

CONAENDI&IEV2020 - 000
MONITORAMENTO DA TEMPERATURA EM ENSAIOS DE FADIGA DE ALTÍSSIMO
CICLO

M.C. Teixeira¹, J.P. Corrêa¹, A. G. Montalli¹, M.V. Pereira¹, M.G.B. Lima²,
V.H. de A. Almeida², R.S. Barbosa²

Copyright 2020, ABENDI, PROMAI.

Trabalho apresentado durante o XXXVIII – Congresso Nacional de Ensaios Não Destrutivos e Inspeção.

22ª IEV – Conferencia Internacional sobre Evaluación de Integridad y Extensión de Vida de Equipos Industriales.

As informações e opiniões contidas neste trabalho são de exclusiva responsabilidade do(s) autor(es).

Sinopse

Atualmente, as áreas de engenharia solicitam que a vida em serviço de um componente ultrapasse os 10^7 ciclos de carregamentos. As máquinas de ensaios ultrassônicos de fadiga, ou seja, com frequência de 20 kHz, reduziram de maneira considerável o tempo de ensaio, possibilitando atingir 10^7 - 10^{12} ciclos em intervalos bastante inferiores aos de uma máquina convencional. Esses ensaios com elevada frequência apresentam aumentos significativos de temperatura. O presente trabalho tem como objetivo monitorar as temperaturas durante os ensaios com diferentes níveis de tensão para materiais com propriedades mecânicas diferentes. Foi possível identificar perfis de temperatura por número de ciclos e a distribuição da temperatura ao longo da seção útil do corpo de prova. A evolução da temperatura foi observada durante todo o ensaio com o auxílio de uma câmera termográfica.

Nomenclatura

σ_u	Limite de resistência mecânica
σ_y	Limite de escoamento
E	Módulo de elasticidade
ρ	Densidade
σ_a	Amplitude de tensão
σ_{LRF}	Limite de resistência à fadiga

1. Introdução

Fadiga é o tipo de falha mecânica mais comum na engenharia, sendo causada por ação de cargas alternadas que resultam na nucleação e propagação de trincas. O estudo dos mecanismos de falha por fadiga se torna essencial para o controle e previsão da vida de serviço dos materiais ou componentes estruturais que estão sobre condições de carregamento cíclico.

1 Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio.

2 SENAI ISI Inspeção e Integridade.

A curva de Wohler, ou S-N (Stress – Number of cycles), representa a vida em serviço dos materiais estruturais e é obtida com a realização de ensaios de fadiga. As curvas S-N convencionais abrangem os regimes de baixo ciclo de fadiga (Low cycle fatigue, LCF), com número de ciclos de cerca de 10^4 e tensões além do limite de escoamento, e regime de alto ciclo (High cycle fatigue, HCF), com tensões menores que o limite de escoamento e um maior número de ciclos, cerca de 10^7 [1].

Conforme a amplitude de tensão é reduzida, o número de ciclos suportado pelo material aumenta, observa-se um comportamento assintótico da curva tendendo a valor limite de tensão, chamado de limite de resistência à fadiga (endurance limit). Acreditava-se que para valores de tensão abaixo desse limite os materiais apresentariam uma vida infinita, livre de falhas, porém devido ao desenvolvimento tecnológico, foi observado que a vida em fadiga pode ultrapassar a fronteira de alto ciclo, para além dos 10^7 ciclos de carregamento, desenvolvendo o novo conceito de fadiga de altíssimo ciclo [2-4].

Como consequência dos ensaios ultrassônicos em fadiga, há um aumento da temperatura do corpo de prova durante o ensaio, seguindo um certo padrão de evolução no tempo, como observado em trabalhos anteriores [5-7]. Desta forma, pode-se utilizar a técnica de ensaio não destrutivo por termografia infravermelha, bem fundamentado em diversos segmentos da indústria, como inspeção da integridade de estruturas compostas por diferentes materiais. A técnica de termografia tem se mostrado efetiva na análise da evolução de temperatura durante testes em fadiga. Baseado nisso, o presente trabalho tem como objeto monitorar a temperatura ao longo dos ensaios de fadiga em altíssimo ciclo para dois materiais com propriedades mecânicas diferentes.

2. Fadiga de altíssimo ciclo

Exemplos de componentes que sofrem fadiga de altíssimo ciclo são encontrados nas indústrias automotiva, ferroviária e aeroespacial, caracterizadas por projetos que associam longas vidas em serviço com operações em altas velocidades.

Neste contexto, ensaios de fadiga até 10^{12} ciclos são fundamentais no desenvolvimento de materiais de pás de turbinas, peças rotativas (virabrequins e eixos) de alta velocidade para automóveis e outros veículos, bem como rolamentos. Ou, de maneira genérica, para todo componente cuja expectativa de vida em serviço ultrapasse 10^7 ciclos de carregamento. Esse novo conceito que vem explorado, contribuiu para a extensão da curva S-N (10^7 a 10^{12}) desenvolvendo assim uma curva “double” ou “duplex” S-N, onde aparecem os regimes de baixo, alto e altíssimo ciclo de fadiga, conforme apresentado na figura abaixo. (VHCF) [3].

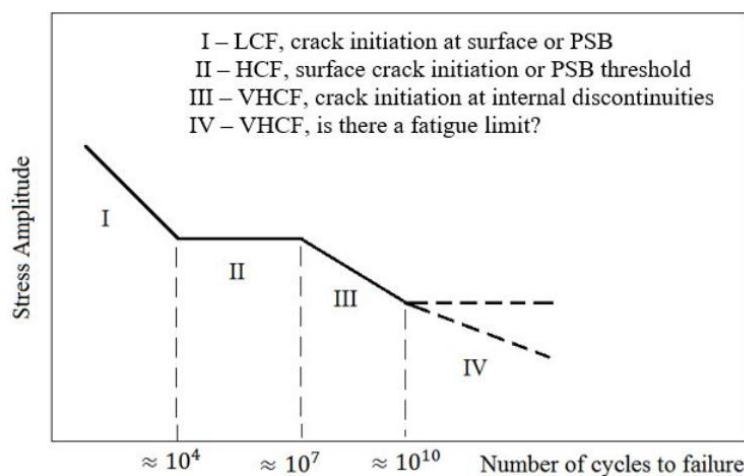


Figura 1: Curva S-N com os regimes de baixo ciclo de fadiga (LCF), alto ciclo de fadiga (HCF) e altíssimo ciclo de fadiga (VHCF) [3].

2. Termografia

Para detecção de variação de temperatura ao longo de um corpo ou objeto, a técnica de termografia infravermelha conta com uma câmera termográfica, composta por um sensor responsável pela detecção de radiação infravermelha emitida pelo material. Em seguida, tal radiação é convertida em um sinal elétrico, o qual será comparado com uma curva de calibração, contida na câmera termográfica, através da qual será transformado em valores de temperatura. Por fim, esses valores serão traduzidos em um mapa termográfico - ou seja, em uma imagem digital das diferentes temperaturas presentes na superfície inspecionada, sendo cada pixel correspondente à temperatura do corpo naquele ponto específico [8].

Desta maneira, a termografia infravermelha pode ser aplicada em duas modalidades: termografia passiva (excitação estacionária) e termografia ativa (excitação transiente). No modo passivo, a fonte externa de excitação é dispensada, pois as diferenças térmicas do material em serviço serão suficientes para serem detectadas pelo sensor infravermelho. Já na modalidade ativa, a utilização de uma fonte externa de aquecimento é necessária, sendo o aquecimento ou resfriamento da peça os principais mecanismos capazes de gerar diferenças significativas de temperatura [9,10].

Dentre as variadas aplicações em diversos segmentos da indústria, a utilização de câmeras termográficas no estudo de materiais submetidos a danos de fadiga tem se tornado atrativa no ramo da pesquisa aplicada. Isto porque os materiais metálicos, quando tensionados ciclicamente com amplitudes de tensões nas vizinhanças ou acima do limite de resistência à fadiga, apresentam uma elevação repentina de temperatura. Desta forma, o fenômeno de liberação de calor quando o material é submetido a tensão se tornou interessante, uma vez que este pode se tornar um indicativo para o estudo de fadiga de materiais metálicos [11].

3. Materiais e métodos

3.1 Materiais

Para o presente estudo, foram utilizados dois materiais diferentes, sendo o primeiro um material de alta resistência e baixa liga fornecido pela Companhia Brasileira de Amarras (Brasil Amarras), enquanto o segundo foi um aço SAE 1020 comercial. As propriedades mecânicas dos materiais (Tabela.1) e suas respectivas composições químicas (Tabela.2) estão disponíveis nas tabelas abaixo:

Tabela 1: Propriedades mecânicas dos aços.

Propriedades Mecânicas		
	Brasil Amarras	SAE 1020
σ_u [MPa]	890	420
σ_y [MPa]	790	350
E [GPa]	210	205
ρ [g/cm ³]	7,87	7,87

Tabela 2: Composição química dos aços estudados.

	C	Mn	Cr	Ni	Mo	V	Ti	P	S
Br Amarras	0,22	1,0	1,1	0,6	0,3	0,07	0,01	—	—
SAE 1020	0,17–0,23	0,3–0,6	—	—	—	—	—	< 0,04	< 0,05

Com o intuito de proporcionar uma melhor leitura e um melhor monitoramento da temperatura, foi aplicada uma camada de tinta preta sobre a superfície dos corpos, aumentando a emissividade para um valor de 0,93. A tinta em questão é encontrada comercialmente e resistente a altas temperaturas (600 °C), cuja composição é composta por resina de silicone, resina acrílica, alumínio, cargas minerais, dióxido de silício, hidrocarboneto aromático e alifático, além de gás propelente (butano/propano).

A emissividade foi verificada através da comparação entre os dados obtidos na termografia e comparados com o observado a partir de um termopar de mão de contato. Este processo será melhor descrito quando abordarmos a descrição da termografia.

3.2. Análise termográfica

A análise termográfica foi realizada com a câmera do fabricante FLIR, modelo A655SC na modalidade passiva, na qual foi acoplada uma lente infravermelha IR, cujo foco $f = 41,3\text{mm}$ (15° FOV), conforme ilustra a figura 2.



Figura 2: Ilustração da câmera termográfica utilizada.

Na tabela 3 são apresentados os parâmetros referentes às condições do ambiente no momento de realização do ensaio e às configurações do teste de termografia passiva. Em adição, com o objetivo de reduzir a interferência da superfície reflexiva das amostras no ensaio, foi utilizada uma tinta preta fosca para garantir maior acurácia na aquisição das temperaturas ao longo da superfície dos corpos de prova.

Tabela 3: Parâmetros de ensaio termográficos.

Distância câmera-objeto	0,5m
Temperatura ambiente	~20°C
Emissividade (tinta preta fosca)	0,93
Frames por segundo	100
Faixas de temperatura utilizadas	-40 a 150°C; 100 a 650°C; 300 a 2000°C

3.3. Máquina de ensaio e geometria dos corpos de prova

A máquina usada para o ensaio é de fabricação japonesa, única na América Latina capaz de realizar fadiga de altíssimo ciclo em alta frequência (20 kHz). Trata-se de uma Shimadzu USF-2000A, e para que para estes ensaios foram realizados como tração-compressão totalmente reversíveis (razão de carregamento $R=-1$). Para que o ensaio ocorra em alta frequência (20 kHz), é necessário garantir que o conjunto corpo de prova e base de fixação tenham a referida frequência natural. Dessa maneira, a geometria dos corpos de prova fica condicionada, e estão disponíveis nas imagens abaixo (Figuras 3 e 4). É importante destacar que o comprimento de ressonância é influenciado por propriedades físicas do material como módulo de elasticidade e massa específica, fazendo com que os corpos de prova de cada material tenham comprimentos diferentes.



Figura 3: Corpo de prova no formato ampulheta utilizado nos ensaios.

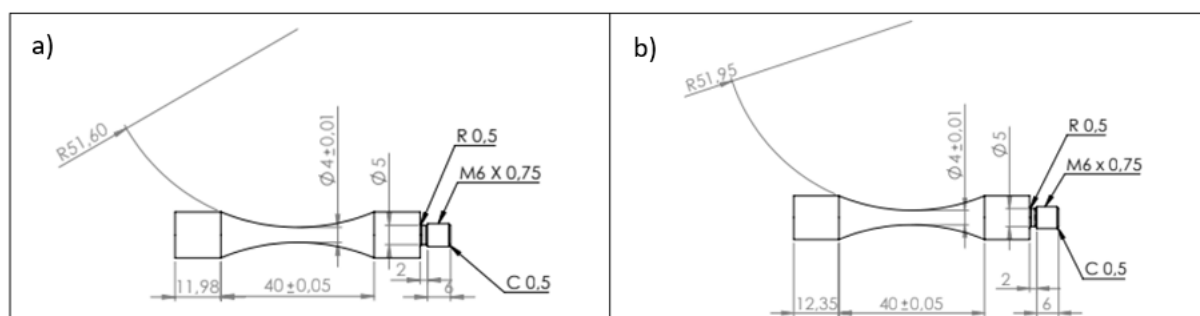


Figura 4: Geometria dos corpos de prova: a) SAE 1020; b) Brasil Amarras.

3.4. Amplitudes de tensão aplicada e monitoramento da temperatura

As amplitudes de carregamento utilizadas para os ensaios foram referenciadas a partir do limite de resistência mecânica σ_u . Com isso, as amplitudes de tensão aplicadas foram $0,45 \sigma_u$, $0,475 \sigma_u$ e $0,50 \sigma_u$ para ambos materiais. Foi realizado, ainda, um ensaio adicional para o SAE 1020 com $0,40 \sigma_u$. Na prática, ao realizar o ensaio, os valores observados foram os listados abaixo.

Tabela 4: Carregamentos aplicados no ensaio.

Br Amarras	–	$0,45 \sigma_u$	$0,472 \sigma_u$	$48,3 \sigma_u$
SAE 1020	$0,393 \sigma_u$	$0,44 \sigma_u$	$0,476 \sigma_u$	$0,5 \sigma_u$

Considerando que o intuito do estudo presente é o monitoramento da temperatura do corpo de prova durante o ensaio de altíssimo ciclo, foi importante garantir que as amplitudes de carregamento σ_a fossem de natureza elástica. Sobrepe-se a isto a necessidade de trabalhar com valores de amplitudes de tensão que estejam nas vizinhanças do limite de resistência mecânica σ_u , onde o limite de resistência à fadiga σ_{LRF} se dá em torno de $0,35 \sigma_u$ a $0,5 \sigma_u$.

Foram utilizados três corpos de provas Brasil Amarras e dois corpos de provas SAE 1020 para obtenção dos dados experimentais. Os ensaios foram iniciados a uma amplitude de tensão entre $40 - 50\% \sigma_u$ e observado o comportamento da temperatura até a sua estabilização na região de útil do material que ocorreu em torno de 10^7 ciclos. Após atingir a estabilização da temperatura, o ensaio era interrompido e caso o material não falhasse o procedimento era reiniciado assim que o corpo de prova retornasse a temperatura ambiente, entretanto com uma amplitude de tensão (σ_a) maior do que a anterior. Por meio da câmera IR foram monitoradas as temperaturas antes e pós experimentos. Caso o material falhasse era feito a substituição do corpo de prova e prosseguido a sequência de ensaios preestabelecidos conforme a tabela 4.

4. Resultados e discussão

Os gráficos e imagens obtidos através de termografia estão apresentados abaixo. As figuras 5 e 6 se referem ao aço SAE 1020 e as figuras 7 e 8 para o aço do Brasil Amarras. Para todas as figuras são apresentados o comportamento da temperatura ao longo de três pontos que foram monitorados simultaneamente. Esses pontos foram predeterminados como sp1, sp2 e sp3.

O primeiro monitoramento foi realizado no corpo de prova que estava sob uma amplitude de tensão de 165 MPa (aproximadamente 40% do σ_u). Na Figura 5.a, tem-se uma curva T – N (temperatura – número de ciclos). Nota-se nesta curva que no início do ensaio o corpo de prova estava a uma temperatura em torno de 24°C (temperatura ambiente). Em cerca de 20 segundos de ensaio, houve um aumento na temperatura seguido de uma aparente estabilização. No ponto sp1 localizado no centro do corpo de prova é aonde ocorre um maior aumento da temperatura, comparado aos demais pontos de medição. Na curva T-x (temperatura – posição) apresentada na Figura 5.d, tem-se a distribuição de temperatura ao longo da seção reduzida do corpo de prova. Essa curva denota o momento onde ocorreu o maior aumento de temperatura registrada, que foi de 36,80°C em aproximadamente vinte milhões de ciclos ($2,0 \times 10^7$ ciclos).

Para a figura seguinte (Figura 6) são apresentadas as curvas e imagens do corpo de prova ensaiado numa amplitude de tensão de 210 MPa, isto é, 50% do σ_u . Na primeira curva, T-N, é possível identificar uma mudança no comportamento quando comparado com a Figura 5.a.

Percebe-se que existem dois patamares nesta curva, indicando duas estabilizações da temperatura e um pico entre esses patamares, onde ocorreu a maior medição de temperatura. A temperatura inicial do corpo de prova estava em torno de 27°C e assim que iniciou o ensaio houve aumento desta temperatura para 50-60°C que se manteve até ocorrer um aumento abrupto, formando um pico onde foi registrada a temperatura de 499,43 °C para ponto sp1. Após esse pico, a curva apresenta uma estabilização em temperatura elevada (entre 350°C e 400 °C para o ponto sp1). A temperatura se manteve neste patamar até ensaio ser interrompido em torno de $2,0 \times 10^7$ ciclos. Segundo a literatura [5-7], o registro deste pico indica um escoamento da tinta no corpo de prova. Como a tinta é de matriz polimérica, no momento em que a mesma escoar significa que a temperatura do ensaio ultrapassou a temperatura de transição-vítrea (T_g) da tinta. Com isso há uma queda na emissividade que influencia na temperatura detectada pelo infravermelho da câmera. Além disso, alguns pesquisadores [5-7] relatam que o primeiro patamar indica uma possível nucleação da trinca de fadiga e quando ocorre um aumento repentino da temperatura a etapa de nucleação foi esgotada e se inicia a etapa de propagação da trinca, permanecendo numa temperatura elevada até a fratura. Ambos os ensaios foram interrompidos, porém a câmera continuava a medir e por isso nas curvas T-N, aparece uma queda da temperatura após a estabilização. A figura 6 apresenta duas curvas de distribuição de temperatura ao longo do corpo de prova. Isso se deve ao fato de que a câmera disponibilizava três escalas de medição e para esta tensão (210 MPa) foram utilizadas duas escalas, sendo uma de -40°C à 150°C (Figura 6.d) captando as temperaturas do início da curva T-N e de 100°C à 650°C (Figura 6.e) monitorando as maiores temperaturas ($T > 100^\circ\text{C}$).

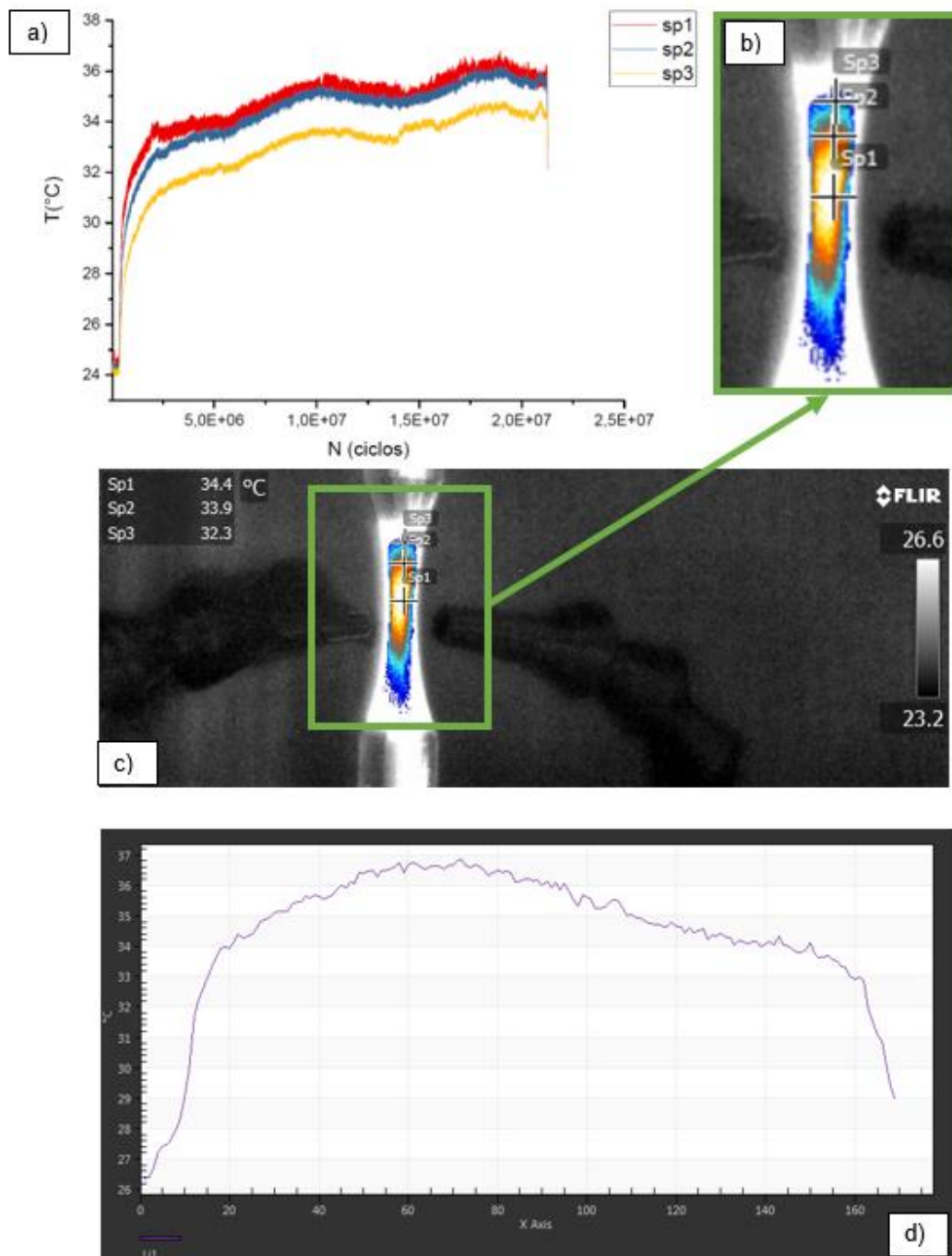


Figura 5: SAE 1020 a) curva $T - N$ ($\sigma = 165$ MPa); b) e c) medição da temperatura em 3 pontos do corpo de prova; d) curva $T - x$ na escala de -40°C à 150°C .

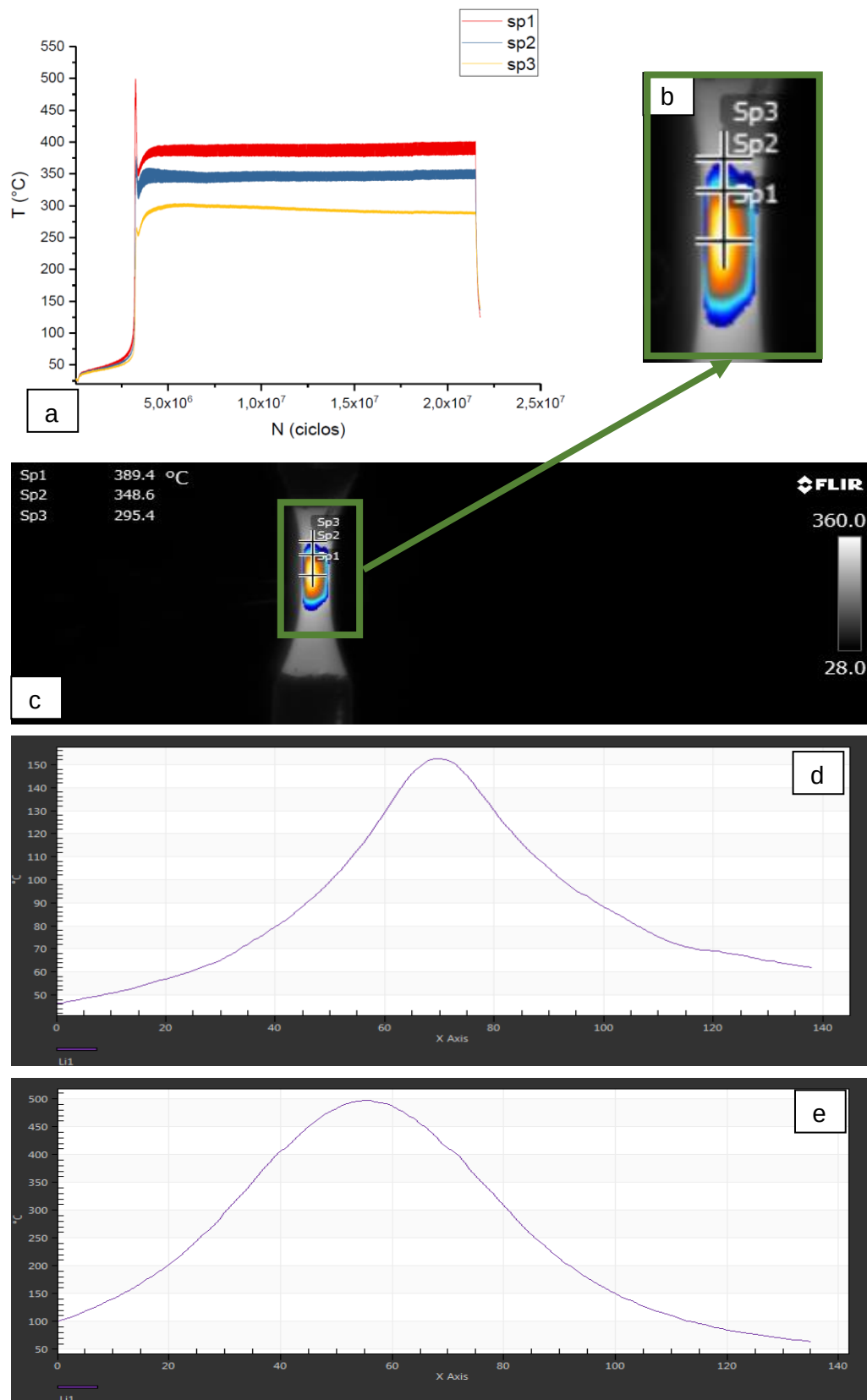


Figura 6: SAE 1020 a) curva $T - N$ ($\sigma = 210$ MPa); b) e c) medição da temperatura em 3 pontos do corpo de prova; d) curva $T - x$ na escala de -40°C à 150°C; e) curva $T - x$ na escala de 100°C à 650°C.

Na figura 7.a, observa-se a curva T-N para os três pontos de monitoramento escolhidos antecipadamente. Para esse comportamento o corpo de prova foi ensaiado na amplitude de tensão de 400 MPa que é equivalente a 45% de σ_u . O ensaio foi iniciado com uma temperatura de 23°C e em torno de $4,5 \times 10^5$ ciclos houve um brusco aumento da temperatura chegando a medir 240,05°C de temperatura máxima. O patamar apresentado na curva ocorreu no intervalo $200^\circ\text{C} \leq T \leq 240,25^\circ\text{C}$. A distribuição da temperatura na seção útil do corpo de prova é apresentada na curva T-x da figura 7.d. O ensaio foi interrompido um pouco antes de dez milhões de ciclos, visto que não havia indícios de mudança no comportamento da temperatura. Para a maior tensão de ensaio ($\sigma_a = 430 \text{ MPa} - 48,3 \% \sigma_u$) utilizada nos corpos de prova do Brasil Amarras, foram traçados perfis de temperatura demonstrados na figura 8. Novamente uma curva de temperatura – número de ciclos foi plotada e a primeira medida detectada após o início do ensaio foi de aproximadamente 100°C. Isto significa que intervalo de tempo no qual se deu a variação de temperatura foi tão abrupto que não foi possível detectar temperaturas menores. Em torno de $1,7 \times 10^6$ ciclos houve um novo aumento da temperatura, indicando segundo pesquisadores [5-7], que iniciou a propagação da trinca de fadiga e posteriormente formando um patamar onde a temperatura máxima foi de 554,39°C. Além disso após aproximadamente $8,0 \times 10^6$ ciclos a máquina parou o ensaio detectando que o corpo de prova havia falhado.

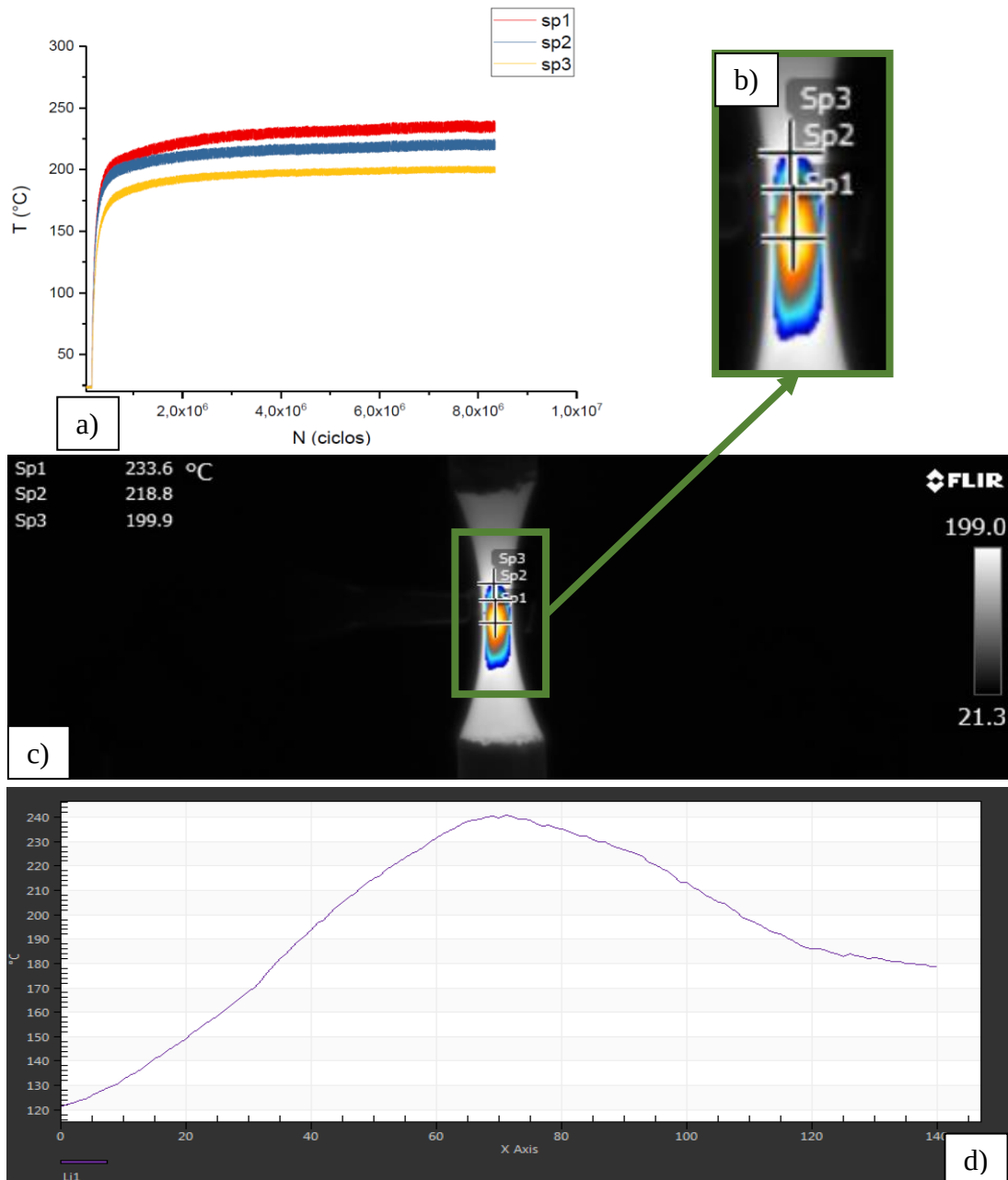


Figura 7: Brasil Amarras: a) curva T-N ($\sigma_a = 400$ MPa); b) e c) medição da temperatura em 3 pontos do corpo de prova; d) curva T - x.

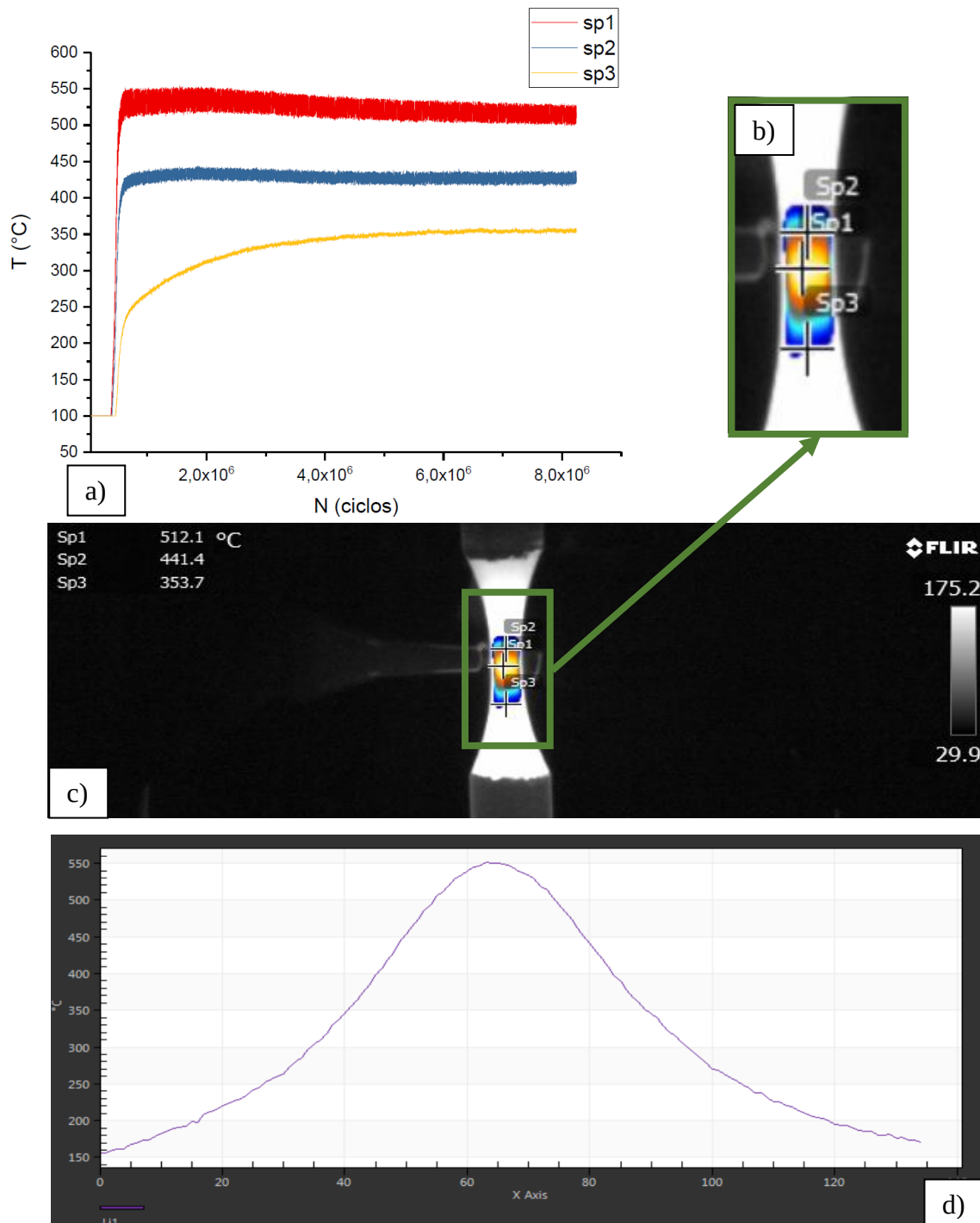


Figura 8: Brasil Amarras: a) curva T-N ($\sigma_a = 430$ MPa); b) e c) medição da temperatura em 3 pontos do corpo de prova; d) curva T - x.

5. Conclusão

Com base no trabalho desenvolvido, foram obtidas as seguintes conclusões:

- As temperaturas durante os ensaios ultrassônicos de fadiga aumentam de acordo com cada nível de tensão, ou seja, quanto maior o nível de tensão maior a temperatura alcançada durante o ensaio.
- Pode-se observar que nas curvas T-N para ambos os aços, foram apresentados uma aparente estabilização até 10^7 ciclos.
- No comportamento das curvas T-N para as tensões ente 45 e 50% σ_u , foram observados dois patamares e uma temperatura de pico (temperatura máxima).
- O aço do Brasil Amarras apresentou temperaturas de ensaios superiores que o aço SAE 1020, pois o mesmo atingia tensões maiores.
- O perfil de temperatura ao longo dos três pontos de medição confirmou que a temperatura mais alta ocorre o mais próximo da região crítica que é no centro do corpo de prova (ponto sp1).

Agradecimentos

Agradecemos ao SENAI ISI Inspeção e Integridade por todo apoio técnico e realização dos ensaios de termografia infravermelha.

6. Referências bibliográficas

- [1] S. Suresh, *Fatigue of Materials*, New York: Cambridge University Press, 1998.
- [2] Bathias, C., Paris, P. C., *Gigacycle Fatigue in Mechanical Practice*, (2005), Marcel Dekker, New York.
- [3] M.C. Teixeira, *Comportamento do Aço DIN 34CrNiMo6 em Fadiga de Altíssimo Ciclo, Dissertação de Mestrado*, PUC-Rio, 2018.
- [4] M.V. Pereira, M.C. Teixeira, F.A. Darwish. Correlation between fractographic aspects and stress intensity factor in very high cycle fatigue, *Procedia Structural Integrity*, 17 (2019), pp 105-114.
- [5] V. Crupi, G. Epasto, E. Guglielmino, G. Risitano, Analysis of temperature and fracture surface of AISI4140 steel in very high cycle fatigue regime, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol. 80, Part A, 2015, pp. 22-30.
- [6] W. Yang, X. Guo, Q. Guo, J. Fan, Rapid evaluation for high-cycle fatigue reliability of metallic materials through quantitative thermography methodology, *International Journal of Fatigue*, Vol. 124, 2019, pp. 461-472.
- [7] X.G. Wang, V. Crupi, X.L. Guo, Y.G. Zhao, Quantitative Thermographic Methodology for fatigue assessment and stress measurement, *International Journal of Fatigue*, Vol. 32, Issue 12, 2010, pp. 1970-1976
- [8] X. Maldague, *Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing*, John Wiley & Sons, New York 2001.
- [9] N. Vilardo, *Utilização da técnica de termografia e de simulação computacional para detecção de defeitos em compósitos de fibra de carbono, Dissertação de Mestrado*, COPPE/UFRJ, 2018.

- [10] R. Montanini, Quantitative determination of subsurface defects in a reference specimen made of Plexiglas by means of lock-in and pulse phase infrared thermography”, *Infrared Physics & Technology*, v. 53, pp. 363-371, 2010.
- [11] P.D. Stanley, W.K. Chan, Quantitative stress analysis by means of the thermoelastic effect”, *J. Strain Analysis*, vol. 20, pp. 129-137, 1985.