada  $\sigma_a$  do patamar. Nos gráficos  $\Delta T \times N$  é possível notar um

comportamento em comum, as variações de temperatura  $\Delta T$  antes de ultrapassar o limite de fadiga ( $S_L$ ) (segundo Luong e Risitano) não ultrapassam  $\Delta T = 0,5^\circ\text{C}$  e, após passar do  $S_L$  aumenta à medida que o patamar – e logo, a tensão  $\sigma_a$  – aumenta.

Os patamares em vermelho foram usados para interpolar a reta menos inclinada da esquerda, já os verdes foram usados para a reta mais inclinada da direita e os que estão marcados com asterisco não foram usados, pois apresentaram flambagem ou instabilidade na temperatura, não havendo temperatura de estabilização precisa. Segue abaixo os resultados numéricos interpretados de  $\Delta T_{est}$ ,  $\sigma_a$ ,  $\sigma_m$ ,  $\sigma_{min}$  e  $\sigma_{max}$  para os testes cíclicos de 1 a 5, mostrados na Tabela 5.1 a Tabela 5.5.

Tabela 5.1 – Resultados numéricos para o teste 1.

R= 2		Teste 1									
Patamar	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	*11
$\Delta T_{est}$ (°C)	0,3	0,34	0,67	0,83	0,98	1,16	1,31	1,5	2,33	2,02	1,7
$\sigma_a$ (MPa)	50	80	90	100	110	120	130	140	150	160	180
$\sigma_m$ (MPa)	-150	-240	-270	-300	-330	-360	-390	-420	-450	-480	-540
$\sigma_{min}$ (MPa)	-200	-320	-360	-400	-440	-480	-520	-560	-600	-640	-720
$\sigma_{max}$ (MPa)	-100	-160	-180	-200	-220	-240	-260	-280	-300	-320	-360

Tabela 5.2 - Resultados numéricos para o teste 2.

R= 7,7		Teste 2															
Patamar	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	*16	*17
$\Delta T_{est} (^\circ\text{C})$	0,12	0,16	0,2	0,25	0,34	0,44	0,56	0,69	0,83	1,34	2,03	2,69	3,21	3,84	4,6	6	10,25
$\sigma_a$ (MPa)	80	90	100	110	120	130	140	150	160	180	200	220	230	240	250	260	270
$\sigma_m$ (MPa)	-104	-117	-130	-143	-156	-169	-182	-195	-208	-234	-260	-286	-299	-312	-325	-338	-351
$\sigma_{min}$ (MPa)	-184	-207	-230	-253	-276	-299	-322	-345	-368	-414	-460	-506	-529	-552	-575	-598	-621
$\sigma_{max}$ (MPa)	-24	-27	-30	-33	-36	-39	-42	-45	-48	-54	-60	-66	-69	-72	-75	-78	-81

Tabela 5.3 - Resultados numéricos para o teste 3.

R= 7,7		Teste 3																
Patamar	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	*18
$\Delta T_{est} (^\circ\text{C})$	0,11	0,1	0,14	0,08	0,08	0,17	0,52	0,75	0,97	1,34	1,63	1,99	2,37	2,6	3,01	3,71	4,71	12,09
$\sigma_a$ (MPa)	80	90	100	110	120	130	140	150	160	180	190	200	210	220	230	240	250	270
$\sigma_m$ (MPa)	-104	-117	-130	-143	-156	-169	-182	-195	-208	-234	-247	-260	-273	-286	-299	-312	-325	-351
$\sigma_{min}$ (MPa)	-184	-207	-230	-253	-276	-299	-322	-345	-368	-414	-437	-460	-483	-506	-529	-552	-575	-621
$\sigma_{max}$ (MPa)	-24	-27	-30	-33	-36	-39	-42	-45	-48	-54	-57	-60	-63	-66	-69	-72	-75	-81

Tabela 5.4 - Resultados numéricos para o teste 4.

R= 2	Teste 4											
Patamar	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	*12
$\Delta T_{est}$ (°C)	0,21	0,15	0,16	0,19	0,23	0,23	0,3	0,48	0,52	0,61	0,8	7,6
$\sigma_a$ (MPa)	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160
$\sigma_m$ (MPa)	-150	-180	-210	-240	-270	-300	-330	-360	-390	-420	-450	-480
$\sigma_{min}$ (MPa)	-200	-240	-280	-320	-360	-400	-440	-480	-520	-560	-600	-640
$\sigma_{max}$ (MPa)	-100	-120	-140	-160	-180	-200	-220	-240	-260	-280	-300	-320

Tabela 5.5 - Resultados numéricos para o teste 5.

R= 7,7	Teste 5							
Patamar	1	2	3	4	5	6	7	8
$\Delta T_{est}$ (°C)	0,33	0,34	0,33	0,31	1,75	2,34	3,18	3,67
$\sigma_a$ (MPa)	80	90	100	110	180	200	220	230
$\sigma_m$ (MPa)	-104	-117	-130	-143	-234	-260	-286	-299
$\sigma_{min}$ (MPa)	-184	-207	-230	-253	-414	-460	-506	-529
$\sigma_{max}$ (MPa)	-24	-27	-30	-33	-54	-60	-66	-69

Com os valores de variação da temperatura de estabilização ( $\Delta T_{est}$ ) e tensão flutuante ( $\sigma_a$ ) do patamar, foi então possível aplicar os métodos Risitano cíclico e o método de Luong, vistos da Figura 5.9 a Figura 5.13.



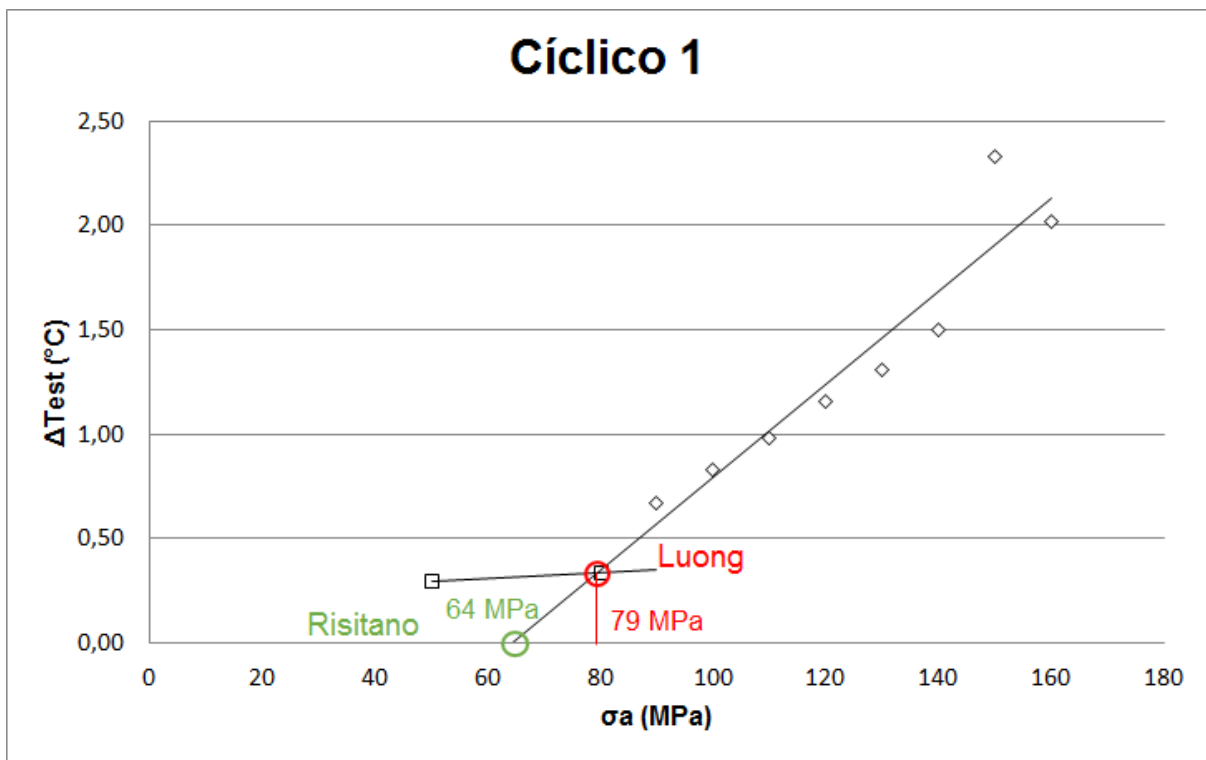


Figura 5.9 - Gráfico  $\Delta T \times \sigma_a$  indicando os valores para o limite de fadiga ( $S_L$ ) de Risitano (em verde) e de Luong (em vermelho), para o teste cíclico 1.

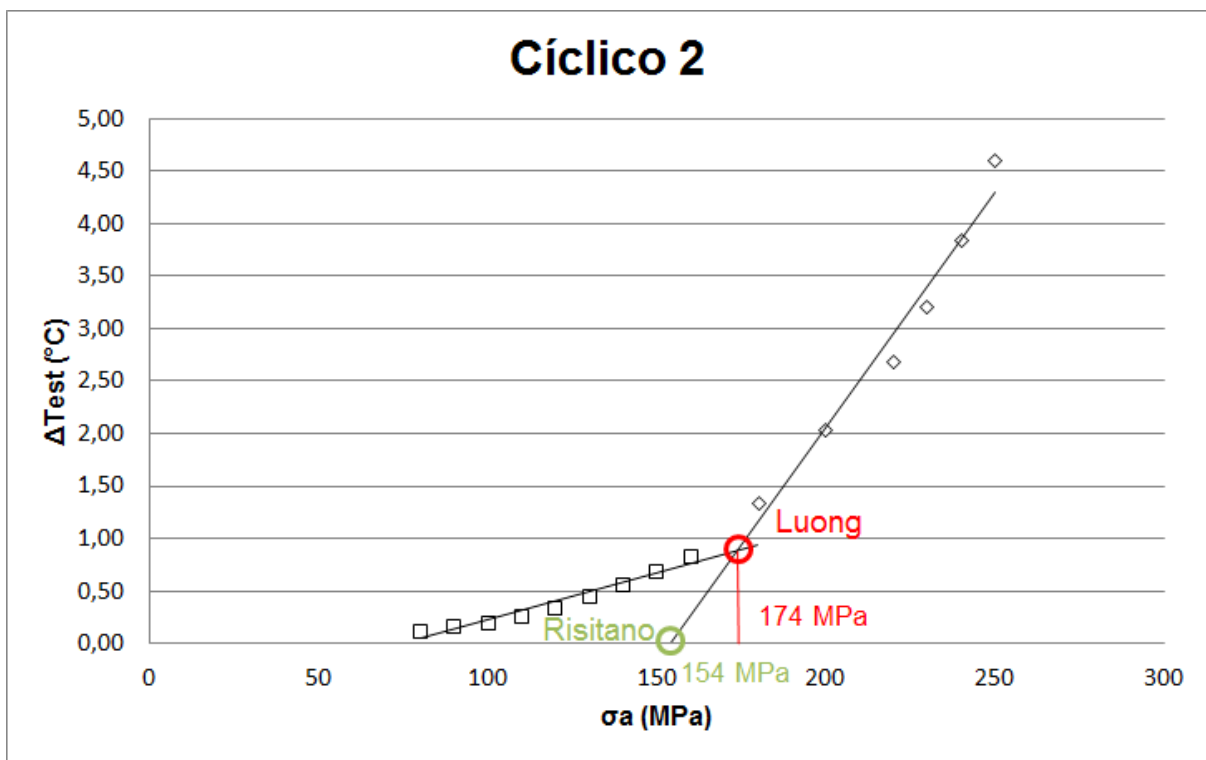
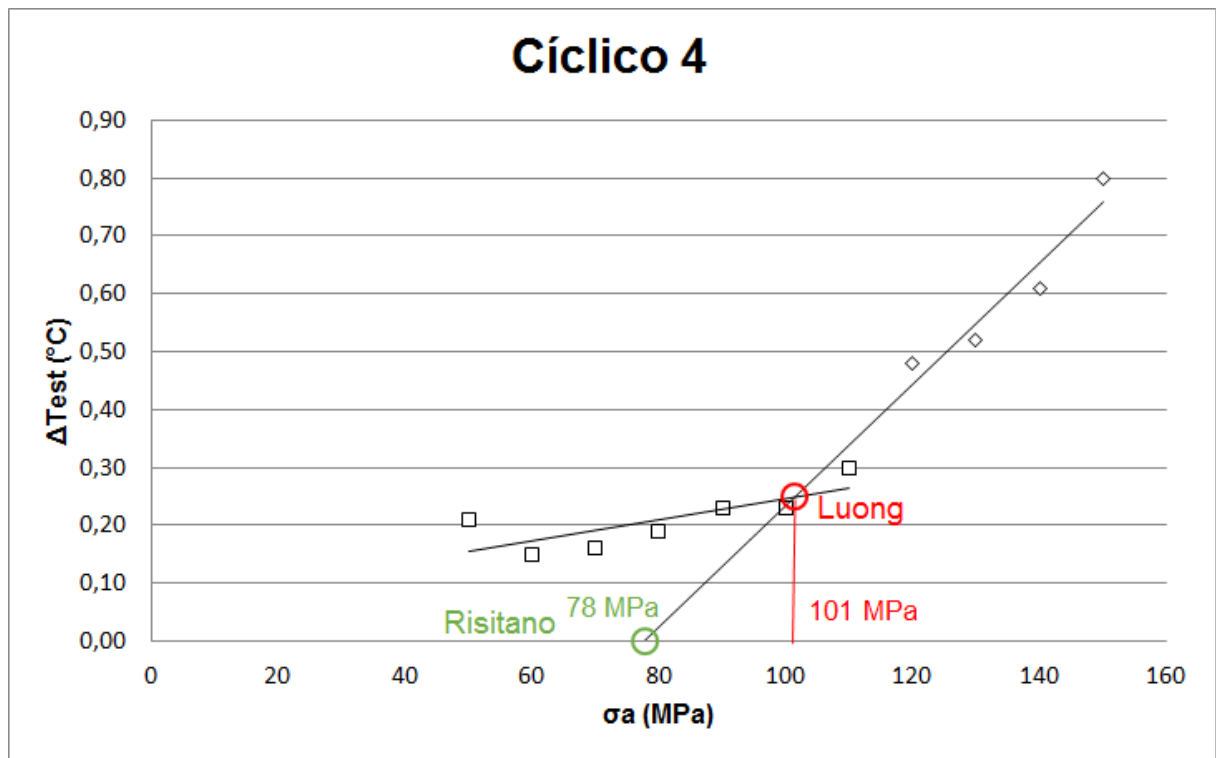
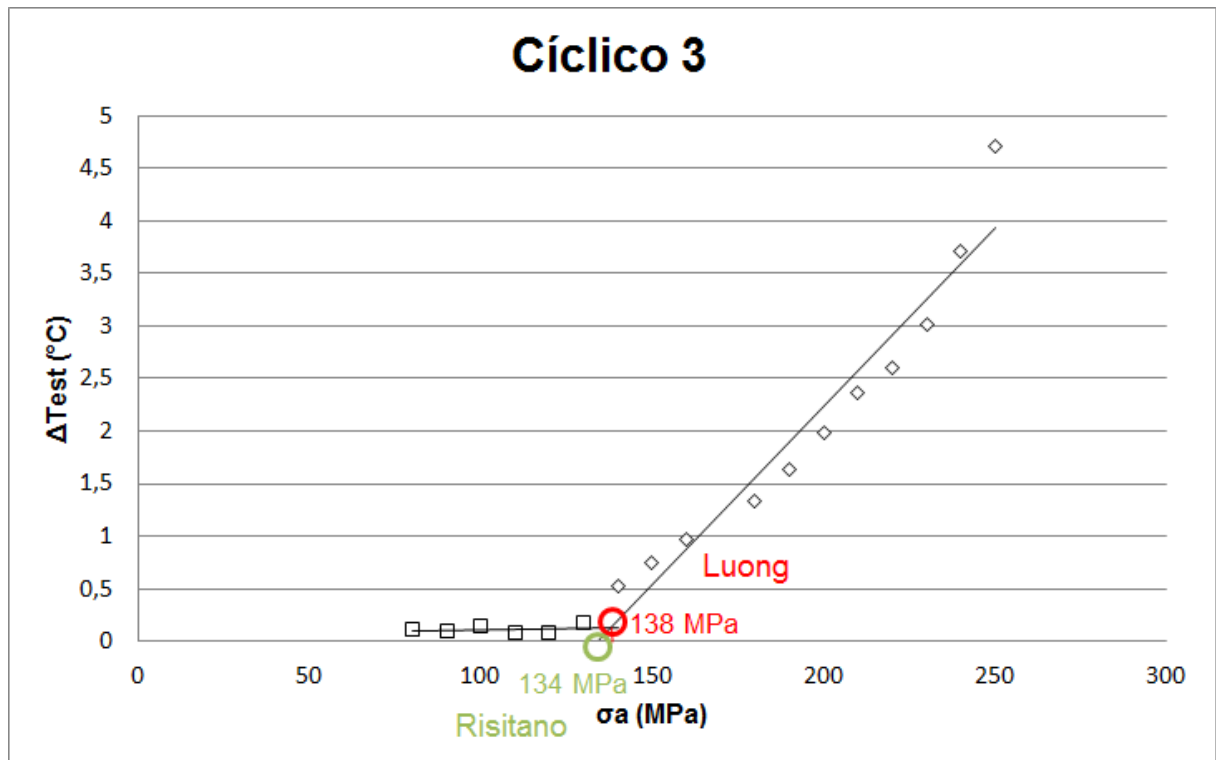


Figura 5.10 - Gráfico  $\Delta T \times \sigma_a$  indicando os valores para o limite de fadiga ( $S_L$ ) de Risitano (em verde) e de Luong (em vermelho), para o teste cíclico 2.



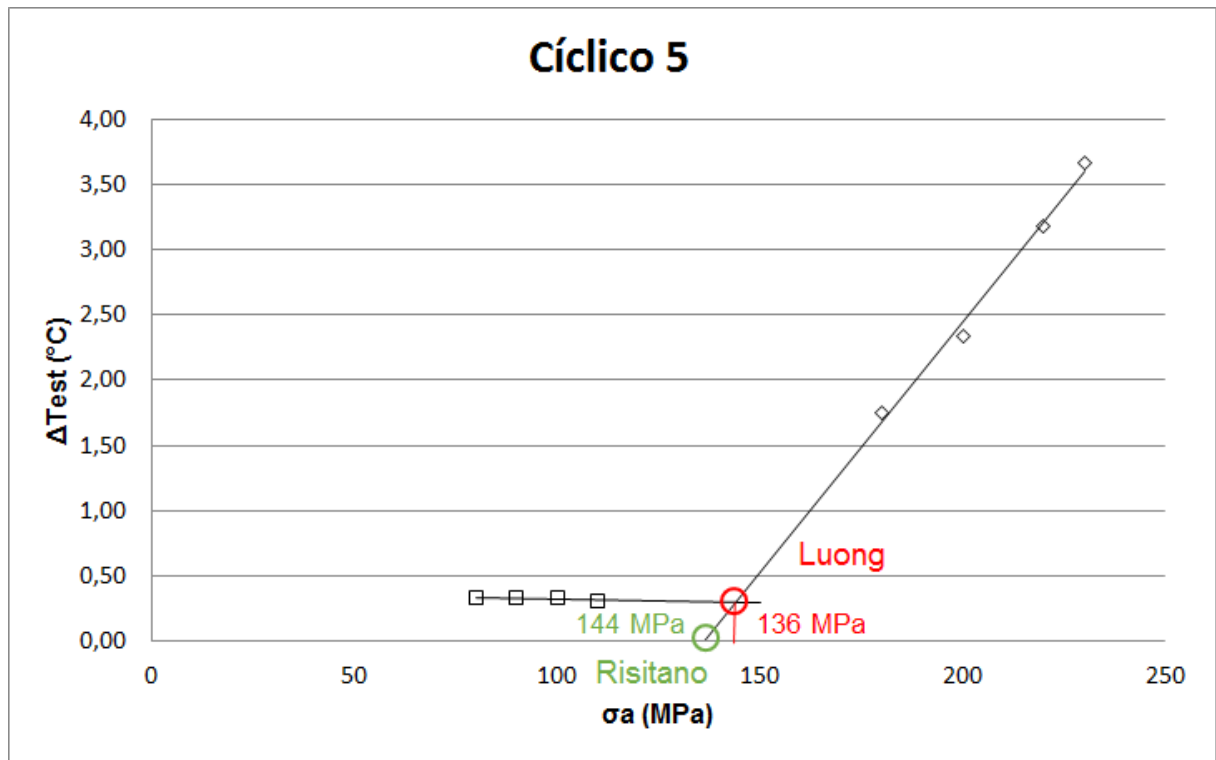


Figura 5.13 - Gráfico  $\Delta T \times \sigma_a$  indicando os valores para o limite de fadiga ( $S_L$ ) de Risitano (em verde) e de Luong (em vermelho), para o teste cíclico 5.

Os resultados obtidos para o limite de fadiga ( $S_L$ ) foram obtidos igualando as equações da reta (Luong) ou igualando a reta da direita à zero (Risitano). Foi feito o erro relativo ao método Risitano (E1) e o erro relativo ao método de Luong, resumidos na Tabela 5.6:

Tabela 5.6 - Resultado do limite de fadiga ( $S_L$ ) para cada corpo de prova testado segundo o método Risitano e o método de Luong e os seus erros relativos.

CP	R [ ]	f [Hz]	Luong	Risitano	E1	E2
			$S_L$ [Mpa]	$S_L$ [Mpa]		
1	2,0	15	79	64	24%	19%
2	7,7	15	174	154	13%	11%
3	7,7	15	138	134	3%	3%
4	2,0	15	101	78	31%	23%
5	7,7	15	144	136	6%	5%

Tabela 5.7 - Média dos resultados do limite de fadiga ( $S_L$ ) para cada razão R de tensão corpo de prova testado segundo o método Risitano e o método de Luong e os seus erros relativos.

	Luong	Risitano	E1	E2
$R$	$S_L$ [Mpa]	$S_L$ [Mpa]		
2,0	90	71	27%	22%
7,7	152	142	7%	7%

No CP5 não se elevou o patamar de tensão até a carga crítica de flambagem com o intuito de, após os oito patamares ensaiados, usar as tensões do último patamar ensaiado (patamar nº 8,  $\sigma_a = 250$  Mpa,  $\sigma_m = -325$  Mpa,  $\sigma_{\min} = -575$  Mpa,  $\sigma_{\min} = 75$  Mpa) ensaiando-o além da vida infinita ( $N > 10^6$  ciclos) para verificar se o limite de fadiga foi realmente ultrapassado ou não.

O CP5 foi ensaiado até  $N = 1,8 \times 10^6$  ciclos e não sofreu fadiga, comprovando que os resultados obtidos utilizando o método de Risitano e de Luong para  $R = 7,7$  não correspondem ao limite de fadiga do material. Ainda, este CP não apresentou nenhum dano macroscópico.

Após os ensaios e resultados da interpretação dos dados, o CP cíclico número 5, que ainda conservava a sua integridade estrutural (foi o único que não foi elevado acima da tensão crítica de flambagem), retornou a máquina de ensaios universal para, usando a tensão do último patamar de tensão ( $\sigma_a = 230$  MPa), ser testado extrapolando o número de ciclos de vida infinita  $10^6$  de ciclos.

Dessa forma, o CP cíclico 5 falharia por fadiga já que, segundo Luong para o caso de tensões trativas [9], nesta tensão flutuante, já teria passado do limite de fadiga ( $S_L$ ).

Assim, o CP cíclico 5 foi ensaiado até 1,8 milhões de ciclos e não falhou, significando que ainda não havia ultrapassado o limite de fadiga, mostrando que os métodos Risitano e o método de Luong são não aplicáveis para as razões compressivas testadas para o lado compressivo do diagrama  $\sigma_a \times \sigma_m$ . Provavelmente são aplicadas às razões com pouca compressão, próximas à  $R = -1$ .

Contudo, nenhum CP falhou por fadiga, mas sim por flambagem. Com o objetivo de fazer o CP falhar por fadiga e não por flambagem, reduziu-se a tensão média compressiva, para um novo CP testado, o CP cíclico número 6, de razão de tensão  $R = -3$  (mais próxima de  $R = -1$ ) e mesma frequência  $f = 15$  Hz. Vale ressaltar que, desta vez, o material via tensões trativas, o quê corrobora para

abertura de trincas. Vejamos o comportamento térmico do CP6 no gráfico  $\Delta T \times N$ , na Figura 5.14.

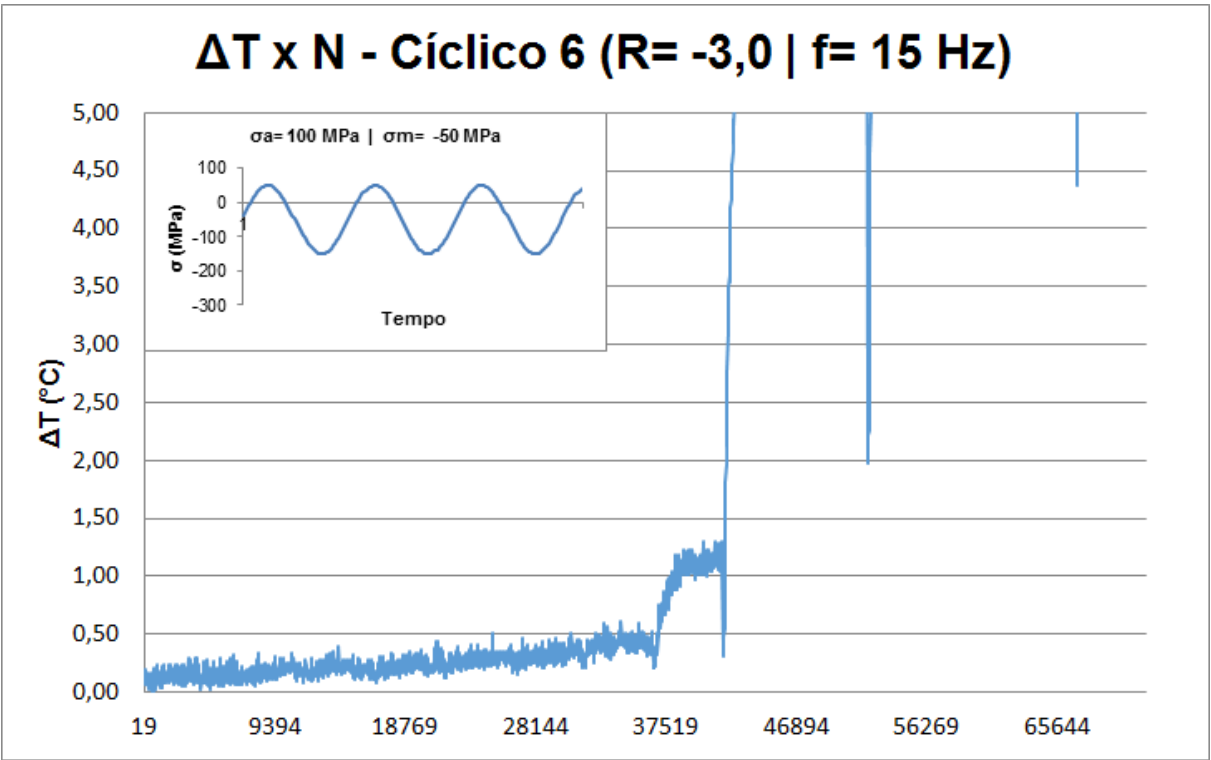


Figura 5.14 - Gráfico  $\Delta T \times N$  apresentando o comportamento do Teste cíclico 6.

Segue abaixo os resultados numéricos interpretados de  $\Delta T_{est}$ ,  $\sigma_a$ ,  $\sigma_m$ ,  $\sigma_{mín}$  e  $\sigma_{máx}$  para o teste cíclico de 6, mostrados na Tabela 5.8, onde os patamares em vermelho corresponda à reta menos inclinada (da esquerda) e os em ver à reta mais inclinada (da direita).

Tabela 5.8 - Resultados numéricos para o teste 6.

R= -3		Teste 6									
Patamar	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$\Delta T$ (°C)	0,15	0,17	0,2	0,22	0,3	0,32	0,4	1,11	9	14,2	19,42
$\sigma_a$ (MPa)	70	80	90	100	120	150	180	210	230	240	250
$\sigma_m$ (MPa)	-91	-104	-117	-130	-156	-195	-234	-273	-299	-312	-325
$\sigma_{mín}$ (MPa)	-161	-184	-207	-230	-276	-345	-414	-483	-529	-552	-575
$\sigma_{máx}$ (MPa)	-21	-24	-27	-30	-36	-45	-54	-63	-69	-72	-75

Da mesma forma que os outros CPs, foram aplicados os métodos de Risitano e de Luong, indicados na Figura 5.15.

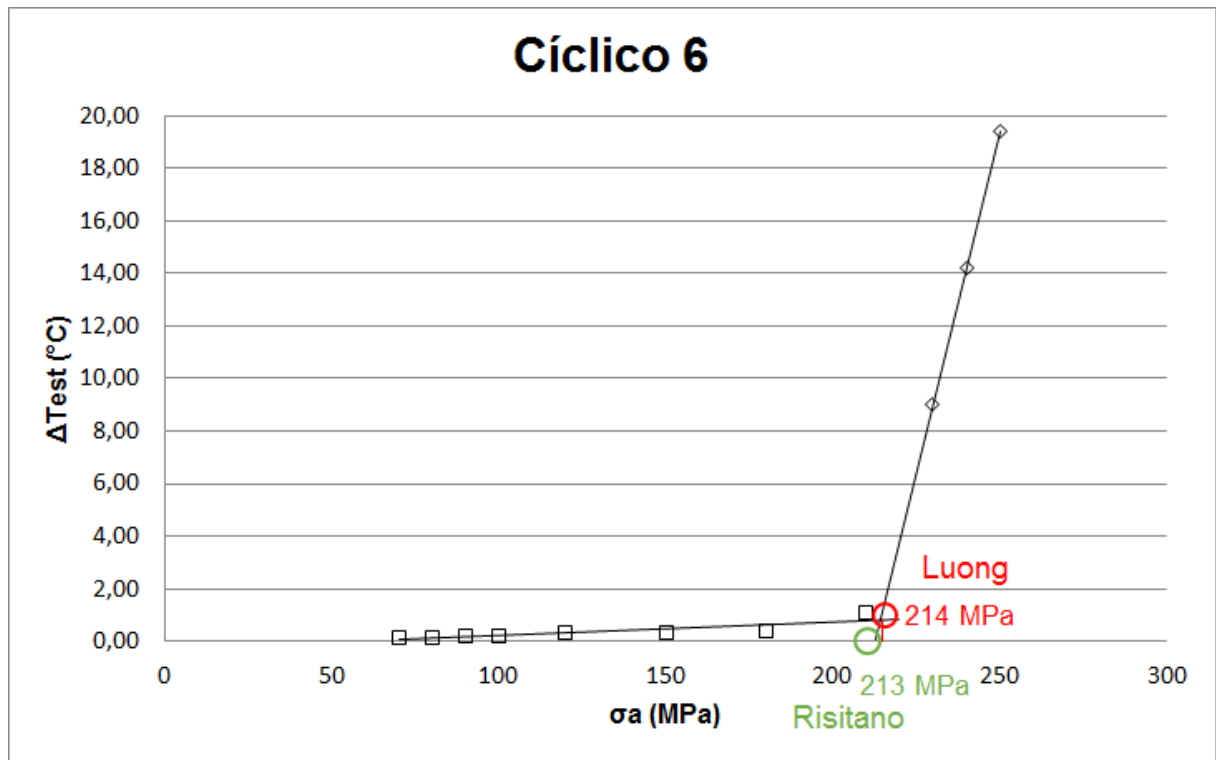


Figura 5.15 - Gráfico  $\Delta T \times \sigma_a$  indicando os valores para o limite de fadiga ( $S_L$ ) de Risitano (em verde) e de Luong (em vermelho), para o teste cíclico 6.

O CP6 foi ensaiado em 11 patamares de tensão, indicados na Tabela 5.8, e no décimo primeiro patamar, falhou por fadiga. Apesar da falha, o patamar 11 não apresentou instabilidade no gráfico  $\Delta T \times N$ , como havia apresentado para a falha de flambagem, mas sim uma variação de temperatura de estabilidade  $\Delta T_{est}$  alta, de 19,42 °C, maior que todos os outros CPs cíclicos ensaiados.

Todos os resultados médios de Risitano e de Luong para as três razões de tensões testadas ( $R = 2,0$ ,  $R = 7,7$  e  $R = -3$ ), assim como as tensões que apontaram falhas (por flambagem fadiga) ou não (CP5), referente aos seis CPs foram mostradas no diagrama  $\sigma_a \times \sigma_m$ , mais as curvas de Goodman, Gerber e do limite de escoamento ( $S_y$ ) e os resultados da referência [19] estão mostrados na Figura 5.16.

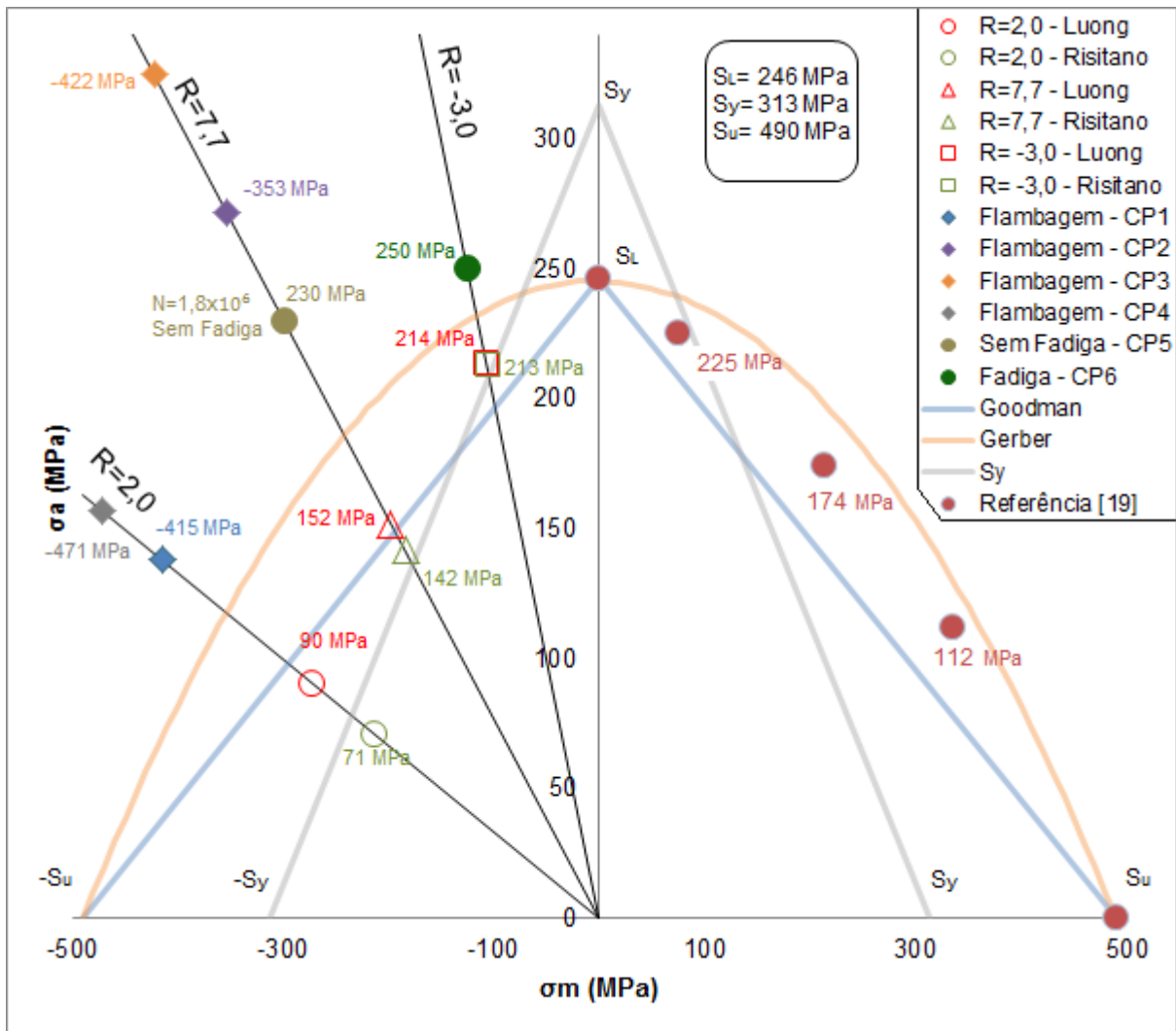


Figura 5.16 - Resumo dos resultados de Risitano, Luong, flambagem e fadiga, juntos às curvas de Goodman, Gerber e do limite de escoamento e aos resultados referentes à [19].

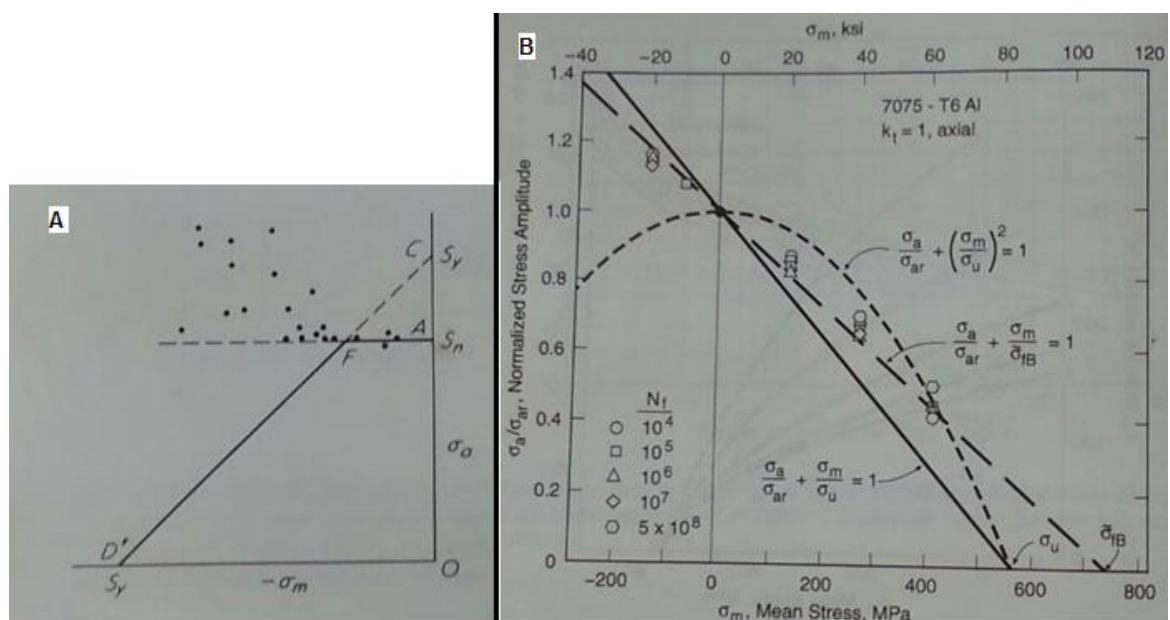


Figura 5.17 - Pontos no diagrama  $\sigma_a \times \sigma_m$  para o lado compressivo, segundo Juvinall [20] e Dowling [21], mostrados em (A) e (B), respectivamente.

Nota-se, na Figura 5.16 que o limite de fadiga ( $S_L$ ), à medida que  $\sigma_m$  diminui no lado compressivo, tende a aumentar. Esse mesmo resultado foi obtido por Juvinall [20] e Dowling [21], como apresentado na Figura 5.17 (A) e Figura 5.17 (B).

Dentre os seis testes cíclicos, referente aos métodos Risitano e Luong, o que mostrou maior confiabilidade nos resultados foi o teste número 5, tendo em vista a análise adotada para a interpretação dos dados. Não foram usados os patamares em que há a inflexão/mudança de curvatura da curva  $\Delta T \times \sigma_a$  (próximo ao  $S_L$  determinado por de Luong). Foram usando pontos referentes aos patamares estáveis, evitando confusão referente aos dados da primeira curva e da segunda curva na interpolação das retas.

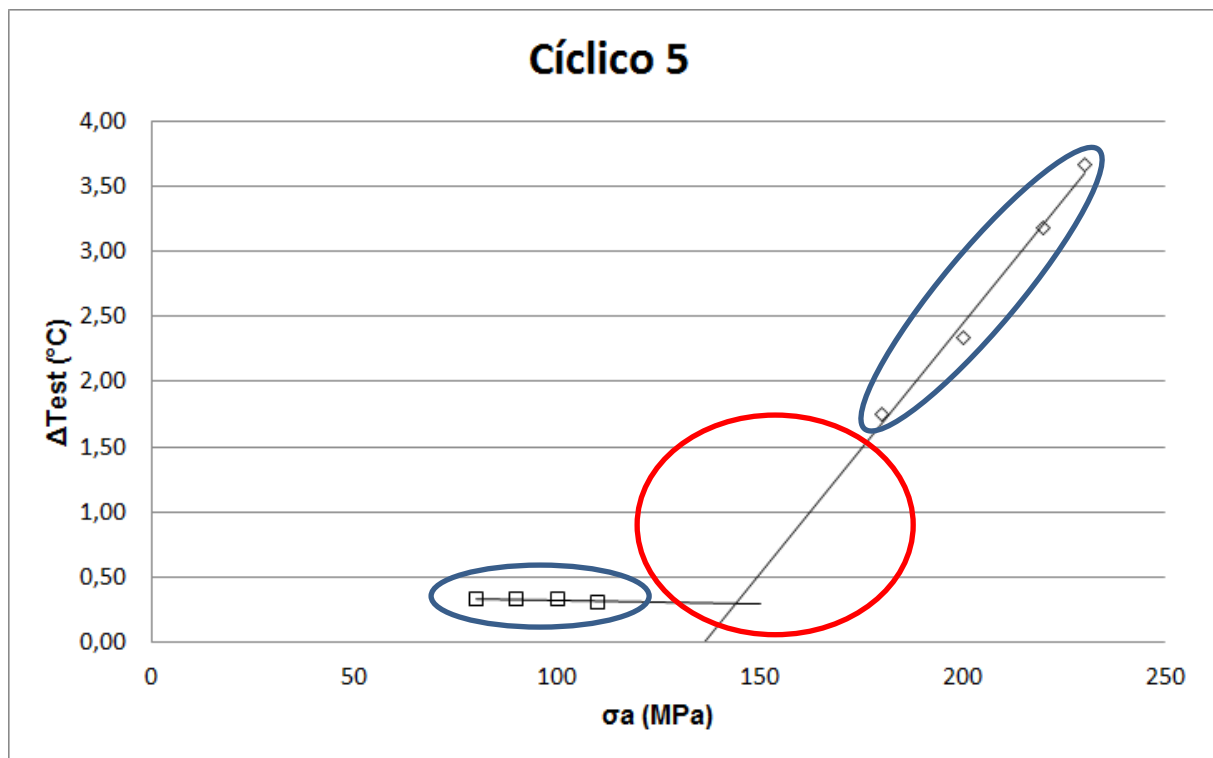


Figura 5.18 - Desenho esquemático do resultado do teste cíclico 5, mostrando a região dos patamares sugestionados, em elipses azuis, e a região dos patamares que devem ser evitados, demarcada pelo círculo vermelho.

Muito se discute, inclusive em [22], onde exatamente começa os patamares referentes à primeira e à segunda reta. Adotando esse tipo de análise, esse erro interpretativo é desviado, acrescentando maior confiança na determinação do  $S_L$  em ambos os métodos adotados.



## 5.2 Estático

Dois testes estáticos de tração foram executados. O teste estático número 1 foi feito com um carregamento monotônico, até alcançar-se a fratura. Já o teste estático número 2 foi feito carregando e descarregando em cinco vezes: foi carregado e descarregado três vezes até a deformação  $\epsilon = 1\%$ , depois até  $\epsilon = 3\%$  e por fim até  $\epsilon = 5\%$ , onde o mesmo não foi levado até a fratura. Segue abaixo, na Figura 5.19 e Figura 5.20, o gráfico da tensão versus deformação dos CPs 1 e 2, respectivamente:

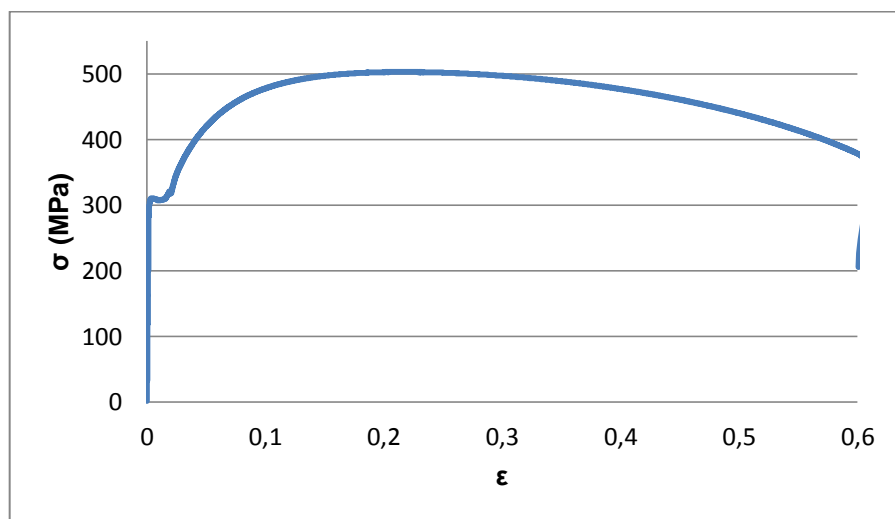


Figura 5.19 - Gráfico tensão deformação do CP1.

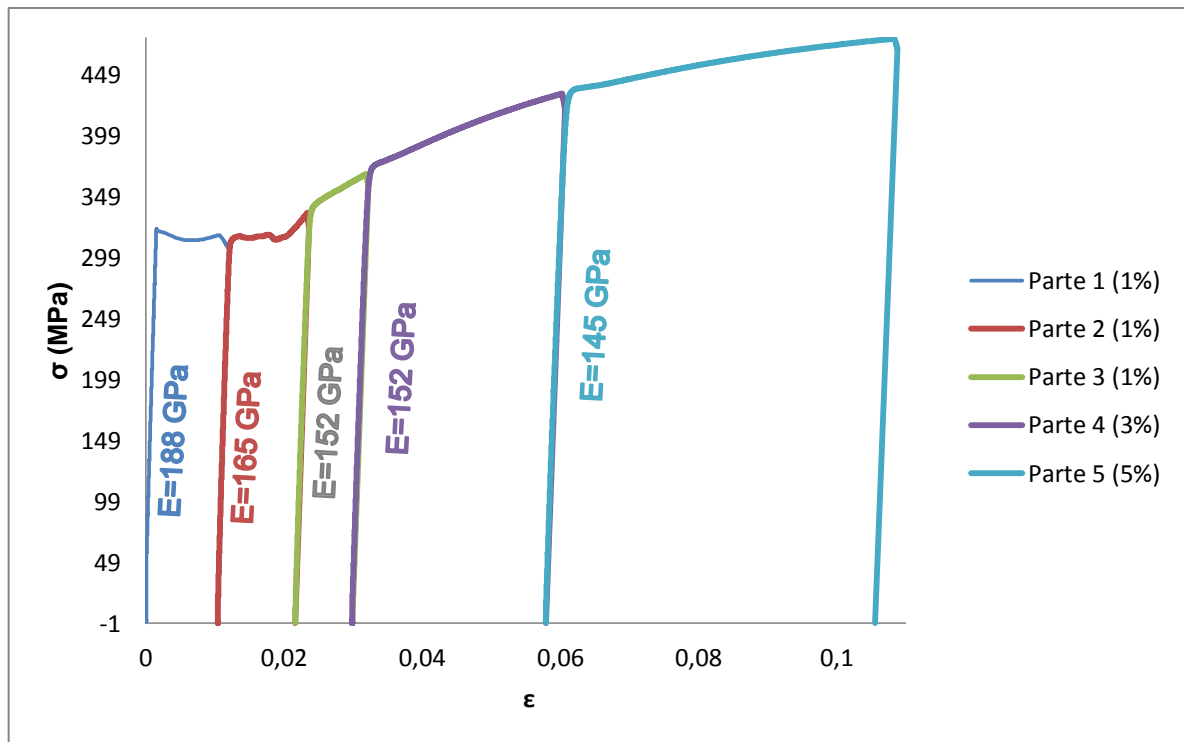


Figura 5.20 - Gráfico tensão deformação do CP2, relevando as deformações residuais.

No gráfico  $\sigma \times \epsilon$  para CP2, foram usados apenas os dados do carregamento e admitiu-se que, no descarregamento, a curva voltaria linearmente com a inclinação do módulo de Young  $E$ , que foi calculado sempre do intervalo de 100 a 300 MPa, visto que a partir de 100 MPa a inclinação já é linear e 300 MPa está antes do limite de escoamento ( $S_y = 313$  MPa).

Comparando-se as curvas  $\sigma \times \epsilon$  do CP1 e CP2, nota-se que as duas têm comportamento semelhante até a deformação de 11%, já que o CP2, quando recarregado, volta a seguir a curva monotônica  $\sigma \times \epsilon$ . Notou-se também que o módulo de Young diminuiu a cada carregamento.

Apesar de somar 11% todas as deformações do CP2, o mesmo teve uma deformação residual de 10,555%, contabilizando 0,445% de deformação elástica ao final da série de carregamentos, antes do último descarregamento.

Assim, por meio do método Risitano estático, foram determinados os valores do limite de fadiga ( $S_L$ ) para a razão  $R = -1$  de ambos os testes, em todos os carregamentos (para o CP estático 2), indicados na Figura 5.21 a Figura 5.26.

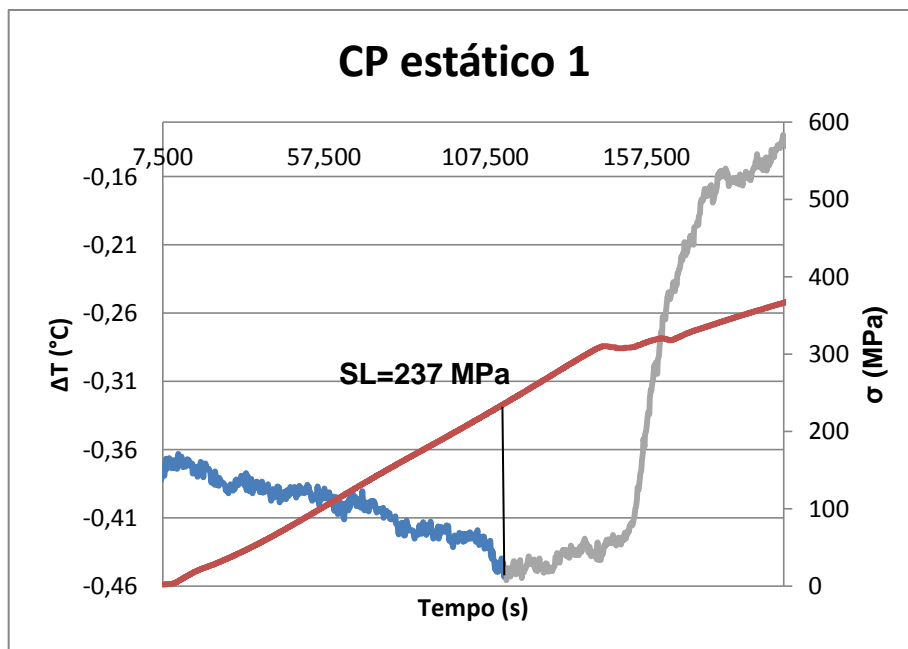


Figura 5.21 - As curvas azuis e cinza correspondem à temperatura, sendo que a azul é considerada a sua fase linear e a cinza o resto da curva. A curva vermelha corresponde à tensão. (CP estático 1).

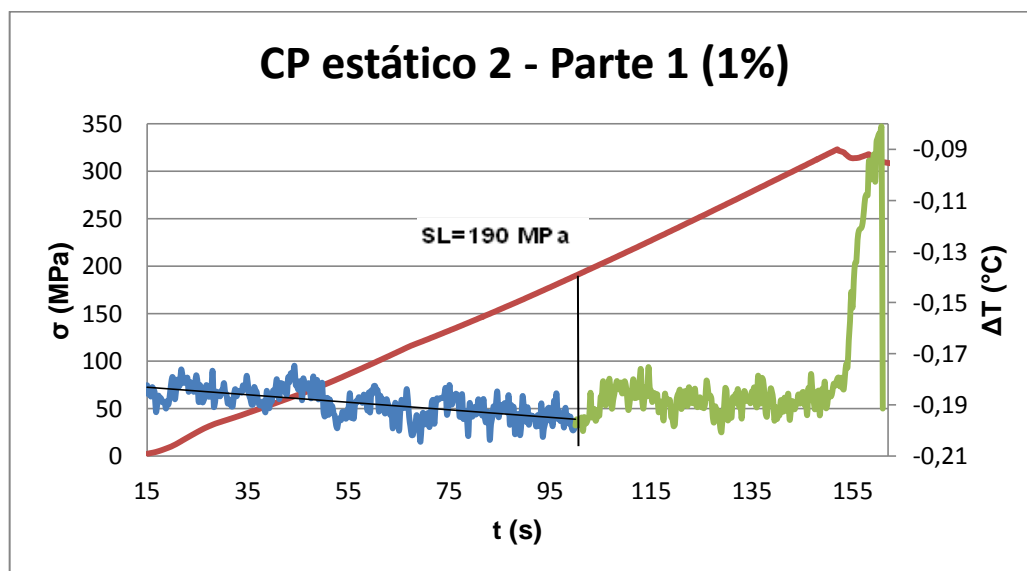


Figura 5.22 - As curvas azuis e verde correspondem à temperatura, sendo que a azul é considerada a sua fase linear e a verde o resto da curva. A curva vermelha corresponde à tensão. (CP estático 2 – Parte 1 (1%)).

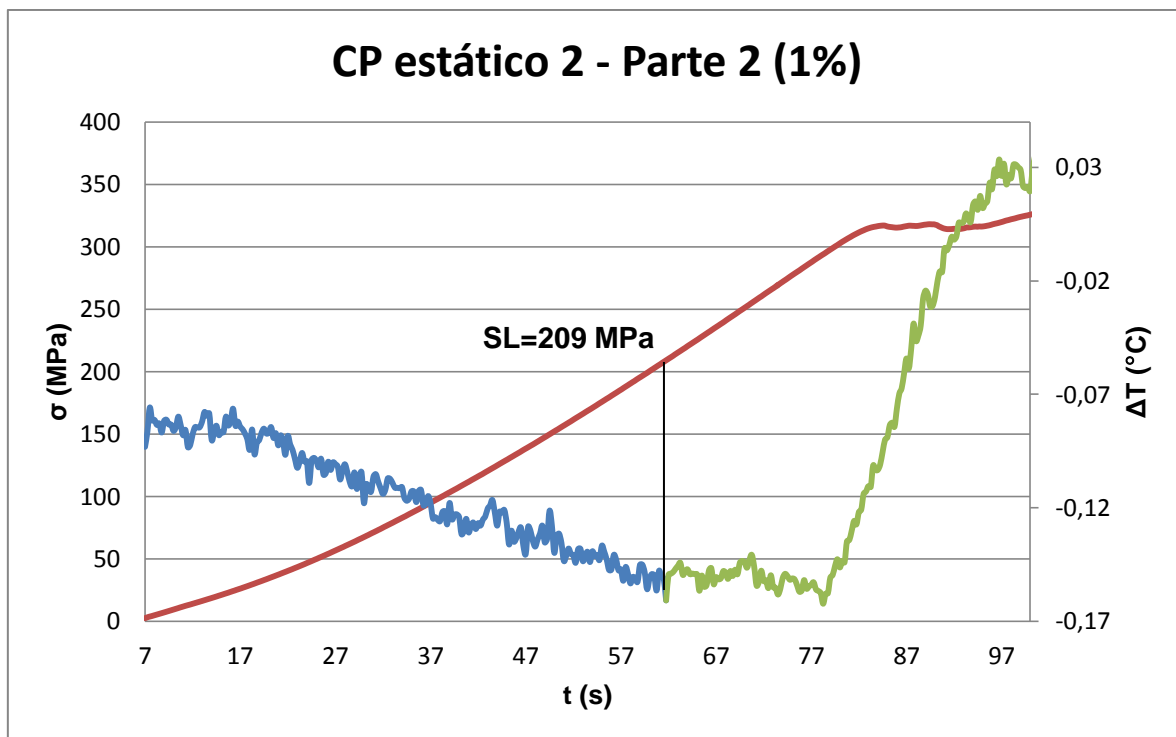


Figura 5.23 - As curvas azuis e verde correspondem à temperatura, sendo que a azul é considerada a sua fase linear e a verde o resto da curva. A curva vermelha corresponde à tensão. (CP estático 2 – Parte 2 (1%)).

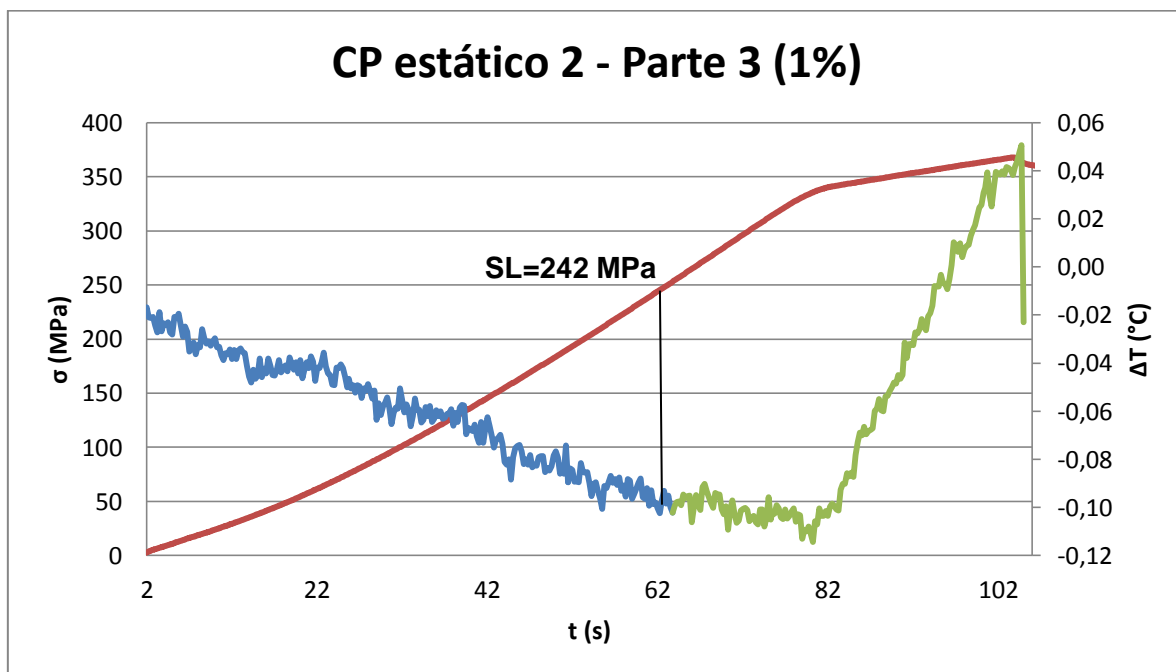


Figura 5.24 - As curvas azuis e verde correspondem à temperatura, sendo que a azul é considerada a sua fase linear e a verde o resto da curva. A curva vermelha corresponde à tensão. (CP estático 2 – Parte 3 (1%)).

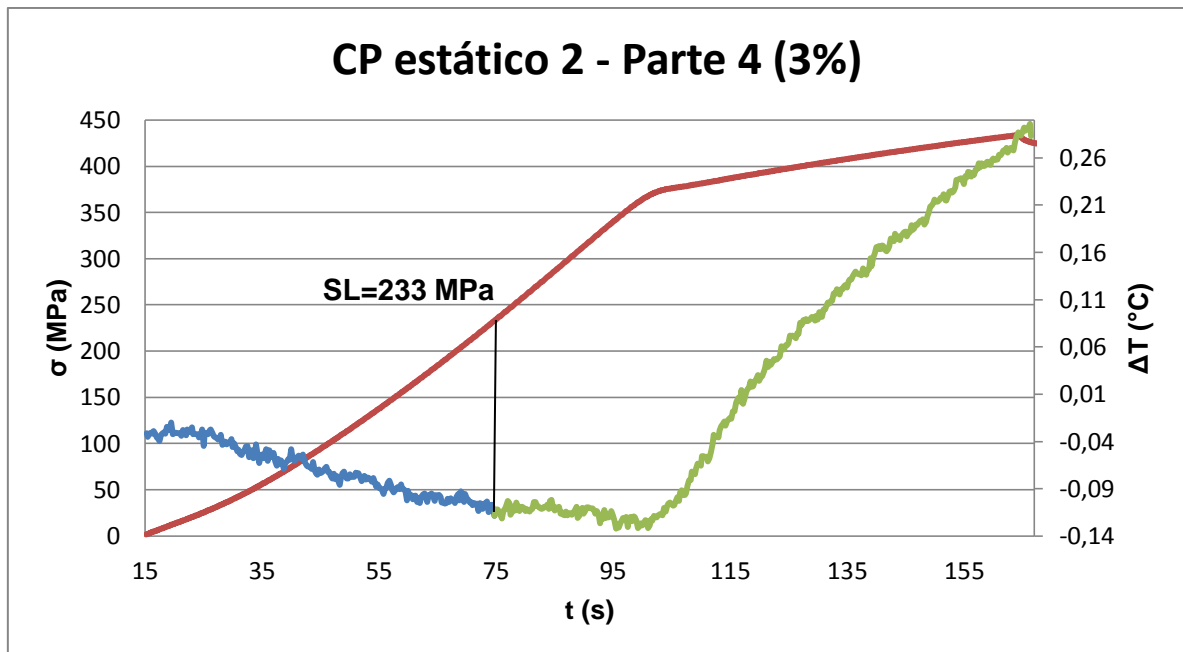


Figura 5.25 - As curvas azuis e verde correspondem à temperatura, sendo que a azul é considerada a sua fase linear e a verde o resto da curva. A curva vermelha corresponde à tensão. (CP estático 2 – Parte 4 (3%)).

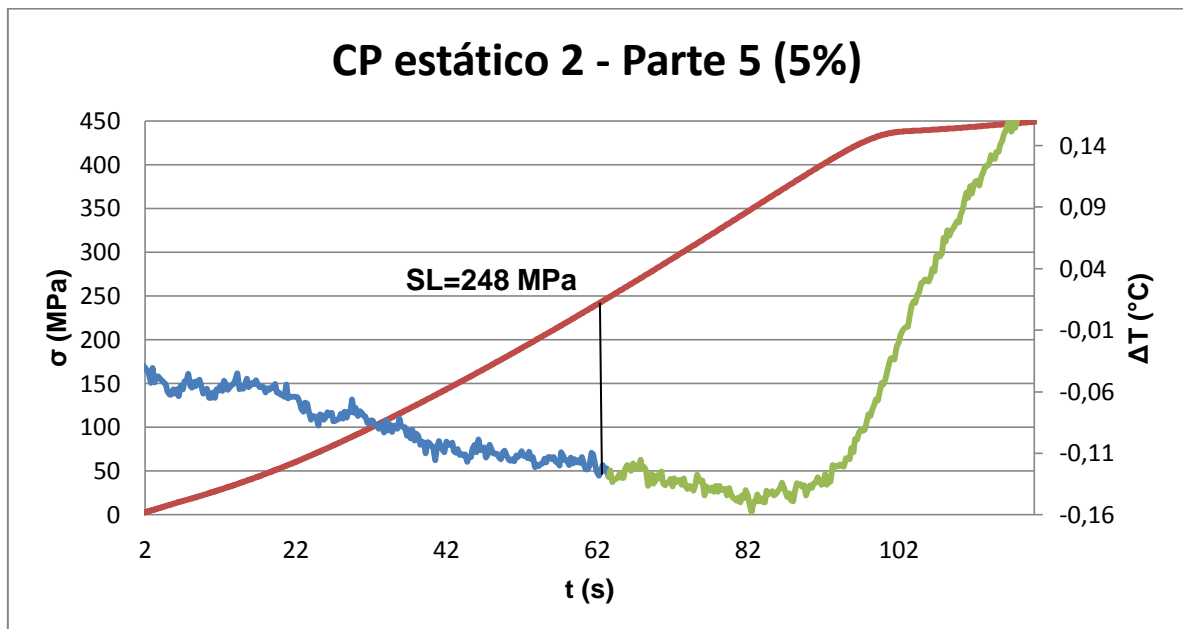


Figura 5.26 - As curvas azuis e verde correspondem à temperatura, sendo que a azul é considerada a sua fase linear e a verde o resto da curva. A curva vermelha corresponde à tensão. (CP estático 2 – Parte 5 (5%)).

Os resultados usando o método Risitano se mostram coerentes aos resultados obtidos em [19], obtidos pelo método de Luong, para o CP1 e, para o CP2, apenas quando foi carregado até  $\epsilon = 5\%$ .

Notou-se que, para o CP2, à medida que a quantidade de carregamentos e a deformação aumentavam, o limite de fadiga obtido se aproximava cada vez mais do valor referência  $S_L = 246 \text{ MPa}$ , obtidas em [19], com exceção da parte 3 ( $S_L = 242$

Mpa) que foi maior que o da parte 4 ( $S_L = 233$  Mpa). Seguem abaixo, na Tabela 5.9, um resumo dos resultados:

Tabela 5.9 - Resultados para o limite de fadiga  $S_L$  dos ensaios estáticos, analisados pelo método Risitano, e das referências [19], obtidos pelo método de Luong.

Testes	R	f	SL (MPa)
Estático 1	x	x	237
Estático 2 - Parte 1 (1%)	x	x	190
Estático 2 - Parte 2 (1%)	x	x	209
Estático 2 - Parte 3 (1%)	x	x	242
Estático 2 - Parte 4 (3%)	x	x	233
Estático 2 - Parte 5 (5%)	x	x	248
Referência [19]	-1	15	246

### 5.3 Flambagem

Como apenas nos testes cíclicos foram usadas cargas compressivas, apenas nestes seis testes serão feitos o estudo da flambagem, a princípio. Nesses seis testes, apenas dois não foram elevados o patamar de tensão a ponto de flambar, que foi o teste número 5 e 6.

Encarando a flambagem como totalmente elástica, foi usada a curva de Euler (equação 3.5) para calcular a tensão crítica ( $\sigma_{cr}$ ). Notou-se que os resultados foram entre 7992-10389 Mpa, um valor bem acima do próprio limite de resistência ( $S_u$ ) do material, mostrando a discrepância proveniente de uma abordagem errada, já que se trata de um caso inelástico de flambagem de uma coluna não longa, e nenhuma tensão compressiva no material superaria o limite de resistência à compressão do material.

Notando a necessidade de uma abordagem inelástica para o problema, foram medidos os dados iniciais e finais dos experimentos com o intuito de, ao final, calcular as tensões reais ( $\sigma_{cr\text{real}}$ ) nos espécimes.

Tabela 5.10 - Dados iniciais e finais dos corpos de prova ensaiados dinamicamente.

Teste	Dados iniciais			Dados finais (reais)		
	d0 [m]	I0 [m <sup>4</sup> ]	A0 [m <sup>2</sup> ]	D(real) [m]	I(real) [m <sup>4</sup> ]	A(real) [m <sup>2</sup> ]
1	0,00845	2,50E-10	5,61E-05	0,0105	5,97E-10	8,66E-05
2	0,00845	2,50E-10	5,61E-05	0,0112	7,72E-10	9,85E-05
3	0,00845	2,50E-10	5,61E-05	0,0103	5,42E-10	8,25E-05
4	0,00845	2,50E-10	5,61E-05	0,0099	4,62E-10	7,62E-05

Assim, foi calculado o raio de giração ao quadrado inicial e final (equação 3.4)  $r_0^2$  e  $r_{real}^2$ , respectivamente, e a esbeltez inicial e final (equação 3.6)  $\lambda_0$  e  $\lambda_{real}$ , respectivamente. Foram calculadas as esbeltez respectivas ao limite de escoamento  $\lambda_{Sy}$  e a referente ao limite de resistência  $\lambda_{Su}$ , por meio da equação 3.7.

Calculando a esbeltez referente ao limite de escoamento ( $\lambda_y$ ), por meio da equação 3.5, foi possível calcular a carga crítica em relação ao limite de escoamento  $P_{cry}$ . Este valor é tido como a tensão do limite de proporcionalidade, visto que seus valores são bem próximos e o limite de proporcionalidade é um valor difícil de mensurar, praticamente teórico. O mesmo foi feito para calcular a carga crítica em relação ao limite de resistência  $P_{cru}$ . Por ser muito complicado a obtenção do limite de resistência compressivo, foi usado o limite de resistência à tração.

Para calcular os valores reais da tensão, foram usados os valores das cargas críticas  $P_{creal}$  obtidas pela interface da máquina de ensaios, no momento da flambagem. Dividindo pela área final  $A_{real}$ , foi possível obter a tensão crítica real de flambagem  $\sigma_{creal}$ . Nota-se que, se dividirem pelas respectivas áreas iniciais, os valores das tensões críticas obtidos é em torno de 621 e 640 Mpa, algo impossível, já que está acima do limite de resistência ( $S_u$ ).

Tabela 5.11 - Resumo de todos os resultados obtidos nos testes referentes à flambagem.

Teste	1	2	3	4
$P_{cr}$ [N]	484222	582595	561992	448179
$P_{cr}$ [ton]	49	59	57	46
$\sigma_{cr}$ [MPa]	8635	10389	10021	7992
$r_0^2$ [m <sup>2</sup> ]	4,5E-06	4,5E-06	4,5E-06	4,5E-06
$r_{real}^2$ [m <sup>2</sup> ]	6,9E-06	7,8E-06	6,6E-06	6,1E-06
$\lambda_0$	30	27	28	31
$\lambda_{real}$	24	21	23	27
$\lambda_y$	158	158	158	158
$\lambda_u$	126	126	126	126
$P_{cry}$ [N]	17553	17553	17553	17553
$P_{cry}$ [ton]	1,8	1,8	1,8	1,8
$P_{crreal}$ [N]	35900	34800	34800	35900
$P_{crreal}$ [ton]	3,7	3,5	3,5	3,7
$\sigma_{crreal}$ [MPa]	415	353	422	471
$\sigma_{cr0}$ [MPa]	640	621	621	640
$P_{cru}$ [N]	42429	48275	40433	37339
$P_{cru}$ [ton]	4,3	4,9	4,1	3,8

Por fim, podemos fazer um gráfico compondo as fases elásticas e inelásticas para esse material. Segundo Roy R. e Craig, Jr em [17], a curva de flambagem se conserva ao limite de resistência compressivo do material quando a esbeltez varia de 0 até a razão entre o comprimento e o diâmetro  $\frac{L}{d} = 2$  (colunas curtas), como:

$$\lambda = \frac{L}{r} = \frac{L}{\sqrt{\frac{I}{A}}} = \frac{L}{\sqrt{\frac{\frac{\pi d^4}{64}}{\frac{\pi d^2}{4}}}} = \frac{L}{\sqrt{\frac{d^2}{16}}} = \frac{L}{\frac{d}{4}} = \frac{4L}{d}$$

Equação (5.1)



portanto, substituindo na equação 5.1 a razão  $\frac{L}{d} = 2$ , para os CP's cilíndricos em questão, temos que o limite de flambagem inelástica para colunas curtas é o limite de resistência ( $S_u$ ) de  $\lambda = 0$  até  $\lambda = 8$ .

Podemos então interpolar uma curva  $\sigma_{cr}(\lambda)$  para a fase intermediária da forma hiperbólica  $\sigma_{cr}\lambda^n = C$ . Sugeriu-se a esbeltez elevado a uma constante  $n$  para contabilizar a não linearidade entre os termos esbeltez e tensão. Como temos dois pontos dessa curva, é possível a determinação dos coeficientes  $n$  e  $C$ .

$$\begin{aligned}
 S_u(\lambda_u)^n &= S_y(\lambda_y)^n \\
 \frac{S_u}{S_y} &= \left(\frac{\lambda_y}{\lambda_u}\right)^n \\
 n &= \frac{\log\left(\frac{S_u}{S_y}\right)}{\log\left(\frac{\lambda_y}{\lambda_u}\right)} = \frac{\log\left(\frac{S_u}{S_y}\right)}{\log\left(\frac{\lambda_y}{\lambda_u}\right)} = 0,15 \\
 C_1 &= S_u\lambda^n = 669,7 \\
 \sigma_{hip} &= \frac{669,7}{\lambda^{0,15}}
 \end{aligned}
 \tag{Equação (5.2)}$$

Neste momento, a equação está determinada para o domínio dos  $\lambda \geq 0$ . Usando ainda a interpolação de uma reta para a região de colunas intermediárias, temos:

$$\begin{aligned}
 \sigma_{reta} &= C_2\lambda + C_3 \\
 \sigma_{reta} &= \frac{\Delta S}{\Delta \lambda}\lambda + \left(S_y - \frac{\Delta S}{\Delta \lambda}\lambda_y\right) \\
 C_2 &= \frac{\Delta S}{\Delta \lambda} = \frac{S_y - S_u}{\lambda_y - \lambda_u} = -1,18 \\
 C_3 &= S_y - \frac{\Delta S}{\Delta \lambda}\lambda_y = 499 \\
 \sigma_{reta} &= -1,18\lambda + 499
 \end{aligned}
 \tag{Equação (5.3)}$$

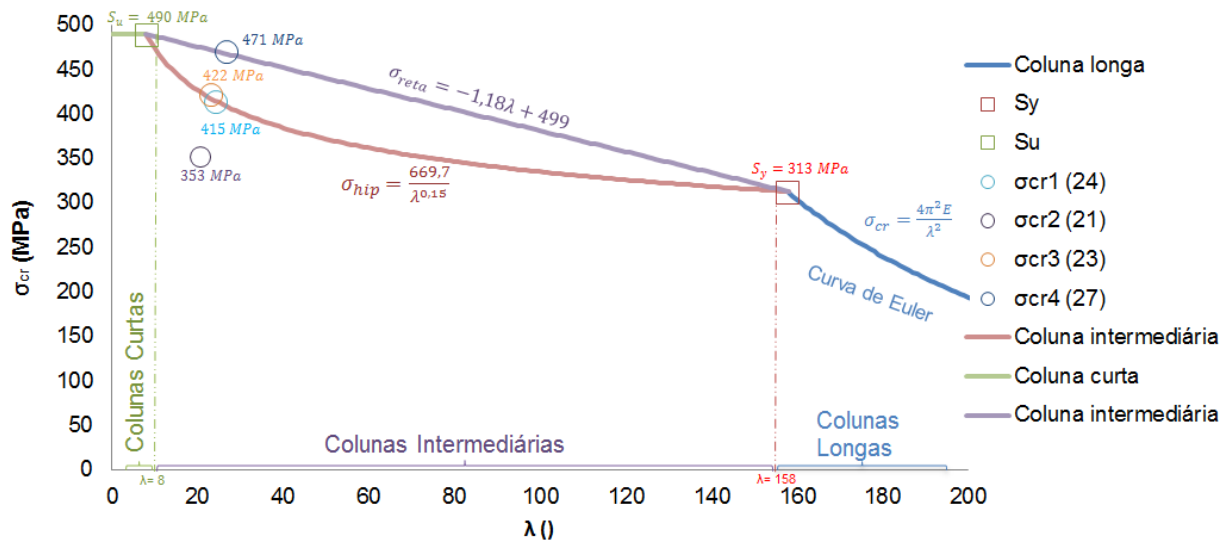


Figura 5.27 - Gráfico com a curva de Euler (para colunas curtas) até seu limite elástico junto às tensões críticas reais de flambagem, limite de resistência do material, hipérbole e reta interpolada para a região de coluna intermediária e reta horizontal para colunas curtas.

Os resultados obtidos cruzam as interpolações, já que na verdade o limite de resistência real seria o compressivo, não o trativo como está sendo usado. No entanto, apesar de ter sido feito um ensaio compressivo, o corpo flambou antes de atingir o limite de resistência à compressão, não sendo possível determiná-lo com precisão.

Como o limite de resistência de compressão ( $S_{u_c}$ ) é maior que o de tração ( $S_u$ ) para o material em questão, a curva de flambagem da parte inelástica, ou seja, referente às colunas curtas e intermediárias, deveria estar mais acima, englobando possivelmente os pontos experimentais.

Outra fonte de erro é que o limite de resistência ( $S_u$ ) foi retirado de uma curva tensão deformação de engenharia, que não considera a estricção da seção transversal comum nos aços nos ensaios de tração, que reduz a área da seção, elevando ainda mais as tensões críticas ( $\sigma_{cr}$ ) no domínio inelástico. Outra grande fonte de erro é na medição da área final, feita por um paquímetro, nos CPs que sofreram flambagem.

## 6 Conclusão

De forma geral, nos **testes cíclicos** o método Risitano se mostrou mais conservador que o método de Luong, já que sempre resultará na determinação de  $S_L$  de menor valor em relação ao método de Luong. Contudo, ambos os métodos aplicados nesse caso não condizem com o limite de fadiga ( $S_L$ ) para o lado compressivo do diagrama  $\sigma_a \times \sigma_m$ , já que para o CP cíclico 5 o limite de fadiga foi determinado em 144 Mpa (Luong) e, ensaiando-o a  $\sigma_a = 230$  Mpa até 1,8 milhões de ciclos, não sofreu fadiga. Outro fato que indica isso é a própria falha por fadiga do CP6, indicando um limite de fadiga ( $S_L$ ) próximo a 250 MPa, diferente dos encontrados por Luong (214 MPa) e Risitano (213 MPa).

Os resultados para os dois **testes estáticos** usando método Risitano estático apresentaram valores semelhantes à referência [19], quando testado até a falha (CP1) ou no carregamento de  $\epsilon = 5\%$  (parte 5, CP2). Foi notado que, à medida que aumentava a deformação nos carregamentos e descarregamentos, a curva de temperatura em função do tempo se tornava mais inclinada, como caracterizado em [5], ganhando comportamento linear para baixo, seguido de um aumento.

Nos resultados de **flambagem**, sugiro em trabalhos futuros eliminar as fontes de erro, como o uso do gráfico tensão-deformação de engenharia nos ensaios de tração, usados para a determinação do limite de resistência trativo  $S_u$ , mudando para o gráfico tensão-deformação real, admitindo a área real da seção transversal do CP ensaiado e, logo, tensões reais.

Ainda, se possível, determinar o limite de resistência à compressão em ensaios futuros sem que o corpo flambe. Assim, a curva de flambagem tensão crítica-esbeltez seria a curva real, já que seria usado o limite de resistência de compressão, não o de tração, que é menor.

Seria interessante também envolver um estudo sobre a flambagem dinâmica, já que foram ensaios envolvendo cargas cíclicas. Isto traria mais veracidade e considerações mais sucintas para o trabalho. Por fim, fazer ensaios compressivos utilizando CP's com diversas esbeltezas respectivas às colunas curtas e intermediárias, com o objetivo de fazer com que o CP flambe para em seguida plotar no gráfico tensão crítica- esbeltez e analisar os pontos experimentais, para então traçar uma curva conveniente para essa região inelástica.

## 7 Referências

- [1] 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.
- [2] La Rosa G, Risitano A. “Thermographic methodology for the rapid determination of the fatigue limit of materials and mechanical components.” Int J Fatigue, 2000.
- [3] G. Fargione, A. Geraci, G. La Rosa, A. Risitano: “Rapid determination of the fatigue curve by the thermographic Method.” Int J Fatigue, 2002.
- [4] C. Clienti, G. Fargione, G. La Rosa, A. Risitano, G. Risitano: “A first approach to the analysis of fatigue parameters by thermal variations in static tests on plastics.” Elsevier, 2010.
- [5] C. Colombo, L. Vergani, M. Burman: “Static and fatigue characterisation of new basalt fibre reinforced composites.” Elsevier, 2011.
- [6] V. Crupi, E. Guglielmino, G. Risitano, F. Tavilla: “Experimental analyses of SFRP material under static and fatigue loading by means of thermographic and DIC techniques.” Elsevier, 2015.
- [7] A. Risitano, G. Risitano, C. Clienti :”Fatigue limit by thermal analysis of specimen surface in mono axial traction test.” EDP Sciences, 2010.
- [8] A. Risitano, G. Risitano, C. Clienti :”Determination of the fatigue limit by semi static tests.” Convegno Nazionale IGF XXI, Cassino (FR), Italia, 2011.
- [9] Luong M. P. :” Fatigue limit evaluation of metals using an infrared thermographic technique” Elsevier, 1998.
- [10] VIEIRA. R.B.; “Thermography Applied to the Study of Fatigue in Polycarbonate “. Dissertacao de mestrado. PUC-Rio. 2016.
- [11] Manhães, P. R. B., :”Estudo da fadiga em Policarbonato com uso da termografia”. PUC – Rio. 2016.
- [12] de Assis, A. A. O :”Estudo da fadiga em Aço Carbono com uso da termografia”. PUC – Rio. 2017.
- [13] “3 principais aplicações da análise termográfica”. Disponível em <http://www.flir.com.br/home/news/details/?ID=80767>. Acessado 19/11/17.

- [14] UFRGS; “Efeito Fotoelétrico”. Disponibilizado em: <https://www.if.ufrgs.br/tex/fis142/fismod/mod03/m.html>. UFRGS. Acessado 19/11/17.
- [15] Silva. V. M. A.; “TERMOGRAFIA ATIVA PULSADA APLICADA A JUNTAS COMPÓSITAS LAMINADAS”. Projeto de graduação. UFRJ. Fevereiro 2016. Disponível em <http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10010147.pdf>. Acessado 20/11/17. Acessado em 20/11/17.
- [16] GERE, J. M. ; GOODNO, J. B.: “Mecânica dos Materiais.” Tradução da 7ª edição norte-americana, CENGAGE Learning, 2008.
- [17] Roy R., Craig, Jr.: “Mechanics of Materials” Second edition, John Wiley & Sons, Inc, 2000.
- [18] Laboratório de Estruturas e Materiais (LEM-DEC). PUC-Rio. Disponível em <http://www.lem.civ.puc-rio.br/apresentacao/>. Acessado em 30/11/17.
- [19] Paiva, V. E. L., Freire, J. L. F., Alarcón, M. V. G., Vieira R. B. V., González J. A. O., Castro J. T. P.: “FATIGUE ASSESSMENT OF A LOW CARBON STEEL USING DIXON%27S UP-AND-DOWN METHOD AND INFRARED THERMOGRAPHY 25-08”. PUC-Rio, 2017.
- [20] Juvinall, R. C.: “Engeneering Considerations of Stress, Strain and Strength”. McGral.Hill Mechanics Series in Mechanical Engeneering, United States, 1967.
- [21] Dowling, N.F., : “Mechanical behavior of materials: Engineering methods for defomation, fracture and fatigue”, Prentice-Hall International, 1993.
- [22] Huang, J., Pastor, M., Garnier, C., Gong, X.: “Rapid evaluation of the ftigue limito n thermographic data analysis”, ELSEVIER, 2017.