



**Carlos Gabriel Studt Roxo**

**Determinação e análise da temperatura  
superficial de um corpo submetido a  
carregamento alternado, usando termografia**

**Projeto de Graduação**

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

Orientador: José Luiz de França Freire

Rio de Janeiro  
Dezembro de 2018

## Agradecimentos

Agradeço à minha família, por me apoiar durante todo esse processo.

Agradeço ao meu orientador, José Luiz de França Freire, e a Vitor Eboli Lopes Paiva, pelo auxílio durante todos os experimentos.

Agradeço à PUC-Rio e ao Laboratório de Fotomecânica pelo apoio concedido no desenvolvimento desse trabalho.

## Resumo

### **Determinação e análise da temperatura superficial de um corpo submetido a carregamento alternado, usando termografia**

O conhecimento das propriedades mecânicas de um material é vital para o projeto de estruturas mecânicas sujeitas a carregamentos cíclicos, sendo que o dimensionamento correto de elementos de máquinas depende, especialmente, do limite de fadiga. No entanto, os testes realizados para determinar tal limite de fadiga necessitam, usualmente, do uso de múltiplos corpos de prova, tornando-os muito custosos, sendo carregados ciclicamente até que ocorra uma falha, e muito demorados. Com isso em mente, Krapez propôs um novo método, que foca na observação do comportamento térmico do componente ao longo de uma série de tensões aplicadas, com o objetivo de encontrar um patamar a partir do qual há uma variação deste comportamento que, teoricamente, ocorre em conjunto com o início dos danos. Desta maneira, é possível determinar o limite de fadiga de um material utilizando um único corpo de prova, sendo carregado ciclicamente durante um curto período de tempo para diversos patamares de tensão, o que tornaria este método uma alternativa consideravelmente mais barata que os meios tradicionais, e fornecendo resultados bem mais rápidos. O objetivo deste projeto é verificar se o método descrito por Krapez pode ser utilizado para determinar o limite de fadiga de um material e se o resultado obtido condiz com o que pode ser encontrado na literatura. Utilizando os recursos do Laboratório de Fotomecânica, foram realizados quatro ensaios utilizando uma câmera térmica para observar a temperatura superficial do corpo de prova em uso. Os dados obtidos foram, então, comparados com a equação proposta por Krapez para verificar se o método proposto é viável ou não.[1]

### **Palavras-chave**

Termografia; termoelasticidade; fadiga; aço; policarbonato.

## **Abstract**

### **Determination and analysis of the surface temperature of a body under alternate loading, using thermography**

Knowledge of the mechanical properties of a material is vital for the design of mechanical structures subject to cyclic loading, and the correct dimensioning of machine elements depends, in particular, on the fatigue limit. However, the tests performed to determine such a fatigue limit usually require the use of multiple test specimens, making them very costly, being cyclically loaded until failure occurs, and very time consuming. With this in mind, Krapez proposed a new method, which focuses on the observation of the thermal behaviour of the component over a series of applied loads, in order to find the stress level from which there is a variation of this behaviour that theoretically occurs in conjunction with the beginning of fatigue damage. This way, it is possible to determine the fatigue limit of a material using a single specimen, being cyclically loaded during a small number of cycles to stress levels, which would make this method a considerably cheaper alternative than the traditional means, and delivering results much faster. The objective of this project is to verify if the method described by Krapez can be used to determine the fatigue limit of a material and if the result obtained matches what can be seen in the literature. Using the resources of the Photomechanical Laboratory, four tests were performed using an infrared camera to observe the surface temperature of the test specimen in use. The obtained data was then compared with the equation proposed by Krapez to verify if the proposed method is feasible or not.[1].

## **Keywords**

Thermography; thermoelasticity; fatigue; steel; polycarbonate.

## Sumário

1	Introdução	11
1.1	Fadiga	11
1.2	Termografia	12
2	Experimento	14
2.1	Equipamento	15
2.2	Testes	17
3	Conclusão	43
A	Processamento de dados	45
A.1	Código	45
A.2	Aplicação	49
B	Resultados	51
B.1	Teste com o primeiro corpo de prova de aço	51
B.2	Teste com o segundo corpo de prova de aço	55
B.3	Teste com o terceiro corpo de prova de aço durante a fase 2 do comportamento térmico	61
B.4	Teste com o terceiro corpo de prova de aço durante a fase 1 do comportamento térmico	66
B.5	Teste com corpo de prova de policarbonato	71
C	Elementos finitos	75

## Lista de figuras

1.1	A curva de Wöhler fornece a resistência à fadiga em função da vida esperada em N ciclos.	12
2.1	Câmera térmica de modelo FLIR a665sc da empresa FLIR Systems.	15
2.2	Máquinas utilizadas para os testes. (a) Instron 8501, (b) máquina construída no laboratório.	16
2.3	Isolamento térmico dos corpos de prova de aço.	17
2.4	Fases do comportamento térmico do componente: variação de temperatura em função do número de ciclos.	18
2.5	Corpo de prova do tipo keyhole de aço usado para o primeiro teste.	19
2.6	Resultado do teste realizado com o primeiro corpo de prova de aço. (a) temperatura média $T_0$ de cada patamar de tensão, (b) variação linear de temperatura $D_T$ , (c) amplitude do primeiro componente de Fourier $T_1$ , (d) diferença entre $T_1$ e o ajuste linear, (e) amplitude do segundo componente de Fourier $T_2$ .	22
2.7	Resultado do teste realizado com o segundo corpo de prova de aço. (a) temperatura média $T_0$ de cada patamar de tensão, (b) variação linear de temperatura $D_T$ , (c) amplitude do primeiro componente de Fourier $T_1$ , (d) diferença entre $T_1$ e o ajuste linear, (e) amplitude do segundo componente de Fourier $T_2$ .	27
2.8	Terceiro corpo de prova de aço.	29
2.9	Resultado do teste realizado com o terceiro corpo de prova de aço, durante a segunda fase do carregamento térmico. (a) temperatura média $T_0$ de cada patamar de tensão, (b) variação linear de temperatura $D_T$ , (c) amplitude do primeiro componente de Fourier $T_1$ , (d) diferença entre $T_1$ e o ajuste linear, (e) amplitude do segundo componente de Fourier $T_2$ .	32
2.10	Resultado do teste realizado com o terceiro corpo de prova de aço, durante a primeira fase do carregamento térmico. (a) temperatura média $T_0$ de cada patamar de tensão, (b) variação linear de temperatura $D_T$ , (c) amplitude do primeiro componente de Fourier $T_1$ , (d) diferença entre $T_1$ e o ajuste linear, (e) amplitude do segundo componente de Fourier $T_2$ .	36
2.11	Corpo de prova de policarbonato usado para o teste.	38
2.12	Resultado do teste realizado com o corpo de prova de policarbonato. (a) temperatura média $T_0$ de cada patamar de tensão, (b) variação linear de temperatura $D_T$ , (c) amplitude do primeiro componente de Fourier $T_1$ , (d) diferença entre $T_1$ e o ajuste linear, (e) amplitude do primeiro componente de Fourier $T_2$ .	40
A.1	Processo iterativo de redução de um simplex, através do método Nelder Mead.	46
B.1	Resultado do primeiro teste realizado com o primeiro corpo de prova de aço. Tensão aplicada de 95.967 MPa.	52

B.2	Resultado do segundo teste realizado com o primeiro corpo de prova de aço. Tensão aplicada de 191.93 <i>MPa</i> .	52
B.3	Resultado do terceiro teste realizado com o primeiro corpo de prova de aço. Tensão aplicada de 219.14 <i>MPa</i> .	53
B.4	Resultado do quarto teste realizado com o primeiro corpo de prova de aço. Tensão aplicada de 237.66 <i>MPa</i> .	53
B.5	Resultado do quinto teste realizado com o primeiro corpo de prova de aço. Tensão aplicada de 254.51 <i>MPa</i> .	54
B.6	Resultado do sexto teste realizado com o primeiro corpo de prova de aço. Tensão aplicada de 270.78 <i>MPa</i> .	54
B.7	Resultado do sétimo teste realizado com o primeiro corpo de prova de aço. Tensão aplicada de 285.32 <i>MPa</i> .	55
B.8	Resultado do oitavo teste realizado com o primeiro corpo de prova de aço. Tensão aplicada de 296.46 <i>MPa</i> .	55
B.9	Resultado do primeiro teste realizado com o segundo corpo de prova de aço. Tensão aplicada de 86.33 <i>MPa</i> .	56
B.10	Resultado do segundo teste realizado com o segundo corpo de prova de aço. Tensão aplicada de 128.76 <i>MPa</i> .	56
B.11	Resultado do terceiro teste realizado com o segundo corpo de prova de aço. Tensão aplicada de 156.06 <i>MPa</i> .	57
B.12	Resultado do quarto teste realizado com o segundo corpo de prova de aço. Tensão aplicada de 176.58 <i>MPa</i> .	57
B.13	Resultado do quinto teste realizado com o segundo corpo de prova de aço. Tensão aplicada de 193.62 <i>MPa</i> .	58
B.14	Resultado do sexto teste realizado com o segundo corpo de prova de aço. Tensão aplicada de 208.82 <i>MPa</i> .	58
B.15	Resultado do sétimo teste realizado com o segundo corpo de prova de aço. Tensão aplicada de 236.89 <i>MPa</i> .	59
B.16	Resultado do oitavo teste realizado com o segundo corpo de prova de aço. Tensão aplicada de 264.77 <i>MPa</i> .	59
B.17	Resultado do nono teste realizado com o segundo corpo de prova de aço. Tensão aplicada de 328.30 <i>MPa</i> .	60
B.18	Resultado do décimo teste realizado com o segundo corpo de prova de aço. Tensão aplicada de 367.65 <i>MPa</i> .	60
B.19	Resultado do décimo primeiro teste realizado com o segundo corpo de prova de aço. Tensão aplicada de 381.52 <i>MPa</i> .	61
B.20	Resultado do primeiro teste realizado com o terceiro corpo de prova de aço, durante a segunda fase do comportamento térmico. Tensão aplicada de 72.84 <i>MPa</i> .	61
B.21	Resultado do segundo teste realizado com o terceiro corpo de prova de aço, durante a segunda fase do comportamento térmico. Tensão aplicada de 104.81 <i>MPa</i> .	62
B.22	Resultado do terceiro teste realizado com o terceiro corpo de prova de aço, durante a segunda fase do comportamento térmico. Tensão aplicada de 141.78 <i>MPa</i> .	62
B.23	Resultado do quarto teste realizado com o terceiro corpo de prova de aço, durante a segunda fase do comportamento térmico. Tensão aplicada de 185.37 <i>MPa</i> .	63

B.24	Resultado do quinto teste realizado com o terceiro corpo de prova de aço, durante a segunda fase do comportamento térmico. Tensão aplicada de 238.51 <i>MPa</i> .	63
B.25	Resultado do sexto teste realizado com o terceiro corpo de prova de aço, durante a segunda fase do comportamento térmico. Tensão aplicada de 302.46 <i>MPa</i> .	64
B.26	Resultado do sétimo teste realizado com o terceiro corpo de prova de aço, durante a segunda fase do comportamento térmico. Tensão aplicada de 340 <i>MPa</i> .	64
B.27	Resultado do oitavo teste realizado com o terceiro corpo de prova de aço, durante a segunda fase do comportamento térmico. Tensão aplicada de 384.12 <i>MPa</i> .	65
B.28	Resultado do nono teste realizado com o terceiro corpo de prova de aço, durante a segunda fase do comportamento térmico. Tensão aplicada de 432.19 <i>MPa</i> .	65
B.29	Resultado do primeiro teste realizado com o terceiro corpo de prova de aço, durante a primeira fase do comportamento térmico. Tensão aplicada de 72.84 <i>MPa</i> .	66
B.30	Resultado do segundo teste realizado com o terceiro corpo de prova de aço, durante a primeira fase do comportamento térmico. Tensão aplicada de 104.81 <i>MPa</i> .	67
B.31	Resultado do terceiro teste realizado com o terceiro corpo de prova de aço, durante a primeira fase do comportamento térmico. Tensão aplicada de 141.78 <i>MPa</i> .	67
B.32	Resultado do quarto teste realizado com o terceiro corpo de prova de aço, durante a primeira fase do comportamento térmico. Tensão aplicada de 185.37 <i>MPa</i> .	68
B.33	Resultado do quinto teste realizado com o terceiro corpo de prova de aço, durante a primeira fase do comportamento térmico. Tensão aplicada de 238.51 <i>MPa</i> .	68
B.34	Resultado do sexto teste realizado com o terceiro corpo de prova de aço, durante a primeira fase do comportamento térmico. Tensão aplicada de 302.46 <i>MPa</i> .	69
B.35	Resultado do sétimo teste realizado com o terceiro corpo de prova de aço, durante a primeira fase do comportamento térmico. Tensão aplicada de 340 <i>MPa</i> .	69
B.36	Resultado do oitavo teste realizado com o terceiro corpo de prova de aço, durante a primeira fase do comportamento térmico. Tensão aplicada de 384.12 <i>MPa</i> .	70
B.37	Resultado do nono teste realizado com o terceiro corpo de prova de aço, durante a primeira fase do comportamento térmico. Tensão aplicada de 432.19 <i>MPa</i> .	70
B.38	Resultado do décimo teste realizado com o terceiro corpo de prova de aço, durante a primeira fase do comportamento térmico. Tensão aplicada de 432.19 <i>MPa</i> .	71
B.39	Resultado do primeiro teste realizado com o corpo de prova de policarbonato. Tensão aplicada de 5.95 <i>MPa</i> .	71

B.40	Resultado do segundo teste realizado com o corpo de prova de policarbonato. Tensão aplicada de 10.12 <i>MPa</i> .	72
B.41	Resultado do terceiro teste realizado com o corpo de prova de policarbonato. Tensão aplicada de 13.21 <i>MPa</i> .	72
B.42	Resultado do quarto teste realizado com o corpo de prova de policarbonato. Tensão aplicada de 20.52 <i>MPa</i> .	73
B.43	Resultado do quinto teste realizado com o corpo de prova de policarbonato. Tensão aplicada de 24.75 <i>MPa</i> .	73
B.44	Resultado do sexto teste realizado com o corpo de prova de policarbonato. Tensão aplicada de 35.29 <i>MPa</i> .	74
C.1	Malha utilizada para a análise de elementos finitos dos dois primeiros corpos de prova de aço.	75
C.2	Mapa de tensões do modelo de elementos finitos quando carregado com 10 kN.	79

## Lista de tabelas

2.1	Tensões médias e alternadas aplicadas em cada patamar do teste com o primeiro corpo de prova de aço.	20
2.2	Resultado do teste realizado com o primeiro corpo de prova de aço, contendo os valores $T_0$ , $D_T$ , $T_1$ e $T_2$ obtidos para cada patamar de tensão.	20
2.3	Ganhos $K_{lit}$ e $K_{exp}$ para cada patamar de tensão do teste realizado com o primeiro corpo de prova de aço.	23
2.4	Tensões médias e alternadas aplicadas em cada patamar do teste com o segundo corpo de prova de aço.	25
2.5	Resultado do teste realizado com o segundo corpo de prova de aço, contendo os valores $T_0$ , $D_T$ , $T_1$ e $T_2$ obtidos para cada patamar de tensão.	25
2.6	Ganhos $K_{lit}$ e $K_{exp}$ para cada patamar de tensão do teste realizado com o segundo corpo de prova de aço.	28
2.7	Tensões médias e alternadas aplicadas em cada patamar do teste com o terceiro corpo de prova de aço.	30
2.8	Resultado do teste realizado com o terceiro corpo de prova de aço, durante a fase 2 do comportamento térmico, contendo os valores $T_0$ , $D_T$ , $T_1$ e $T_2$ obtidos para cada patamar de tensão.	30
2.9	Ganhos $K_{lit}$ e $K_{exp}$ para cada patamar de tensão do teste realizado com o terceiro corpo de prova de aço, durante a segunda fase do comportamento térmico.	33
2.10	Resultado do teste realizado com o terceiro corpo de prova de aço, durante a fase 1 do comportamento térmico, contendo os valores $T_0$ , $D_T$ , $T_1$ e $T_2$ obtidos para cada patamar de tensão.	35
2.11	Tensões médias e alternadas aplicadas em cada patamar do teste com o corpo de prova de policarbonato.	38
2.12	Resultado do teste realizado com o corpo de prova de policarbonato, contendo os valores $T_0$ , $D_T$ , $T_1$ e $T_2$ obtidos para cada patamar de tensão.	39
2.13	Ganhos $K_{lit}$ e $K_{exp}$ para cada patamar de tensão do teste realizado com o corpo de prova de policarbonato.	41
A.1	Resultado do processo de minimização realizado com o último patamar de tensão aplicado no segundo corpo de prova de aço, contendo os valores $T_0$ , $D_T$ , $T_1$ e $T_2$ obtidos para diferentes intervalos.	50
C.1	Tensões atuantes no ponto crítico do corpo durante múltiplos carregamentos do modelo de elementos finitos.	76
C.2	Tensões atuantes no ponto crítico do corpo durante o último carregamento do modelo de elementos finitos.	77
C.3	Tensões atuantes no ponto crítico do corpo durante o último carregamento do modelo de elementos finitos (CONT.).	78
C.4	Fator de concentração de tensão $K_t$ .	79

# 1

## Introdução

### 1.1

#### Fadiga

Dano por fadiga é um fenômeno que ocorre em corpos sujeitos à esforços variantes. Quando um componente sofre carregamento repetido, mesmo com tensões abaixo do seu limite de resistência, sua microestrutura vai sendo gradualmente danificada, levando a alterações nas propriedades do material. Esse dano gradual consiste no surgimento de microtrincas, que vão se desenvolvendo conforme o material é carregado e descarregado continuamente. Uma vez que esta trinca alcance um tamanho significativo, a redução do material faz com que a tensão naquela área se torne muito maior que a tensão aplicada no componente, levando, eventualmente, a uma falha.

As falhas por fadiga são localizadas, muitas vezes sendo propiciadas por elementos concentradores de tensão como cantos vivos e entalhes, e, portanto, devem ser tratadas como problemas locais. Deformações plásticas extensas são incomuns em casos envolvendo fadiga, já que a trinca se desenvolve sem dar um sinal de que o componente está sofrendo dano, de modo que a fratura da peça pode ocorrer de forma brusca e inesperada. Por este motivo, novas estruturas, que estarão sujeitas a carregamentos variáveis, devem ser projetadas com conhecimento de que a maioria das falhas estruturais ocorre devido a problemas envolvendo fadiga, e a realização de inspeções regulares de integridade estrutural para verificar o surgimento de trincas pode evitar a inutilização de equipamentos, e, até mesmo, falhas catastróficas.[2]

Um dos métodos mais utilizados para determinar o limite de fadiga de um material é conhecido como "Up-and-Down" ou "staircase". Neste método, um corpo de prova é carregado com uma tensão pré-determinada durante  $N$  ciclos, usualmente  $10^6$  ou  $10^7$ . Caso a vida desejada seja alcançada, o próximo teste é realizado com uma tensão maior, caso contrário, ocorrendo uma falha antes do esperado, a tensão é reduzida para o próximo teste. Desta maneira, ao repetir este ensaio dezenas de vezes, é possível estimar a tensão correspondente a uma falha em  $N$  ciclos. Os dados obtidos destes experimentos podem ser utilizados para criar um gráfico das tensões aplicadas em função da vida  $N$  atingida em cada teste. Esse gráfico é conhecido como a curva de Wöhler ou curva S-N, figura 1.1.

Uma das maiores desvantagens do método "staircase" é o grande número

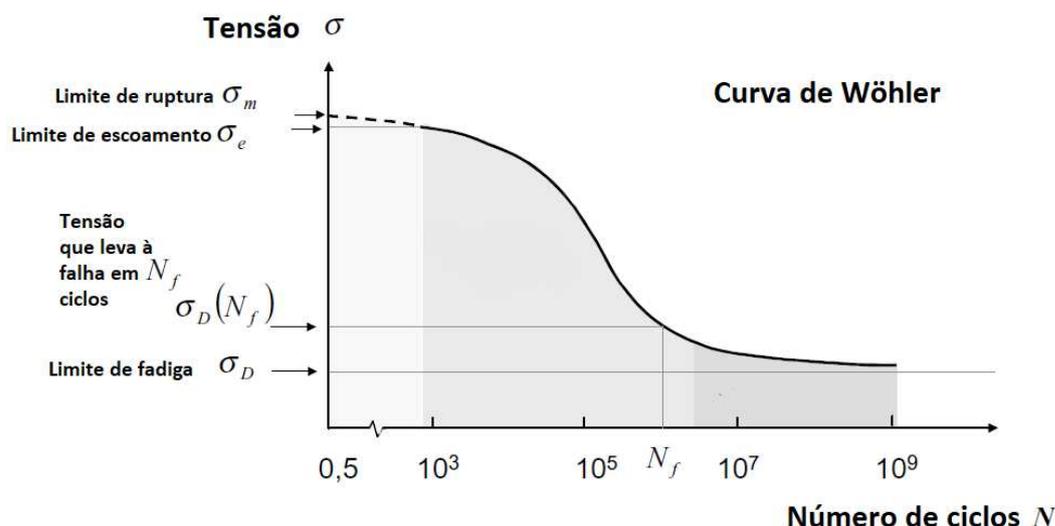


Figura 1.1: A curva de Wöhler fornece a resistência à fadiga em função da vida esperada em  $N$  ciclos.

de corpos de prova necessários para o experimento. Cada componente precisa ser testado até que ocorra uma falha ou a vida  $N$  pré-determinada seja alcançada. Por esse motivo, os ensaios costumam ser muito demorados e custosos, o que leva projetistas a não realizarem testes para obter informações mais precisas sobre as propriedades dos materiais que estão utilizando, e dar preferência ao que pode ser encontrado na literatura.

## 1.2 Termografia

Termografia é uma técnica que permite criar uma imagem térmica de um corpo, permitindo observar variações de temperatura ao longo de sua superfície. Essa técnica é muito usada na área de manutenção preventiva, uma vez que, para sua utilização, não é necessário o desligamento de quaisquer equipamentos, permitindo a detecção de falhas mecânicas, em instalações elétricas e fadiga de materiais sem que haja interrupção de qualquer operação.

Sabe-se que a temperatura de um componente varia quando este está sujeito a um carregamento, devido a conversão da energia mecânica em energia térmica, e que este aumento de temperatura é proporcional a tensão sendo aplicada. A utilização da termografia, que é um ensaio não destrutivo e sem contato, permite obter essa informação de variação de temperatura para análise.

Este projeto tem o objetivo de aplicar o método proposto por Krapez [1],

que visa determinar o limite de fadiga de um material, utilizando termografia. Segundo Krapez, ao observar o comportamento térmico de um componente sob carregamento cíclico ao longo de múltiplos patamares de tensão, seria possível identificar um padrão, e quando a tensão aplicada ultrapassasse o limite de fadiga do material, este padrão sofreria uma alteração devido ao dano causado à microestrutura do material. Desta maneira, seria possível determinar o limite de fadiga de um material utilizando um único corpo de prova, sendo carregado ciclicamente durante um curto período de tempo para diversos patamares de tensão.

## 2 Experimento

Krapez propõe, em seu artigo [1], que o comportamento térmico superficial de um corpo, sendo carregado ciclicamente, pode ser aproximado pela equação (2-1). Segundo o método, os valores dos termos desta equação serão alterados conforme a tensão aplicada for sendo incrementada, e, a partir da observação do comportamento de cada um desses termos, gerado pelo aumento gradual do valor da tensão, seria possível definir, ou ao menos aproximar, o valor do limite de fadiga do material sendo testado.

$$T_{mod}(t) = T_0 + D_T ft + T_1 \sin(2\pi ft + \varphi_1) + T_2 \sin(4\pi ft + \varphi_2) \quad (2-1)$$

Na equação (2-1), proposta por Krapez,  $f$  é a frequência de teste,  $T_0$  é a temperatura do componente no início do experimento,  $D_T$  é a inclinação do ajuste linear,  $T_1$  e  $\varphi_1$  são a amplitude e fase do componente de Fourier na frequência  $f$  [1], e  $T_2$  e  $\varphi_2$  são a amplitude e fase do componente de Fourier na frequência  $2f$  [1]. Para melhor ajustar esta equação aos dados experimentais, Krapez utilizou a função de custo (2-2) baseada em uma minimização de mínimos quadrados:

$$J = \sum_{i=1}^n (T_{exp}(t_i) - T_{mod}(t_i))^2 \quad (2-2)$$

O método propõe que um corpo de prova seja carregado ciclicamente, e que isto seja feito para diferentes patamares de tensão. Durante cada teste realizado, a temperatura superficial do corpo é medida utilizando uma câmera térmica. Ao fim do ensaio, haverá, para cada patamar de tensão, um arquivo contendo o valor da temperatura superficial do corpo ao longo do teste. Aplicando cada um destes arquivos na função de custo  $J$ , equação (2-2), resultará em um conjunto de valores de  $T_0$ ,  $D_T$ ,  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $f$ ,  $\varphi_1$  e  $\varphi_2$  que melhor adequam o modelo de temperatura aos dados obtidos experimentalmente, para cada patamar de tensão.

Para a determinação do limite de fadiga do material utilizado, o método foca na observação dos valores obtidos para cada um dos termos  $D_T$ ,  $T_1$  e  $T_2$  ao longo do ensaio. Ao construir um gráfico, para cada um dos termos sendo observados, contendo os valores obtidos para cada patamar de tensão

em função da tensão aplicada, é possível ver mudanças no comportamento termomecânico do material. Deste modo, segundo o método, o limite de fadiga do material seria equivalente ao valor da tensão onde ocorre esta mudança de comportamento, que marcaria transição do comportamento elástico para o elastoplástico.

## 2.1

### Equipamento

O método requer os valores de temperatura superficial do corpo de teste ao longo do carregamento. Para a aquisição de dados, foi utilizada uma câmera térmica de modelo FLIR A665sc da empresa FLIR Systems, que possui um plano focal de 640x480 pixels de 17 microns cada, frequência de aquisição de dados de 50Hz em frame total e até 200Hz em um quarto de frame, e uma sensibilidade de 30mK, figura 2.1. Este modelo pode utilizar duas faixas de temperatura, de -40°C até 150°C e de 100°C até 650°C.



Figura 2.1: Câmera térmica de modelo FLIR a665sc da empresa FLIR Systems.

Em conjunto com a câmera, foi utilizado o software de análise térmica ResearchIR, também da empresa FLIR. O software se conectava com a câmera através de um cabo ethernet, permitindo o controle da câmera, gravação de dados e a escolha da área de foco. Os dados adquiridos eram exportados no formato de arquivo de texto, contendo o valor da temperatura média da área selecionada e a data e horário de cada frame da gravação.

Duas máquinas foram utilizadas para realizar os testes. Os experimentos com os corpos de aço foram realizados em uma máquina de teste Instron 8501, figura 2.2a. Esse equipamento pode ser utilizado para determinar a curva Tensão-Deformação, usando tanto tensão quanto compressão. A garra superior possui uma célula de carga, usada para medir a força sendo aplicada, enquanto a garra inferior suporta o atuador hidráulico. A máquina é operada a partir de um painel de controle.

O experimento com o corpo de prova de policarbonato foi realizado em uma máquina de teste de tração construída no laboratório, figura 2.2b [3]. A máquina aplica uma carga cíclica através de uma servoválvula, que é controlada por um programa de computador. O valor desta carga é definido por três válvulas que regulam a pressão do ar que entra no músculo pneumático e a taxa com que o ar é expelido após cada ciclo. A máquina também possui uma célula de carga que permite que a resposta da carga seja alimentada ao programa, ao conecta-la em série com o corpo de prova.

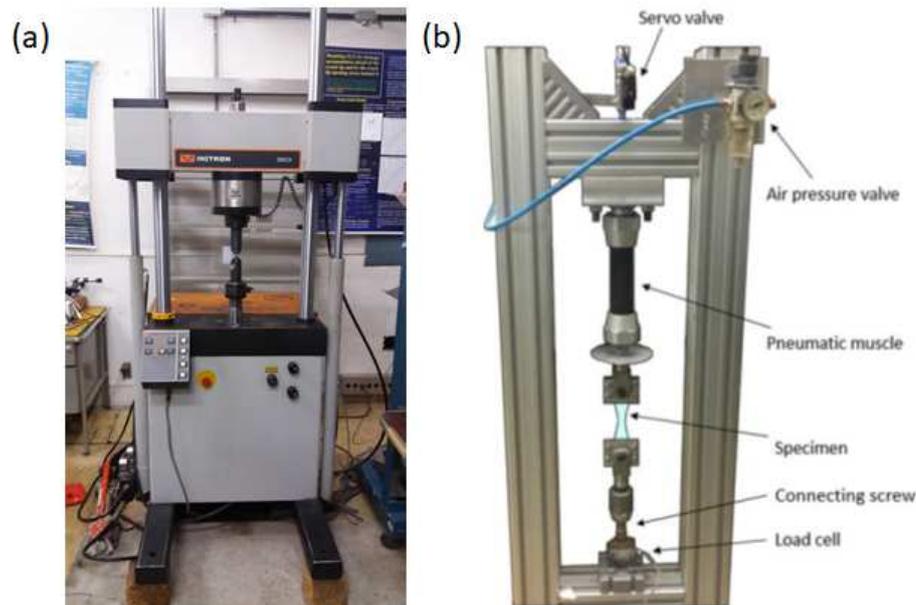


Figura 2.2: Máquinas utilizadas para os testes. (a) Instron 8501, (b) máquina construída no laboratório.

Como o experimento envolve a medição de temperatura dos corpos de prova, o isolamento térmico dos testes é indispensável. Durante os testes com os corpos de prova de aço, após a câmera térmica ter sido montada próxima à máquina de teste Instron, ambas foram envoltas com um tecido preto, figura 2.3, de modo a impedir que a câmera captasse o sinal térmico de outros aparelhos do laboratório e que correntes de ar alterassem a temperatura dos corpos. A máquina de teste construída no laboratório, usada para o experimento com o corpo de prova de policarbonato, possui uma proteção de madeira, com um orifício para o posicionamento da câmera, que atua como proteção térmica.



Figura 2.3: Isolamento térmico dos corpos de prova de aço.

## 2.2 Testes

Baseado no experimento descrito por Krapez, foram realizados quatro testes de carregamento cíclico, utilizando dois corpos do tipo keyhole de aço API 5L grau B, ambos ensaiados com uma razão entre as cargas mínima e máxima de  $R = 0$ , e dois corpos de prova de carregamento uniaxial, um de aço API 5L grau B, utilizando  $R = 0.1$ , e um de policarbonato, utilizando  $R = 0$ . Os testes foram realizados com o objetivo de medir a temperatura superficial dos corpos e utilizar essa informação para adaptar a equação (2-1), de modo a acompanhar o valor dos termos  $T_0$ ,  $D_T$ ,  $T_1$  e  $T_2$  para cada patamar de tensão e verificar se, a partir de seu comportamento, seria possível determinar o limite de fadiga dos materiais.

A interpretação dos dados obtidos deste experimento será um pouco diferente da que foi realizada por Krapez, devido à escolha do intervalo de aquisição de dados. Segundo Risitano [4], durante o carregamento cíclico de um componente, com tensões acima do limite de fadiga do material, ficam evidentes três fases distintas de variação da temperatura superficial. Há um aumento da temperatura (fase 1), seguido por um período onde esta se mantém praticamente constante (fase 2), sendo que maiores tensões levam a maiores temperaturas de estabilização, e então uma segunda fase de aumento da temperatura superficial imediatamente antes da falha (fase 3), como pode ser observado na figura 2.4.

Krapez utilizou os dados obtidos durante a fase 1 do comportamento térmico do componente, referente ao crescimento inicial que pode ser observado na figura 2.4, tirando suas conclusões do comportamento observado dos termos  $D_T$ ,  $T_1$  e  $T_2$ , que representam, respectivamente, a taxa de variação linear e amplitudes do primeiro e segundo componente de Fourier.

Para este projeto, escolheu-se utilizar os dados obtidos durante a fase

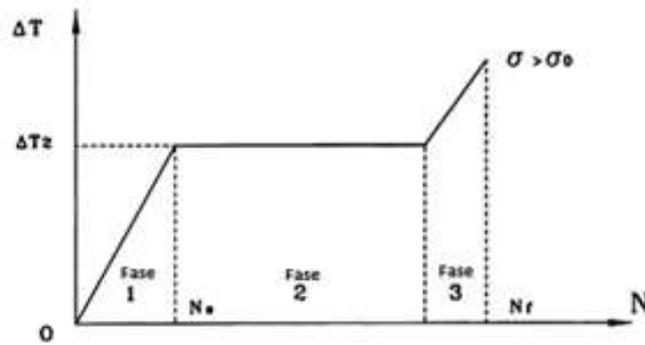


Figura 2.4: Fases do comportamento térmico do componente: variação de temperatura em função do número de ciclos.

2 do comportamento térmico, referente ao trecho aonde a temperatura se mantém estabilizada, seguindo o argumento de que, na ausência de uma variação linear, as amplitudes  $T_1$  e  $T_2$  poderiam ser determinadas com maior precisão. A mudança do trecho sendo observado não implica em nenhuma alteração necessária na equação (2-1), porém um de seus termos passa a ter um significado diferente.  $T_0$ , que durante a fase 1 do comportamento térmico era a temperatura inicial do teste, passa a representar a temperatura média de estabilização da fase 2, substituindo  $D_T$ , que agora se torna uma ferramenta para verificar a estabilidade da fase 2, como um dos termos cujo comportamento ao longo dos patamares de tensão deve ser examinado para determinar-se o limite de fadiga do material. Como a temperatura de estabilização da fase 2 está diretamente relacionada com a taxa de variação linear da fase 1, o comportamento que devemos observar para  $T_0$  deve ser similar ao que foi descrito por Krapez para o termo  $D_T$ , que consiste em valores aproximadamente constantes, para tensões abaixo do limite de fadiga, seguido por crescimento conforme o aumento de tensão.

Os resultados dos testes serão apresentados através de uma tabela, contendo a tensão aplicada em cada patamar e os valores obtidos para cada termo da equação (2-1), e de cinco gráficos mostrando o comportamento desses termos conforme o aumento da carga aplicada.

### 2.2.1

#### Teste com o primeiro corpo de prova de aço

O experimento com o primeiro corpo do tipo keyhole de aço, figura 2.5, foi realizado na máquina de teste Instron 8501, figura 2.2a. A aquisição de dados foi feita em oito patamares de tensão. Para cada patamar foi medida a diferença de temperatura entre a área crítica do corpo de prova, onde

ocorriam as maiores tensões, e um ponto do mesmo corpo onde a tensão era praticamente nula, durante um intervalo de aproximadamente um minuto, a partir do momento que a temperatura superficial do corpo de prova deixava de ter um crescimento significativo e se estabilizava em torno de uma temperatura média, marcando o início da fase 2 do comportamento térmico. O teste foi realizado com frequências de teste da ordem de  $0.5Hz$  e de aquisição de dados de  $50Hz$ . Esses valores foram escolhidos de modo a obter um maior número de pontos das senoides, o que permitiu ao programa utilizado para adequar a equação de temperatura aos dados obtidos convergir para resultados mais exatos, apesar do ruído captado durante o teste.

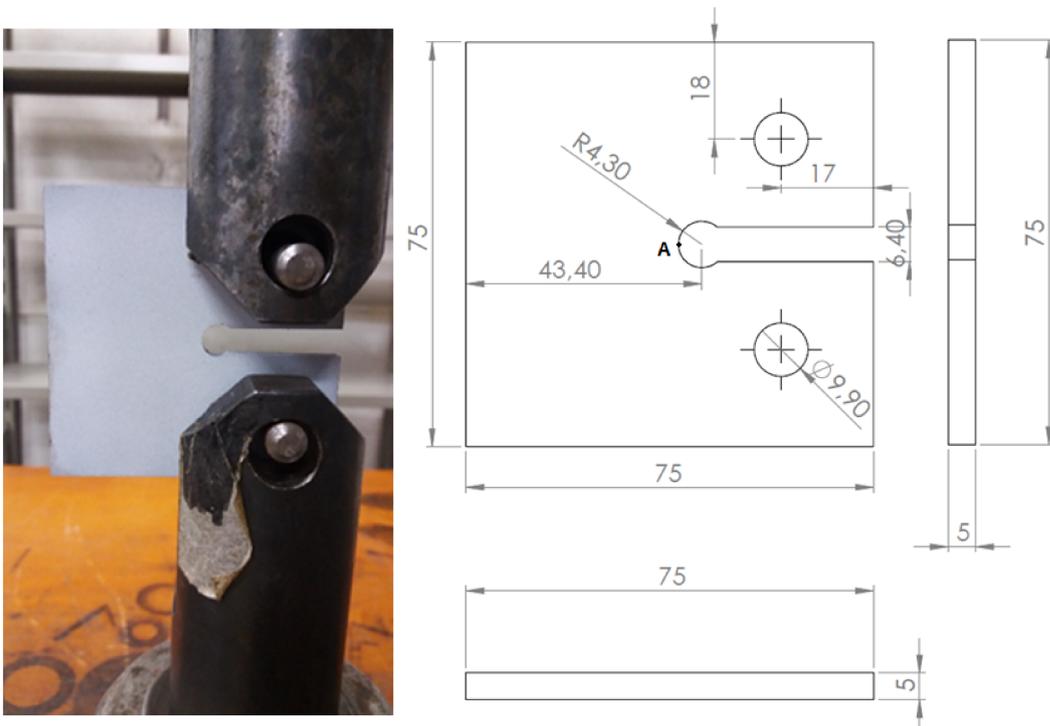


Figura 2.5: Corpo de prova do tipo keyhole de aço usado para o primeiro teste.

As tensões totalmente alternadas equivalentes  $\sigma_{aeq}$ , atuantes no ponto crítico do espécime<sup>1</sup>, apresentadas na tabela 2.2 foram obtidas a partir de uma análise de elementos finitos<sup>2</sup> do corpo de prova utilizado. Esses valores foram corroborados pelos dados obtidos do teste de Correlação Digital de Imagem (DIC)<sup>3</sup>, realizado simultaneamente ao teste termográfico, utilizado para medir as deformações sofridas pelo corpo de prova ao longo do teste. O teste foi

<sup>1</sup>Indicado pela letra A na figura 2.5.

<sup>2</sup>Características do modelo de elementos finitos apresentadas no apêndice C.

<sup>3</sup>Técnica óptica utilizada para determinar áreas de deslocamento e deformação sem que haja contato.

realizado com uma razão entre as tensões mínima e máxima de  $R = 0$ , o que fez com que o carregamento alternado  $P_a$  fosse igual ao carregamento médio  $P_m$ .

Os dados aqusitados<sup>4</sup> foram processados utilizando um método de minimização<sup>5</sup> de modo a encontrar os termos da equação (2-1) que melhor se adequassem aos valores experimentais, esse processo é descrito com mais detalhes no apêndice A. A tabela 2.1 contém as tensões alternada e média aplicada em cada carregamento, e a tabela 2.2 contém os valores dos termos  $T_0$ ,  $D_T$ ,  $T_1$  e  $T_2$ , para cada patamar de tensão, obtidos a partir desse processamento. Como Krapez[1] não considerou os termos  $\varphi_1$  e  $\varphi_2$  em sua análise, estes não serão utilizados, de modo a evitar conclusões além das que o método propõe.

<b>Patamar</b>	1	2	3	4	5	6	7	8
$\sigma_a$ [MPa]	78	131	143	151	158	164	169	173
$\sigma_m$ [MPa]	78	131	143	151	158	164	169	173

Tabela 2.1: Tensões médias e alternadas aplicadas em cada patamar do teste com o primeiro corpo de prova de aço.

<b>Patamar</b>	$\sigma_{a_{eq}}$ [MPa]	$T_0$ [°C]	$D_T$ [mK/ciclo]	$T_1$ [mK]	$T_2$ [mK]
1	96.0	1.04	0.6	31.7	4.3
2	192	1.08	1.1	61.8	5.2
3	219	1.07	0.9	83.4	7.7
4	238	1.12	-0.6	102	1.9
5	255	1.13	0	115	3.8
6	271	1.12	0.1	120	5.9
7	285	1.14	0.4	139	0.5
8	296	1.15	0.3	166	0

Tabela 2.2: Resultado do teste realizado com o primeiro corpo de prova de aço, contendo os valores  $T_0$ ,  $D_T$ ,  $T_1$  e  $T_2$  obtidos para cada patamar de tensão.

A figura 2.6 contém cinco gráficos, construídos a partir dos dados da tabela 2.2. A figura 2.6a representa a evolução dos valores de  $T_0$  ao longo dos

<sup>4</sup>Sinal térmico do corpo de prova, aqusitado durante um intervalo de um minuto para cada um dos oito patamares de tensão aplicados.

<sup>5</sup>Foram utilizados os métodos Nelder-Mead e SLSQP para minimizar a função de custo J (2-2).

patamares de tensão. Pode-se ver que os valores obtidos de  $T_0$  para as primeiras tensões aplicadas se mantêm praticamente constantes, em torno de  $1.06\text{ }^\circ\text{C}$  acima da temperatura de referência, havendo uma variação muito pequena entre eles, enquanto que, para tensões mais altas, observa-se um crescimento quase linear seguindo o aumento da tensão. Segundo Krapez, esta mudança de comportamento marca a separação entre as tensões abaixo e acima do limite de fadiga do material aplicadas durante o experimento. A partir da figura 2.6a, vemos que esta mudança de comportamento acontece próxima à uma tensão de  $200\text{ MPa}$ .

Os dados utilizados para esta análise foram adquiridos durante a fase 2 do comportamento térmico do material, onde a temperatura média do corpo se mantêm estável. O termo  $D_T$ , que representa a variação linear na equação (2-1), não fornece muita informação, no intervalo escolhido, no que se refere à determinar o limite do fadiga do material, mas pode ser utilizado para confirmar a estabilidade da fase 2. Na figura 2.6b vemos que a maioria dos valores obtidos para  $D_T$  estão bem próximos de zero, da ordem de  $0.2\text{ mK/ciclo}$ . Os primeiros patamares de tensão apresentaram valores de  $D_T$  um pouco mais elevados, mas ainda dentro do esperado, que podem ser explicados por erros de convergência do processo de minimização, causados por flutuações dos valores máximos atingidos pelas senoides.

O termo  $T_1$ , que representa a amplitude do primeiro componente de Fourier na equação (2-1), varia de  $30\text{ mK}$ , no primeiro patamar, até ultrapassar  $160\text{ mK}$ , para a maior tensão usada no ensaio. Assim como  $T_0$ , é esperado que  $T_1$  sofra uma mudança de comportamento ao longo do teste. Mas, ao invés de assumir valores constantes para as primeiras tensões aplicadas, irá apresentar um crescimento linear, devido ao fenômeno termoelástico, até um determinado valor de tensão, a partir do qual, esse crescimento se torna mais acelerado.

A figura 2.6c mostra a evolução do valor de  $T_1$  ao longo dos patamares, enquanto na figura 2.6d é possível observar a diferença entre os valores de  $T_1$  e a linha de tendência traçada a partir dos pontos iniciais, que apresentam um comportamento mais linear, tornando mais evidente a mudança de comportamento. Do gráfico podemos retirar que esta mudança ocorre em torno de  $200\text{ MPa}$ , o que condiz com o que foi observado para  $T_0$ .

O termo  $T_2$ , que representa a amplitude do segundo componente de Fourier na equação (2-1), deveria apresentar um comportamento semelhante ao que foi observado para  $T_0$ , mantendo-se constante durante os primeiros patamares de tensão, e então iniciar um crescimento. No entanto, como podemos observar na figura 2.6e, os valores obtidos não seguem um comportamento aparente. Podemos ver que o termo  $T_2$  assume valores em torno de  $5\text{ mK}$  e isso,

em conjunto com a sensibilidade de  $30\text{ mK}$  da câmera térmica usada, reduziu a exatidão com que este foi determinado pelo programa de minimização.

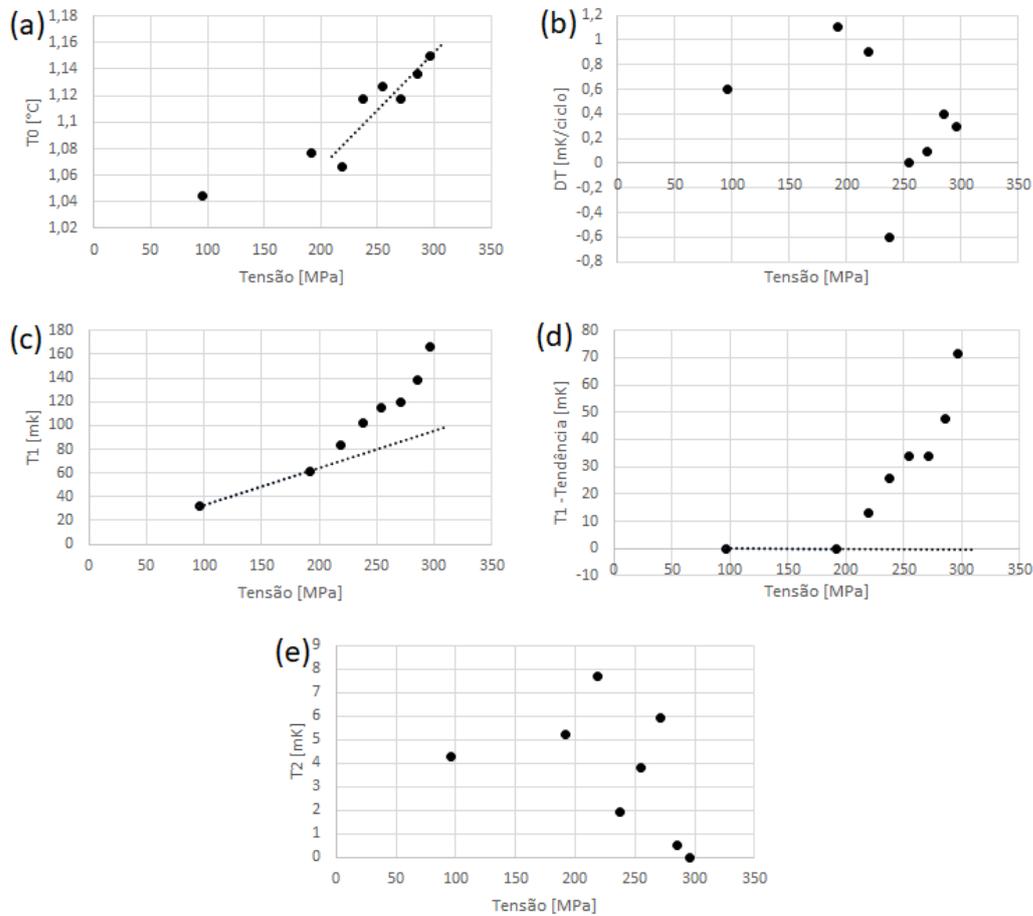


Figura 2.6: Resultado do teste realizado com o primeiro corpo de prova de aço. (a) temperatura média  $T_0$  de cada patamar de tensão, (b) variação linear de temperatura  $D_T$ , (c) amplitude do primeiro componente de Fourier  $T_1$ , (d) diferença entre  $T_1$  e o ajuste linear, (e) amplitude do segundo componente de Fourier  $T_2$ .

O efeito termoelástico foi documentado pela primeira vez por William Thomson (Lorde Kelvin)[5]. Ele descobriu que, quando materiais sólidos sofrem forças trativas ou compressivas, sua temperatura aumenta levemente ou é reduzida na mesma proporção, respectivamente. Este fenômeno é descrito pela equação (2-3), onde  $\alpha$  é o coeficiente de expansão térmica linear,  $T_0$  é a temperatura de referência,  $\rho$  é a densidade do material,  $c_p$  é o calor específico a pressão constante e  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$  são as tensões principais.

$$\Delta T = \frac{-\alpha T_0}{\rho c_p} (\Delta \sigma_1 + \Delta \sigma_2) \quad (2-3)$$

A partir da equação (2-3), é possível determinar um fator  $K$  que relaciona a variação de temperatura e a tensão à qual o corpo está sujeito, de modo que  $\Delta T = K \cdot T \cdot \Delta \sigma$ . O valor deste ganho  $K$  foi calculado com valores obtidos a partir da literatura e com os obtidos para cada patamar de tensão, utilizando as equações (2-4) e (2-5).

$$K_{lit} = \frac{\alpha}{\rho c} \quad (2-4)$$

$$K_{exp} = \frac{2T_1}{T 2\sigma_a} \quad (2-5)$$

A tabela 2.3 contém os valores de  $K_{lit}$  e  $K_{exp}$  para cada patamar de tensão, calculados utilizando  $\alpha = 11 \cdot 10^{-6} \text{ m/m/K}$ ,  $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$ ,  $c = 0.49 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$  e  $T = 298 \text{ K}$ .

<b>Patamar</b>	$K_{lit}[10^{-12}Pa^{-1}]$	$K_{exp}[10^{-12}Pa^{-1}]$
1	2.86	1.36
2	2.86	1.58
3	2.86	1.96
4	2.86	2.26
5	2.86	2.44
6	2.86	2.46
7	2.86	2.76
8	2.86	3.22

Tabela 2.3: Ganhos  $K_{lit}$  e  $K_{exp}$  para cada patamar de tensão do teste realizado com o primeiro corpo de prova de aço.

Podemos observar que, para uma tensão entre os patamares 2 e 3, ocorre uma mudança de comportamento e o valor de  $K_{exp}$  começa a crescer.

A diferença entre os valores iniciais de  $K_{exp}$  e  $K_{lit}$  deve-se a uma dificuldade do programa de minimização de determinar a amplitude  $T_1$  com maior precisão devido a flutuações dos valores máximos atingidos pelas senoides. Como esta redução do valor de  $T_1$  ocorre na mesma escala ao longo de todos os patamares de tensão utilizados durante o ensaio, o comportamento obser-

vado na figura 2.6c é real. O apêndice B deste projeto contém a representação gráfica dos resultados obtidos para cada tensão aplicada.

O corpo de prova foi feito de aço API 5L grau B, vindo de um duto usado em um experimento de resistência a fadiga na presença de mossas. Este corpo de prova foi ensaiado com uma razão entre as tensões mínima e máxima de  $R = 0$ . Para esta razão  $R$ , a referência [6] indica um valor do limite de fadiga do material em torno de  $195 \text{ MPa}$ , determinado a partir da observação de uma curva  $\Delta T_i$  vs.  $\Delta \sigma_i$  para várias etapas de aumento de carga. Sendo assim, o resultado de  $200 \text{ MPa}$ , obtido a partir dos testes, é aceitável.

O tempo de teste com o primeiro corpo de prova de aço, considerando o intervalo de carregamento com cada patamar de tensão e tempo necessário para recalibrar a câmera térmica entre cada carregamento, foi cerca de quatro horas. O processo de minimização requer, aproximadamente, três minutos por patamar de tensão para adequar a equação (2-1) aos dados do teste. A montagem do corpo de prova na máquina de teste e a preparação da câmera levaram em torno de vinte minutos. Deste modo, o tempo total do experimento com o primeiro corpo de prova de aço e do processamento e análise de dados foi em torno de cinco horas<sup>6</sup>.

### 2.2.2

#### Teste com o segundo corpo de prova de aço

O experimento com o segundo corpo do tipo keyhole de aço, que possui as mesmas dimensões que o primeiro, foi realizado na mesma máquina de teste Instron 8501. A aquisição de dados foi feita em onze patamares de tensão. Para cada patamar foi medida a diferença de temperatura entre a área crítica do corpo de prova, onde ocorriam as maiores tensões, e um ponto do mesmo corpo onde esta era praticamente nula, durante um intervalo de aproximadamente um minuto, a partir do momento que a temperatura superficial do corpo de prova deixava de ter um crescimento significativo e se estabilizava em torno de uma temperatura média, marcando o início da fase 2 do comportamento térmico. O teste foi realizado com frequências de teste da ordem de  $2 \text{ Hz}$  e de aquisição de dados de  $50 \text{ Hz}$ , de modo a manter o sistema adiabático desde o início do teste.

As tensões totalmente alternadas equivalentes  $\sigma_{aeq}$  apresentadas na tabela 2.5 foram obtidas a partir de uma análise de elementos finitos<sup>7</sup> do corpo de prova utilizado. O teste foi realizado com uma razão entre as tensões mínima e máxima de  $R = 0$ , o que fez com que o carregamento alternado  $P_a$

<sup>6</sup>Durante o teste com o primeiro corpo de prova de aço não houve iniciação de trinca.

<sup>7</sup>Características do modelo de elementos finitos apresentadas no apêndice C.

fosse igual ao carregamento médio  $P_m$ . Os dados adquiridos<sup>8</sup> foram processados utilizando um método de minimização<sup>9</sup> de modo a encontrar os termos da equação (2-1) que melhor se adequassem aos valores experimentais, esse processo é descrito com mais detalhes no apêndice A. A tabela 2.4 contém as tensões alternada e média aplicada em cada carregamento, e a tabela 2.5 contém os valores dos termos  $T_0$ ,  $D_T$ ,  $T_1$  e  $T_2$ , para cada patamar, obtidos a partir desse processamento.

<b>Patamar</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$\sigma_a$ [MPa]	71	98	113	124	132	138	151	162	183	195	199
$\sigma_m$ [MPa]	71	98	113	124	132	138	151	162	183	195	199

Tabela 2.4: Tensões médias e alternadas aplicadas em cada patamar do teste com o segundo corpo de prova de aço.

<b>Patamar</b>	$\sigma_{a_{eq}}$ [MPa]	$T_0$ [°C]	$D_T$ [mK/ciclo]	$T_1$ [mK]	$T_2$ [mK]
1	86.3	0.18	0.1	15.5	1.2
2	129	0.21	0	33	1.7
3	156	0.23	-0.1	46.1	2.1
4	177	0.17	0.3	42.8	5
5	194	0.23	-0.4	77.7	0.9
6	209	0.17	0.1	67	2.3
7	237	0.21	-0.4	116	-0.3
8	265	0.22	0.1	153	12.3
9	328	0.25	-0.2	173	53.4
10	368	0.34	-0.8	211	6.9
11	382	0.43	-0.1	227	18.3

Tabela 2.5: Resultado do teste realizado com o segundo corpo de prova de aço, contendo os valores  $T_0$ ,  $D_T$ ,  $T_1$  e  $T_2$  obtidos para cada patamar de tensão.

A figura 2.7 contém cinco gráficos, construídos a partir dos dados da tabela 2.5. A figura 2.7a representa a evolução dos valores de  $T_0$  ao longo dos patamares de tensão. Pode-se ver que os valores obtidos de  $T_0$  para as primeiras

<sup>8</sup>Sinal térmico do corpo de prova, adquirido durante um intervalo de um minuto para cada um dos onze patamares de tensão aplicados.

<sup>9</sup>Foram utilizados os métodos Nelder-Mead e SLSQP para minimizar a função de custo J (2-2).

tensões aplicadas se mantém praticamente constantes, em torno de  $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$  acima da temperatura de referência, havendo uma variação muito pequena entre eles, enquanto que, para tensões mais altas, observa-se um crescimento quase linear seguindo o aumento da tensão. Segundo Krapez[1], esta mudança de comportamento marca a separação entre as tensões abaixo e acima do limite de fadiga do material aplicadas durante o experimento. A partir da figura 2.7a, vemos que esta mudança de comportamento acontece próxima à uma tensão de  $210\text{ MPa}$ .

Os dados utilizados para esta análise foram adquiridos durante a fase 2 do comportamento térmico do material, onde a temperatura média do corpo se mantém estável. O termo  $D_T$ , que representa a variação linear da temperatura na equação (2-1), não fornece muita informação no que se refere à determinar o limite de fadiga do material, mas pode ser utilizado para confirmar a estabilidade da fase 2. Na figura 2.7b vemos que a maioria dos valores obtidos para  $D_T$  estão bem próximos de zero, da ordem de  $\pm 0.2\text{ mK/ciclo}$ .

O termo  $T_1$ , que representa a amplitude do primeiro componente de Fourier na equação (2-1), varia de  $15\text{ mK}$ , no primeiro patamar, até ultrapassar  $220\text{ mK}$ , para a maior tensão usada no ensaio. Assim como  $T_0$ , é esperado que  $T_1$  sofra uma mudança de comportamento ao longo do teste. Mas, ao invés de assumir valores constantes para as primeiras tensões aplicadas, irá apresentar um crescimento linear, devido ao fenômeno termoelástico, até um determinado valor de tensão, a partir do qual, esse crescimento se torna mais acelerado.

A figura 2.7c mostra a evolução do valor de  $T_1$  ao longo dos patamares de tensão, enquanto na figura 2.7d é possível observar a diferença entre os valores de  $T_1$  e a linha de tendência traçada a partir dos pontos iniciais, que apresentam um comportamento mais linear, tornando mais evidente a mudança de comportamento. Do gráfico podemos retirar que esta mudança ocorre em torno de  $210\text{ MPa}$ , o que condiz com o que foi observado para  $T_0$ .

O termo  $T_2$ , que representa a amplitude do segundo componente de Fourier na equação (2-1), apresenta um comportamento semelhante ao que foi observado para  $T_0$ , mantendo-se constante durante os primeiros patamares de tensão, e então sofrendo um crescimento. Na figura 2.7e vemos que  $T_2$  assume valores próximos de zero durante os primeiros patamares de tensão, apresentando um claro crescimento após o sexto ponto. Para as últimas tensões utilizadas neste teste, parece que houve uma queda no valor de  $T_2$ . Essa queda pode ser explicada pelo fato de ambos  $T_1$  e  $T_2$  representarem as amplitudes da primeira e segunda senoides, respectivamente, da equação (2-1), mas terem ordens de grandeza diferentes, levando o processo de minimização a ter uma maior dificuldade em determinar com precisão o termo de menor valor, que

neste caso seria  $T_2$ .

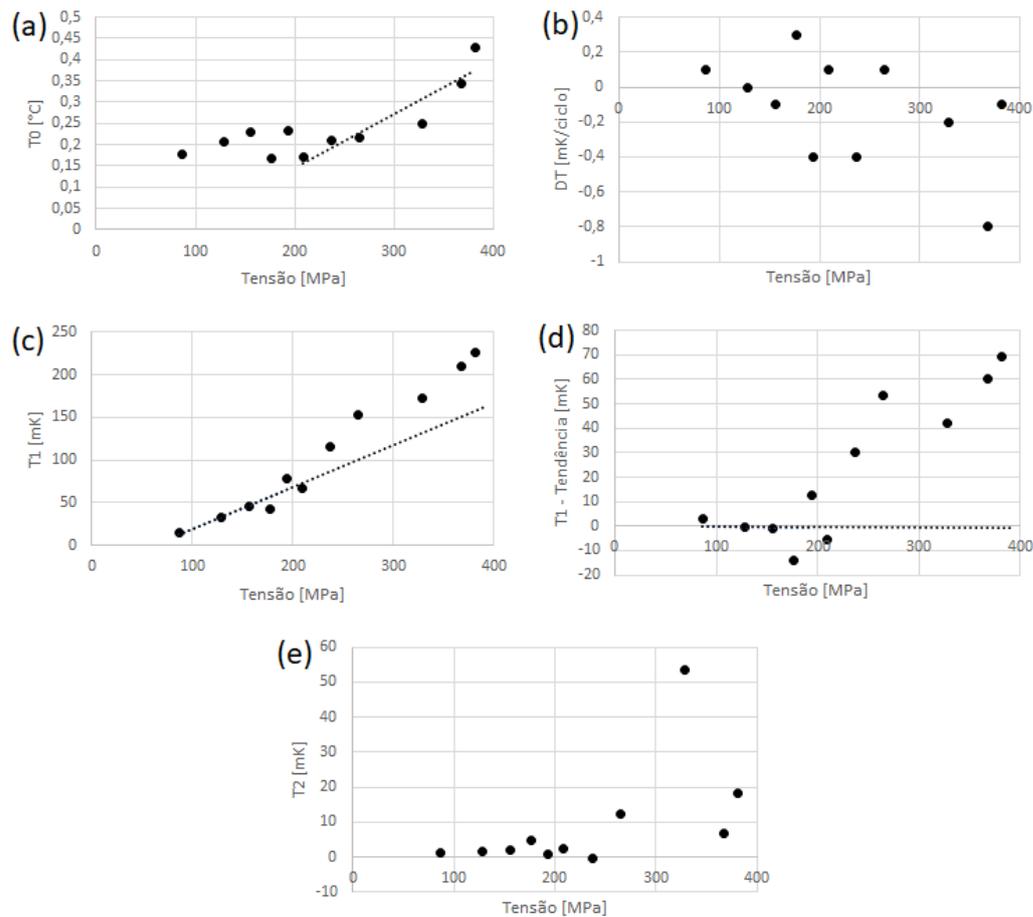


Figura 2.7: Resultado do teste realizado com o segundo corpo de prova de aço. (a) temperatura média  $T_0$  de cada patamar de tensão, (b) variação linear de temperatura  $D_T$ , (c) amplitude do primeiro componente de Fourier  $T_1$ , (d) diferença entre  $T_1$  e o ajuste linear, (e) amplitude do segundo componente de Fourier  $T_2$ .

Mais uma vez, foi calculado o valor do ganho  $K$ , com valores obtidos a partir da literatura e com os calculados para cada patamar de tensão, utilizando as equações (2-4) e (2-5). A tabela 2.6 mostra os valores obtidos para cada patamar de tensão, utilizando  $\alpha = 11 \cdot 10^{-6} m/m/K$ ,  $\rho = 7850 kg/m^3$ ,  $c = 0.49 kJ/(kg \cdot K)$  e  $T = 298 K$  para os cálculos.

Os valores iniciais de  $K_{exp}$  na tabela 2.6 estão relativamente baixos, quando comparados à  $K_{lit}$ . Assim como os resultados obtidos para o primeiro corpo de prova de aço, a diferença entre os valores iniciais de  $K_{exp}$  e  $K_{lit}$  deve-se a uma dificuldade do programa de minimização de determinar a amplitude  $T_1$  com maior precisão devido à flutuações dos valores máximos atingidos pelas senóides.

<b>Patamar</b>	$K_{lit}[10^{-12}Pa^{-1}]$	$K_{exp}[10^{-12}Pa^{-1}]$
1	2.86	0.73
2	2.86	1.13
3	2.86	1.37
4	2.86	1.16
5	2.86	1.98
6	2.86	1.63
7	2.86	2.59
8	2.86	3.18
9	2.86	3.18
10	2.86	3.63
11	2.86	3.82

Tabela 2.6: Ganhos  $K_{lit}$  e  $K_{exp}$  para cada patamar de tensão do teste realizado com o segundo corpo de prova de aço.

Apesar disto, a tabela 2.6 mostra uma clara alteração nos valores de  $K_{exp}$  entre os patamares 6 e 7, reforçando a mudança de comportamento de  $T_1$  que ocorre neste mesmo trecho, evidente nas figuras 2.7c e 2.7d. O apêndice B deste projeto contém a representação gráfica dos resultados obtidos para cada tensão aplicada.

O corpo de prova foi feito de aço API 5L grau B, vindo de um duto usado em um experimento de resistência a fadiga na presença de mochas. Este corpo de prova foi ensaiado com uma razão entre as tensões mínima e máxima de  $R = 0$ . Para esta razão  $R$ , a referência [6] indica um valor do limite de fadiga do material em torno de  $195 MPa$ , determinado a partir da observação de uma curva  $\Delta T_i$  vs.  $\Delta \sigma_i$  para várias etapas de aumento de carga. Sendo assim, o resultado de  $210 MPa$ , obtido a partir dos testes, é aceitável.

O tempo de teste com o segundo corpo de prova de aço, considerando o intervalo de carregamento com cada patamar de tensão e tempo necessário para recalibrar a câmera térmica entre cada carregamento, foi cerca de cinco horas. O processo de minimização requer, aproximadamente, três minutos por patamar de tensão para adequar a equação (2-1) aos dados do teste. A montagem do corpo de prova na máquina de teste e a preparação da câmera levaram em torno de vinte minutos. Deste modo, o tempo total do experimento com o segundo corpo de prova de aço e do processamento e análise de dados foi em torno de seis horas<sup>10</sup>.

<sup>10</sup>Durante o teste com o segundo corpo de prova de aço houve iniciação de trinca.

### 2.2.3

#### Teste com o terceiro corpo de prova de aço - Fase 2 do comportamento térmico

O experimento com o terceiro corpo de aço, figura 2.8, foi realizado na mesma máquina de teste Instron 8501. Para este experimento, a temperatura superficial do corpo foi medida em dois instantes, nas fases 1 e 2 do comportamento térmico. Primeiramente serão apresentados os resultados obtidos da fase 2, onde a temperatura se estabiliza em torno de um valor médio. A aquisição de dados foi feita em nove patamares de tensão. Para cada patamar foi medida a diferença de temperatura entre a área crítica do corpo de prova, onde ocorriam as maiores tensões, e uma referência, feita do mesmo material que o corpo de prova e posicionada próxima à este, durante um intervalo de aproximadamente um minuto, a partir do momento que aparentava ter-se iniciado a fase 2 do comportamento térmico. O teste foi realizado com frequências de teste da ordem de  $2Hz$  e de aquisição de dados de  $50Hz$ .

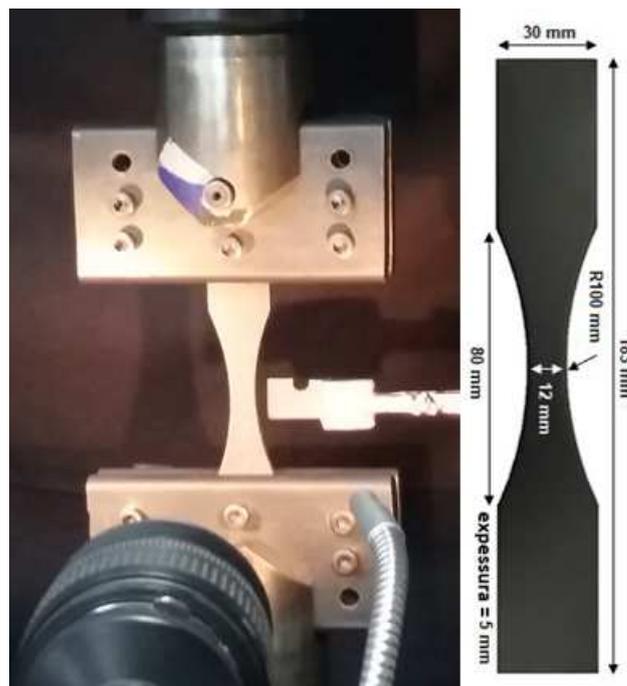


Figura 2.8: Terceiro corpo de prova de aço.

As tensões apresentadas na tabela 2.8 são tensões totalmente alternadas equivalentes  $\sigma_{aeq}$ , calculadas utilizando Goodman<sup>11</sup> a partir de valores médios e alternados predeterminados, tabela 2.7. O teste foi realizado com uma razão

<sup>11</sup>Relaciona a tensão média e alternada através de um diagrama de vida constante.  
 $\sigma_a(\sigma_m \neq 0) = \sigma_a(\sigma_m = 0) \cdot (1 - \sigma_m/\sigma_u)$

entre as tensões mínima e máxima de  $R = 0.1$ . Os dados adquiridos<sup>12</sup> foram processados utilizando um método de minimização<sup>13</sup> de modo a encontrar os termos da equação (2-1) que melhor se adequassem aos valores experimentais, esse processo é descrito com mais detalhes no apêndice A. A tabela 2.8 contém os valores dos termos  $T_0$ ,  $D_T$ ,  $T_1$  e  $T_2$ , para cada patamar, obtidos a partir desse processamento.

<b>Patamar</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\sigma_a$ [MPa]	60	80	100	120	140	160	170	180	190	200
$\sigma_m$ [MPa]	73	98	122	146	171	195	207	220	232	244

Tabela 2.7: Tensões médias e alternadas aplicadas em cada patamar do teste com o terceiro corpo de prova de aço.

<b>Patamar</b>	$\sigma_{aeq}$ [MPa]	$T_0$ [°C]	$D_T$ [mK/ciclo]	$T_1$ [mK]	$T_2$ [mK]
1	72.8	0.22	0	40	0.1
2	105	0.23	0	41	0.3
3	142	0.22	0.1	43.6	1.1
4	185	0.29	-0.3	53.3	5.3
5	239	0.38	-0.3	53	4.4
6	302	0.44	-0.3	67	4.7
7	340	0.46	-0.2	67	7.8
8	384	0.48	-0.1	82	3.3
9	432	0.50	-0.3	91.2	2.8

Tabela 2.8: Resultado do teste realizado com o terceiro corpo de prova de aço, durante a fase 2 do comportamento térmico, contendo os valores  $T_0$ ,  $D_T$ ,  $T_1$  e  $T_2$  obtidos para cada patamar de tensão.

A figura 2.9 contém cinco gráficos, construídos a partir dos dados da tabela 2.8. A figura 2.9a representa a evolução dos valores de  $T_0$  ao longo dos patamares de tensão. Pode-se ver que os valores obtidos de  $T_0$  para as primeiras tensões aplicadas se mantêm praticamente constantes, em torno de 0.22 °C acima da temperatura de referência, havendo uma variação muito pequena

<sup>12</sup>Sinal térmico do corpo de prova, adquirido durante um intervalo de um minuto para cada um dos nove patamares de tensão aplicados.

<sup>13</sup>Foram utilizados os métodos Nelder-Mead e SLSQP para minimizar a função de custo J (2-2).

entre eles, enquanto que, para tensões mais altas, observa-se um crescimento quase linear seguindo o aumento da tensão. Segundo Krapez[1], esta mudança de comportamento marca a separação entre as tensões abaixo e acima do limite de fadiga do material aplicadas durante o experimento. A partir da figura 2.9a, vemos que esta mudança de comportamento acontece próxima à uma tensão de  $160 \text{ MPa}$ .

Os dados utilizados para esta análise foram adquiridos durante a fase 2 do comportamento térmico do material, onde a temperatura média do corpo se mantém estável. O termo  $D_T$ , que representa a variação linear da temperatura na equação (2-1), não fornece muita informação no que se refere à determinar o limite de fadiga do material, mas pode ser utilizado para confirmar a estabilidade da fase 2. Na figura 2.9b vemos que a maioria dos valores obtidos para  $D_T$  estão bem próximos de zero, variando entre  $-0.3 \text{ mK/ciclo}$  e  $0.1 \text{ mK/ciclo}$ .

O termo  $T_1$ , que representa a amplitude do primeiro componente de Fourier na equação (2-1), varia de  $40 \text{ mK}$ , no primeiro patamar, até ultrapassar  $90 \text{ mK}$ , para a maior tensão usada no ensaio. Assim como  $T_0$ , é esperado que  $T_1$  sofra uma mudança de comportamento ao longo do teste. Mas, ao invés de assumir valores constantes para as primeiras tensões aplicadas, irá apresentar um crescimento linear, devido ao fenômeno termoelástico, até um determinado valor de tensão, a partir do qual, esse crescimento se torna mais acelerado.

A figura 2.9c mostra a evolução do valor de  $T_1$  ao longo dos patamares de tensão, enquanto na figura 2.9d é possível observar a diferença entre os valores de  $T_1$  e a linha de tendência traçada a partir dos pontos iniciais, que apresentam um comportamento mais linear, tornando mais evidente a mudança de comportamento. Do gráfico podemos retirar que esta mudança ocorre em torno de  $162 \text{ MPa}$ , o que condiz com o que foi observado para  $T_0$ .

O termo  $T_2$ , que representa a amplitude do segundo componente de Fourier na equação (2-1), apresenta um comportamento semelhante ao que foi observado para  $T_0$ , mantendo-se constante durante os primeiros patamares de tensão, e então sofrendo um crescimento. Na figura 2.9e vemos que  $T_2$  assume valores próximos de zero durante os primeiros patamares de tensão, apresentando um claro crescimento após o terceiro ponto. Para as últimas tensões utilizadas neste teste, parece que houve uma queda no valor de  $T_2$ . Essa queda pode ser explicada pelo fato de ambos  $T_1$  e  $T_2$  representarem as amplitudes da primeira e segunda senoides, respectivamente, da equação (2-1), mas terem ordens de grandeza diferentes, levando o processo de minimização a ter uma maior dificuldade em determinar com precisão o termo de menor valor, que neste caso seria  $T_2$ .

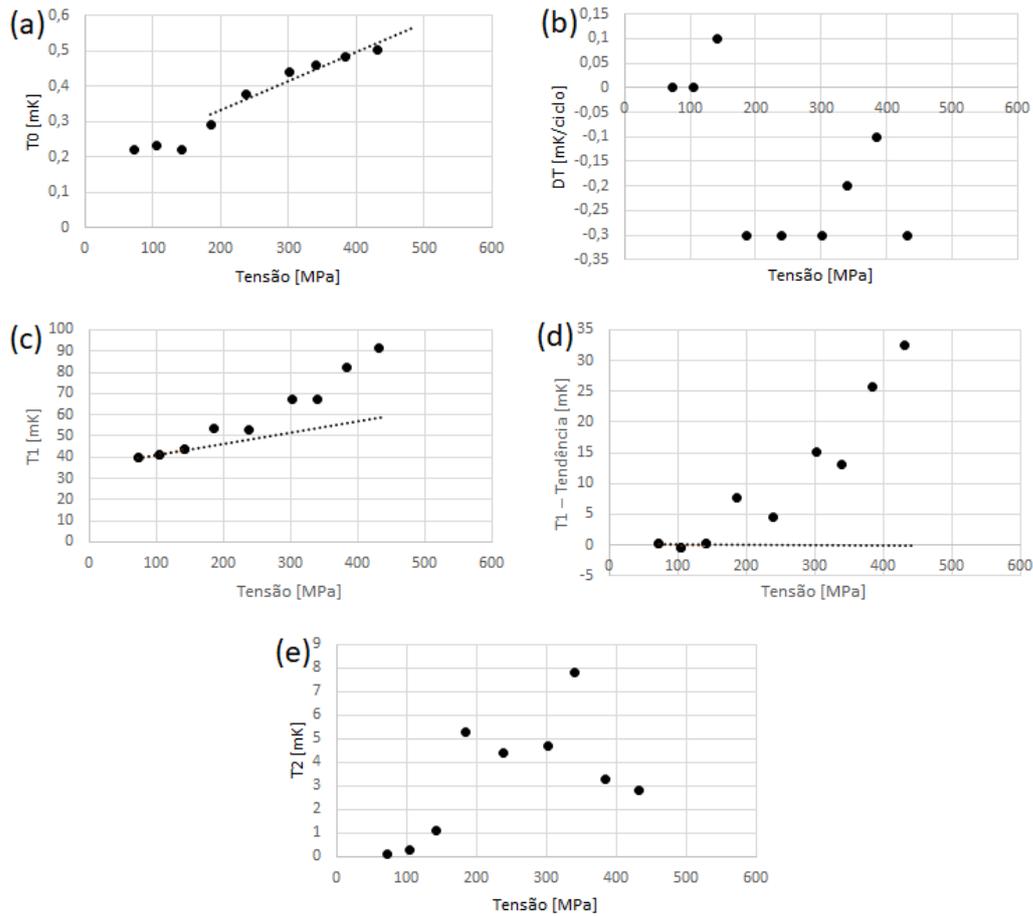


Figura 2.9: Resultado do teste realizado com o terceiro corpo de prova de aço, durante a segunda fase do carregamento térmico. (a) temperatura média  $T_0$  de cada patamar de tensão, (b) variação linear de temperatura  $D_T$ , (c) amplitude do primeiro componente de Fourier  $T_1$ , (d) diferença entre  $T_1$  e o ajuste linear, (e) amplitude do segundo componente de Fourier  $T_2$ .

Mais uma vez, foi calculado o valor do ganho  $K$ , com valores obtidos a partir da literatura e com os calculados para cada patamar de tensão, utilizando as equações (2-4) e (2-5). A tabela 2.9 mostra os valores obtidos para cada patamar de tensão, utilizando  $\alpha = 11 \cdot 10^{-6} m/m/K$ ,  $\rho = 7850 kg/m^3$ ,  $c = 0.49 kJ/(kg \cdot K)$  e  $T = 298 K$  para os cálculos.

Os valores de  $K_{exp}$  para este experimento estão relativamente baixos, quando comparados à  $K_{lit}$ . Observando os resultados obtidos para cada patamar de tensão, a partir do resultado obtido sobreposto ao sinal da câmera no apêndice B, vemos que o programa de minimização convergiu a amplitude  $T_1$  para valores mais conservativos. Este desvio no valor final de  $T_1$  deve-se a flutuações do sinal de temperatura, captada pela câmera térmica, para valores de pico da senoide causada pelo carregamento cíclico. Como esta pequena

<b>Patamar</b>	$K_{lit}[10^{-12}Pa^{-1}]$	$K_{exp}[10^{-12}Pa^{-1}]$
1	2.86	2.24
2	2.86	1.72
3	2.86	1.46
4	2.86	1.49
5	2.86	1.27
6	2.86	1.41
7	2.86	1.32
8	2.86	1.53
9	2.86	1.61

Tabela 2.9: Ganhos  $K_{lit}$  e  $K_{exp}$  para cada patamar de tensão do teste realizado com o terceiro corpo de prova de aço, durante a segunda fase do comportamento térmico.

imprecisão se mantém ao longo das tensões aplicadas, o comportamento de  $T_1$  visto ao longo dos patamares não é gravemente afetado.

O corpo de prova foi feito de aço API 5L grau B, vindo de um duto usado em um experimento de resistência a fadiga na presença de moissas. Este corpo de prova foi ensaiado com uma razão entre as tensões mínima e máxima de  $R = 0.1$ . Para esta razão  $R$ , a referência [6] indica um valor do limite de fadiga do material em torno de  $170 MPa$ , determinado a partir da observação de uma curva  $\Delta T_i$  vs.  $\Delta \sigma_i$  para várias etapas de aumento de carga. Sendo assim, o resultado de  $160 MPa$ , obtido a partir dos testes, é aceitável.

O tempo de teste com o terceiro corpo de prova de aço, considerando o intervalo de carregamento com cada patamar de tensão e tempo necessário para recalibrar a câmara térmica entre cada carregamento, foi cerca de sete horas. O processo de minimização requer, aproximadamente, três minutos por patamar de tensão para adequar a equação (2-1) aos dados do teste. A montagem do corpo de prova na máquina de teste e a preparação da câmara levaram em torno de vinte minutos. Deste modo, o tempo total do experimento com o segundo corpo de prova de aço e do processamento e análise de dados foi pouco mais de oito horas<sup>14</sup>.

<sup>14</sup>O teste com o terceiro corpo de prova de aço terminou com a ruptura deste durante o décimo patamar de tensão aplicado.

#### 2.2.4

#### Teste com o terceiro corpo de prova de aço - Fase 1 do comportamento térmico

O experimento com o terceiro corpo de aço foi realizado na mesma máquina de teste Instron 8501. Para este experimento, a temperatura superficial do corpo foi medida em dois instantes, nas fases 1 e 2 do comportamento térmico. Agora serão apresentados os resultados obtidos da fase 1, durante o aumento inicial de temperatura. A aquisição de dados foi feita em dez patamares de tensão. Para cada patamar foi medida a diferença de temperatura entre a área crítica do corpo de prova, onde ocorriam as maiores tensões, e uma referência, feita do mesmo material que o corpo de prova e posicionada próxima à este, durante um intervalo de aproximadamente um minuto, a partir do início do carregamento. O teste foi realizado com frequências de teste da ordem de  $2Hz$  e de aquisição de dados de  $50Hz$ .

As tensões apresentadas na tabela 2.10 são tensões totalmente alternadas equivalentes  $\sigma_{aeq}$ , calculadas utilizando Goodman<sup>15</sup> a partir de valores médios e alternados predeterminados, tabela 2.7. O teste foi realizado com uma razão entre as tensões mínima e máxima de  $R = 0.1$ . Os dados aquisitados<sup>16</sup> foram processados utilizando um método de minimização<sup>17</sup> de modo a encontrar os termos da equação (2-1) que melhor se adequassem aos valores experimentais, esse processo é descrito com mais detalhes no apêndice A. A tabela 2.10 contém os valores dos termos  $T_0$ ,  $D_T$ ,  $T_1$  e  $T_2$ , para cada patamar, obtidos a partir desse processamento.

A figura 2.10 contém cinco gráficos, construídos a partir dos dados da tabela 2.10. A figura 2.10a representa a evolução dos valores de  $T_0$  ao longo dos patamares de tensão. Como os dados sendo analisados neste momento vieram da primeira fase do comportamento térmico, o termo  $T_0$  representa a temperatura superficial do corpo de prova no início de cada carregamento. Pode-se ver que os valores obtidos de  $T_0$  para as primeiras tensões aplicadas se mantêm praticamente constantes, em torno de  $0.22\text{ }^\circ C$  acima da temperatura de referência, havendo uma variação muito pequena entre eles, enquanto que, para tensões mais altas, observa-se um crescimento quase linear seguindo o aumento da tensão aplicada. A partir da figura 2.10a, vemos que esta mudança de comportamento acontece próxima à uma tenção de  $160\text{ MPa}$ .

<sup>15</sup>Relaciona a tensão média e alternada através de um diagrama de vida constante.  
 $\sigma_a(\sigma_m \neq 0) = \sigma_a(\sigma_m = 0) \cdot (1 - \sigma_m/\sigma_u)$

<sup>16</sup>Sinal térmico do corpo de prova, aquisitado durante um intervalo de um minuto para cada um dos dez patamares de tensão aplicados.

<sup>17</sup>Foram utilizados os métodos Nelder-Mead e SLSQP para minimizar a função de custo J (2-2).

<b>Patamar</b>	$\sigma_{aeq}$ [MPa]	$T_0$ [°C]	$D_T$ [mK/ciclo]	$T_1$ [mK]	$T_2$ [mK]
1	72.8	0.23	-0.3	25	0
2	105	0.24	0.1	34.7	0.8
3	142	0.24	0.1	29.5	6.8
4	185	0.29	-0.2	49.2	1.8
5	239	0.33	0	59	1.1
6	302	0.36	0.5	61.4	6.4
7	340	0.39	0	70	4.7
8	384	0.41	-0.1	73	7.1
9	432	0.59	-0.3	89.7	0.4
10	487	0.58	0.3	89.5	20.5

Tabela 2.10: Resultado do teste realizado com o terceiro corpo de prova de aço, durante a fase 1 do comportamento térmico, contendo os valores  $T_0$ ,  $D_T$ ,  $T_1$  e  $T_2$  obtidos para cada patamar de tensão.

Os dados utilizados para esta análise foram adquiridos durante a fase 1 do comportamento térmico do material, onde ocorre um crescimento inicial da temperatura do corpo de prova. O termo  $D_T$ , que representa a variação linear da temperatura na equação (2-1), deveria assumir valores próximos de zero, para as primeiras tensões aplicadas, e então apresentar um crescimento, como observado para  $T_0$ . No entanto, como os valores esperados são relativamente baixos, quando comparados com a temperatura  $T_0$  ou a amplitude  $T_1$ , da ordem de 5 a 10 mK, e a aquisição de dados foi realizada durante um intervalo curto no início do carregamento, o programa de minimização teve certa dificuldade de obtê-los.

O termo  $T_1$ , que representa a amplitude do primeiro componente de Fourier na equação (2-1), varia de 25 mK, no primeiro patamar, até, aproximadamente, 90 mK, para a maior tensão usada no ensaio. Assim como  $T_0$ , é esperado que  $T_1$  sofra uma mudança de comportamento ao longo do teste. Mas, ao invés de assumir valores constantes para as primeiras tensões aplicadas, irá apresentar um crescimento linear, devido ao fenômeno termoelástico, até um determinado valor de tensão, a partir do qual, esse crescimento se torna mais acelerado.

A figura 2.10c mostra a evolução do valor de  $T_1$  ao longo dos patamares de tensão, enquanto na figura 2.9d é possível observar a diferença entre os valores de  $T_1$  e a linha de tendência traçada a partir dos pontos iniciais, que

apresentam um comportamento mais linear, tornando mais evidente a mudança de comportamento. Do gráfico podemos retirar que esta mudança ocorre em torno de  $165 \text{ MPa}$ , o que condiz com o que foi observado para  $T_0$ .

O termo  $T_2$ , que representa a amplitude do segundo componente de Fourier na equação (2-1), deveria apresentar um comportamento semelhante ao que foi observado para  $T_0$ , mantendo-se constante durante os primeiros patamares de tensão, e então iniciar um crescimento. No entanto, como podemos observar na figura 2.10e, os valores obtidos não seguem um comportamento aparente. Podemos ver que o termo  $T_2$  assume valores em torno de  $5 \text{ mK}$  e isso pode ter reduzido a precisão com que este foi determinado pelo programa de minimização.

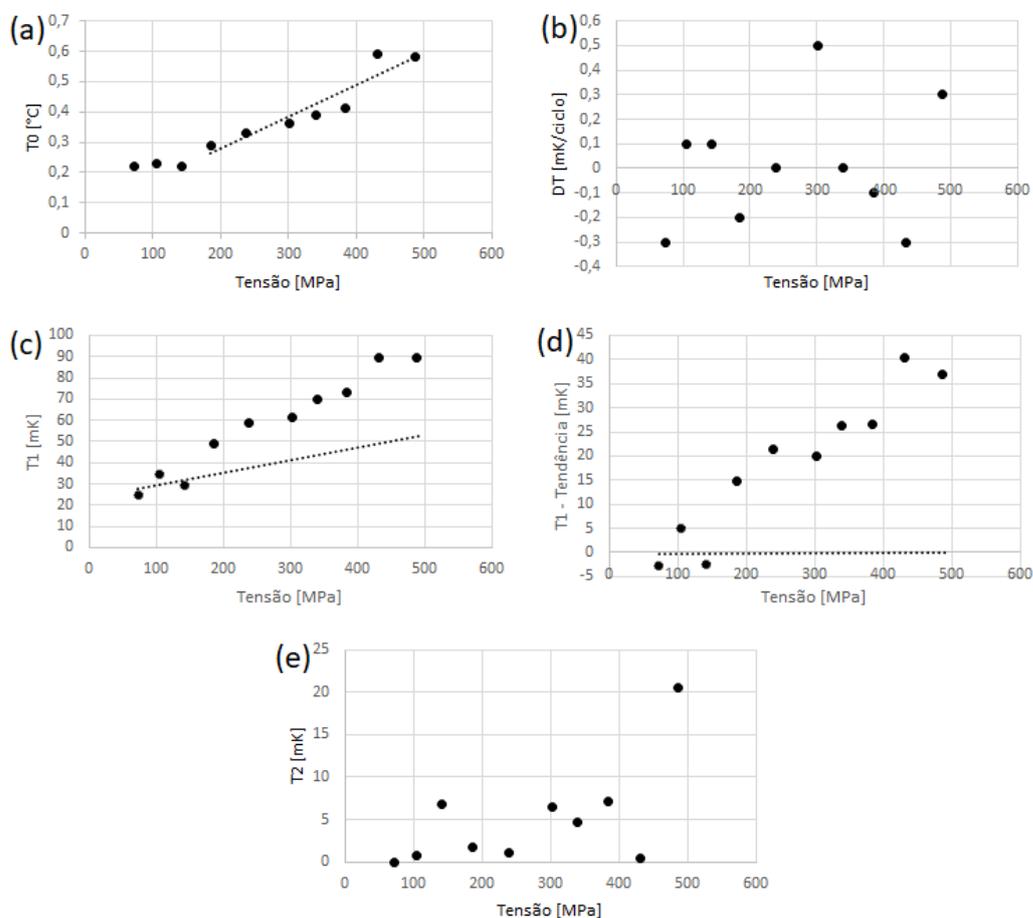


Figura 2.10: Resultado do teste realizado com o terceiro corpo de prova de aço, durante a primeira fase do carregamento térmico. (a) temperatura média  $T_0$  de cada patamar de tensão, (b) variação linear de temperatura  $D_T$ , (c) amplitude do primeiro componente de Fourier  $T_1$ , (d) diferença entre  $T_1$  e o ajuste linear, (e) amplitude do segundo componente de Fourier  $T_2$ .

O corpo de prova foi feito de aço API 5L grau B, vindo de um duto usado

em um experimento de resistência a fadiga na presença de mochas. Este corpo de prova foi ensaiado com uma razão entre as tensões mínima e máxima de  $R = 0.1$ . Para esta razão  $R$ , a referência [6] indica um valor do limite de fadiga do material em torno de  $170 \text{ MPa}$ , determinado a partir da observação de uma curva  $\Delta T_i$  vs.  $\Delta \sigma_i$  para várias etapas de aumento de carga. Sendo assim, o resultado de  $165 \text{ MPa}$ , obtido a partir dos testes, é aceitável.

O tempo de teste com o terceiro corpo de prova de aço, considerando o intervalo de carregamento com cada patamar de tensão e tempo necessário para recalibrar a câmara térmica entre cada carregamento, foi cerca de sete horas. O processo de minimização requer, aproximadamente, três minutos por patamar de tensão para adequar a equação (2-1) aos dados do teste. A montagem do corpo de prova na máquina de teste e a preparação da câmara levaram em torno de vinte minutos. Deste modo, o tempo total do experimento com o segundo corpo de prova de aço e do processamento e análise de dados foi pouco mais de oito horas<sup>18</sup>.

### 2.2.5

#### Teste com corpo de prova de policarbonato

O experimento com o corpo de prova de policarbonato foi realizado em uma máquina de teste de tração construída no laboratório, figura 2.2b[3]. Foi feita a aquisição de dados em seis patamares de tensão. Para cada patamar foi aquiritada a diferença de temperatura entre o corpo de prova e uma referência de mesmo material, durante um intervalo de aproximadamente um minuto, a partir do momento que aparentava ter-se iniciado a fase 2 do comportamento térmico. O teste foi realizado com frequências de teste da ordem de  $0.5 \text{ Hz}$  e de aquisição de dados de  $50 \text{ Hz}$ . Esses valores foram escolhidos de modo a obter um maior número de pontos das senoides, o que permitiu ao programa utilizado para adequar a equação de temperatura aos dados obtidos convergir para resultados mais precisos, apesar do ruído captado durante o teste.

A máquina em questão só permitia o controle da pressão do ar de entrada no musculo pneumático, o que tornou o processo de escolha das tensões aplicadas um pouco mais complicado. Foram aplicados seis níveis de pressão, cada uma na forma de um sinal senoidal, e as forças média e alternada foram medidas utilizando uma célula de carga, modelo CSR da empresa MK Controle e Instrumentação LTDA[7]. O teste foi realizado com uma razão entre as tensões mínima e máxima de  $R = 0$ , o que fez com que o carregamento alternado  $P_a$  fosse igual ao carregamento médio  $P_m$ . Como as dimensões do

---

<sup>18</sup>O teste com o terceiro corpo de prova de aço terminou com a ruptura deste durante o décimo patamar de tensão aplicado.

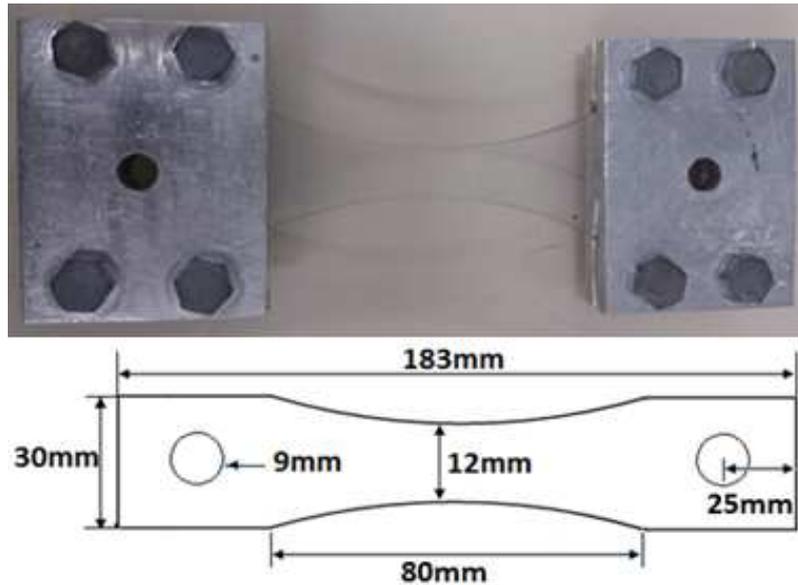


Figura 2.11: Corpo de prova de policarbonato usado para o teste.

corpo de prova eram conhecidas, foram calculadas as tensões média e alternada, tabela 2.11, e então utilizado Goodman<sup>19</sup> para encontrar as tensões totalmente alternadas equivalentes  $\sigma_{aeq}$ , apresentadas na tabela 2.12.

Patamar	1	2	3	4	5	6
$\sigma_a$ [MPa]	5.4	8.6	10.8	15.3	17.5	22.2
$\sigma_m$ [MPa]	5.4	8.6	10.8	15.3	17.5	22.2

Tabela 2.11: Tensões médias e alternadas aplicadas em cada patamar do teste com o corpo de prova de policarbonato.

Os dados aquisitados<sup>20</sup> foram processados utilizando um método de minimização<sup>21</sup> de modo a encontrar os valores que melhor se adequassem aos valores experimentais, conforme descrito no apêndice A. A tabela 2.12 contém os valores dos termos  $T_0$ ,  $D_T$ ,  $T_1$  e  $T_2$  obtidos a partir desde processamento, para cada patamar de tensão.

A figura 2.12 contém cinco gráficos, construídos a partir dos dados da tabela 2.12. A figura 2.12a representa a evolução dos valores de  $T_0$  ao longo dos patamares de tensão. Pode-se ver que os valores obtidos de  $T_0$  para os

<sup>19</sup>Relaciona a tensão média e alternada através de um diagrama de vida constante.  $\sigma_a(\sigma_m \neq 0) = \sigma_a(\sigma_m = 0) \cdot (1 - \sigma_m/\sigma_u)$

<sup>20</sup>Sinal térmico do corpo de prova, aquisitado durante um intervalo de um minuto para cada um dos seis patamares de tensão aplicados.

<sup>21</sup>Foram utilizados os métodos Nelder-Mead e SLSQP para minimizar a função de custo J (2-2).

<b>Patamar</b>	$\sigma_{aeq}$ [MPa]	$T_0$ [°C]	$D_T$ [mK/ciclo]	$T_1$ [mK]	$T_2$ [mK]
1	5.95	0.31	3	73.7	13.1
2	10.1	0.33	2	99.3	5.8
3	13.2	0.36	0.3	133	31.8
4	20.5	0.37	3	182	42.8
5	24.8	0.54	1.6	210	50.2
6	35.3	0.72	4.7	255	55.5

Tabela 2.12: Resultado do teste realizado com o corpo de prova de policarbonato, contendo os valores  $T_0$ ,  $D_T$ ,  $T_1$  e  $T_2$  obtidos para cada patamar de tensão.

primeiros patamares se mantêm praticamente constantes, em torno de  $0.3\text{ }^\circ\text{C}$  acima da temperatura de referência, havendo uma variação muito pequena entre eles, enquanto que, para tensões mais altas, observa-se um crescimento quase linear seguindo o aumento da tensão. Segundo Krapez[1], esta mudança de comportamento marca a separação entre as tensões abaixo e acima do limite de fadiga do material aplicadas durante o experimento. A partir da figura 2.12a, vemos que esta mudança de comportamento acontece próxima à uma tensão de  $12\text{ MPa}$ .

Os testes realizados com o corpo de prova de policarbonato apresentaram valores de  $D_T$  consideravelmente mais altos em relação aos obtidos com os corpos de aço, da ordem de  $2\text{ mK/ciclo}$ , como pode ser observado na figura 2.12b. A partir disto, vemos que para os aços a fase 2 do comportamento térmico pode, realmente, ser considerada estável, mas que para materiais como o policarbonato, uma pequena taxa de variação ainda pode ser observada.

O termo  $T_1$ , que representa a amplitude do primeiro componente de Fourier na equação (2-1), varia de  $73\text{ mK}$ , no primeiro patamar, até ultrapassar  $250\text{ mK}$ , para a maior tensão usada no ensaio. Assim como  $T_0$ , é esperado que  $T_1$  sofra uma mudança de comportamento ao longo do teste. Mas, ao invés de assumir valores constantes para os primeiros patamares de tensão, irá apresentar um crescimento linear, devido ao fenômeno termoelástico, até um determinado valor de tensão, a partir do qual, esse crescimento se torna mais acelerado.

A figura 2.12c mostra a evolução do valor de  $T_1$  ao longo dos patamares de tensão, enquanto na figura 2.12d é possível observar a diferença entre os valores de  $T_1$  e a linha de tendência traçada a partir dos pontos iniciais, que apresentam um comportamento mais linear, tornando mais evidente a mudança

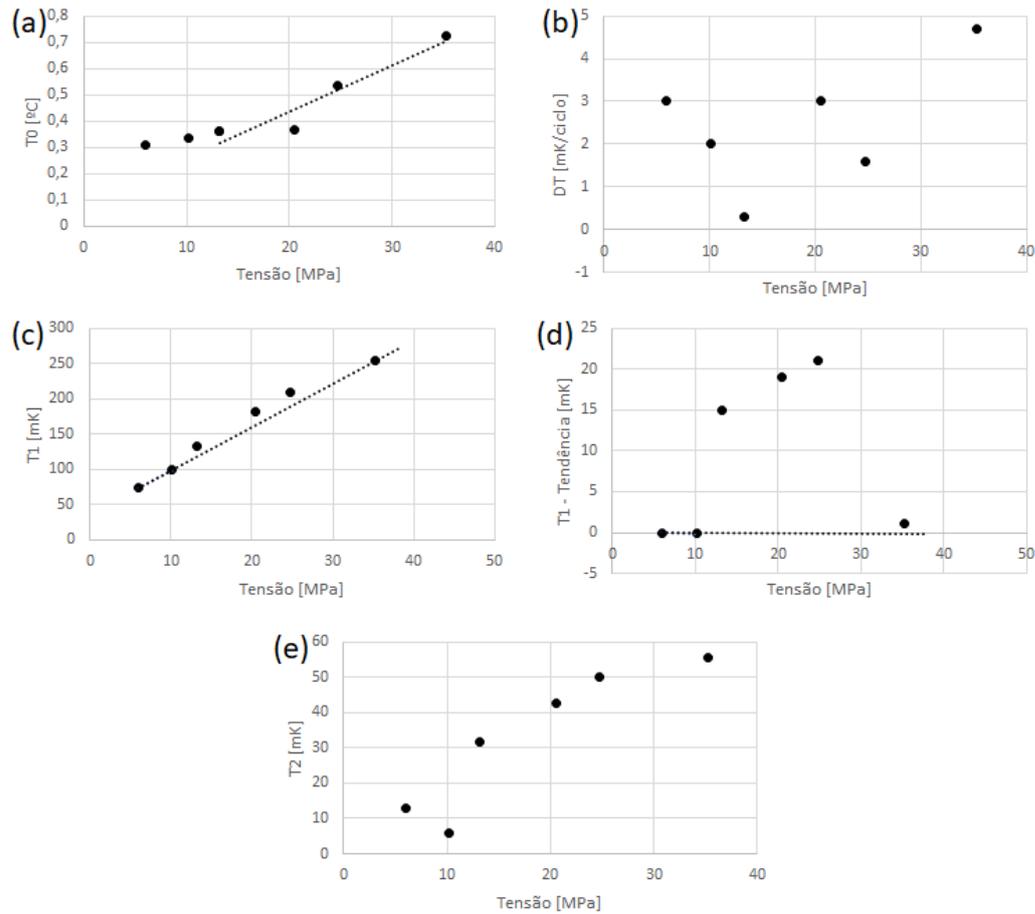


Figura 2.12: Resultado do teste realizado com o corpo de prova de policarbonato. (a) temperatura média  $T_0$  de cada patamar de tensão, (b) variação linear de temperatura  $D_T$ , (c) amplitude do primeiro componente de Fourier  $T_1$ , (d) diferença entre  $T_1$  e o ajuste linear, (e) amplitude do primeiro componente de Fourier  $T_2$ .

de comportamento. Do gráfico podemos retirar que esta mudança ocorre em torno de 12 *MPa*, o que condiz com o que foi observado para  $T_0$ . Enquanto os testes realizados com os corpos de prova de aço apresentaram uma clara separação, dos valores obtidos para as tensões mais altas, da curva de tendência definida a partir das tensões menores, para o teste com o corpo de prova de policarbonato esta separação foi bem mais sutil.

O termo  $T_2$ , que representa a amplitude do segundo componente de Fourier na equação (2-1), apresenta um comportamento semelhante ao que foi observado para  $T_0$ , mantendo-se constante durante os primeiros patamares de tensão, e então sofrendo um crescimento. Na figura 2.12e vemos que  $T_2$  assume valores próximos de 10 *mK* durante os dois primeiros patamares de tensão, e então começa a sofrer incrementos conforme o avanço dos patamares de tensão.

Assim como foi observado para  $T_0$  e  $T_1$ , a mudança de comportamento sofrida por  $T_2$  acontece em torno de 12 MPa.

O ganho  $K$  foi calculado utilizando as equações (2-4) e (2-5). A tabela 2.13 mostra os valores obtidos para cada patamar de tensão, utilizando  $\alpha = 70 \cdot 10^{-6} \text{ m/m/K}$ ,  $\rho = 1,2 \text{ g/cm}^3$ ,  $c = 1,2 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$  e  $T = 298 \text{ K}$ .

Patamar	$K_{lit}[10^{-11}Pa^{-1}]$	$K_{exp}[10^{-11}Pa^{-1}]$
1	4.86	4.58
2	4.86	3.83
3	4.86	4.14
4	4.86	4.00
5	4.86	4.03
6	4.86	3.85

Tabela 2.13: Ganhos  $K_{lit}$  e  $K_{exp}$  para cada patamar de tensão do teste realizado com o corpo de prova de policarbonato.

Podemos observar que os valores de  $K_{exp}$  estão bem próximos, apesar de não serem iguais, aos de  $K_{lit}$ . A diferença entre eles pode ser atribuída ao processo de adequação da equação (2-1) aos dados experimentais de temperatura, que resultou em uma conversão para valores mais conservativos. Como foi comentado na análise da figura 2.12c, os teste com o corpo de prova de policarbonato apresentaram uma separação mais sutil dos valores de  $T_1$  obtidos para as tensões mais altas, da curva de tendência definida a partir das tensões menores, quando comparado ao que foi observado para os testes realizados com os corpos de prova de aço. O mesmo pode ser observado na tabela 2.13, onde uma mudança de comportamento não é tão aparente como o que pode-se nas tabelas 2.3 e 2.6, referentes aos ensaios anteriores. O apêndice B deste projeto contém a representação gráfica dos resultados obtidos para cada tensão aplicada.

O valor do limite de resistência a fadiga do policarbonato varia entre 9 MPa e 13 MPa[8], segundo a literatura, deste modo, o resultado de 12 MPa obtido a partir do experimento é bem aceitável. O tempo de teste com o corpo de prova de policarbonato, considerando o intervalo de carregamento com cada patamar de tensão e tempo necessário para recalibrar a câmara térmica entre cada carregamento, foi cerca de três horas. O processo de minimização requer, aproximadamente, três minutos por patamar de tensão para adequar a equação (2-1) aos dados do teste. A montagem do corpo de prova na máquina de teste

e a preparação da câmera levaram em torno de vinte minutos. Deste modo, o tempo total do experimento com o corpo de prova de policarbonato e do processamento e análise de dados foi em torno de quatro horas.

### 3

## Conclusão

O objetivo deste projeto era verificar se o método proposto por Krapez poderia ser utilizado para determinar o limite de fadiga de um material e, caso positivo, se este seria uma alternativa viável aos métodos tradicionais.

Quanto à aplicação do método, os quatro experimentos realizados seguindo a metodologia proposta apresentaram resultados condizentes com o que pode ser encontrado na literatura. Os corpos de prova de aço obtiveram valores dentro do esperado para as razões  $R$  aplicadas, determinados a partir da observação do comportamento de, pelo menos, dois dos termos da equação (2-1) ao longo das tensões aplicadas. O estudo do comportamento de múltiplos termos da equação (2-1) permite uma confirmação, dentro do próprio experimento, dos resultados obtidos.

O experimento com o corpo de prova de policarbonato apresentou um resultado claro durante a observação do termo  $T_0$ , corroborada pela análise do comportamento de  $T_1$  que, apesar de não ser tão evidente quanto o que foi visto para os aços, apresenta a mudança de comportamento esperada.

Quanto a ser uma alternativa viável, foi dito no capítulo 1 que os métodos tradicionais, como o "stair-case", necessitam de um grande número de corpos de prova, cada um sendo carregado até que ocorra uma falha ou a vida  $N$  pré-determinada seja alcançada. Deste modo, enquanto esses ensaios podem ser muito demorados e custosos, o método proposto por Krapez, assim como a análise dos dados obtidos a partir deste, foi realizada com um único corpo de prova, por experimento, e em algumas horas, tornando-o não só uma alternativa viável como, dependendo da aplicação, preferível.

Em suma, o método de determinação do limite de fadiga proposto por Krapez é viável e fornece resultados que concordam com o que pode ser visto na literatura. O número de valores de tensão aplicados é importante para a observação da transição entre o comportamento elástico para o elatoplástico, sendo que o uso de oito a dez patamares já permite uma análise precisa.

A duração dos testes deve-se, principalmente, as frequências de carregamento utilizadas, da ordem de  $0.5 \text{ Hz}$  a  $2 \text{ Hz}$ . Em futuras aplicações, o uso de um método de minimização mais eficiente permitiria a realização de ensaios com frequências maiores, reduzindo consideravelmente o tempo necessário para cada carregamento.

## Referências Bibliográficas

- [1] KRAPEZ, J. C.; PACOU, D. Thermography detection of damage initiation during fatigue tests. *SPIE*, 4710:435–449, 2002.
- [2] CASTRO, J. T. P.; MEGGIOLARO, M. A. *FADIGA: Técnicas e Práticas de Dimensionamento Estrutural sob Cargas Reais de Serviço*. Createspace Independent Publishing Platform, 1st edition, 2009.
- [3] ALVA, J. G. C. Controle por aprendizado neuro-fuzzy aplicado a uma máquina de fadiga atuada por um músculo pneumático. Tese de PhD, Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.
- [4] LA ROSA, G.; RISITANO, A. Thermographic methodology for rapid determination of the fatigue limit of materials and mechanical components. *International Journal of Fatigue*, 22:65–73, 2000.
- [5] THOMSON, W. (LORDE KELVIN). On the dynamical theory of heat. *Transaction of the Royal Society of Edinburgh*, 20:261–283, 1853.
- [6] PAIVA, V.E.L.; VIEIRA, R.D.; FREIRE, J.L.F. Fatigue properties assessment of API 5L Gr. B pipeline steel using infrared thermography. *Proceedings of SEM*, 2018.
- [7] VIEIRA, R. B. Thermography applied to the study of fatigue in polycarbonate. Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.
- [8] "TYPICAL PROPERTIES OF POLYCARBONATES (PC)". [https://www.nationwideplastics.net/pdfs/polycarbonate/\(new\)%20polycarbonate%20material%20datasheet.pdf](https://www.nationwideplastics.net/pdfs/polycarbonate/(new)%20polycarbonate%20material%20datasheet.pdf). Acesso em: Dezembro de 2018.

# A

## Processamento de dados

### A.1 Código

O processamento de dados foi feito com um programa escrito em Python, que utiliza a biblioteca `scipy.optimize.minimize`. O programa faz a leitura de um arquivo de texto, contendo os dados adquiridos durante o teste, e o transforma em dois vetores, um contendo os valores da temperatura superficial do corpo e outro com os instantes de tempo de cada medição, sendo que este é criado tendo-se o frame de cada medição e a frequência de aquisição de dados da câmera térmica.

A plotagem dos valores de temperatura experimental pelo tempo nos permite ter uma ideia inicial dos valores de cada termo da equação de temperatura, especialmente a frequência  $f$  e a amplitude do primeiro componente de Fourier  $T_1$ .

Esses dois vetores são passados para a função de minimização, juntamente com um terceiro vetor contendo um chute inicial para cada variável. A partir da observação dos dados é possível escolher valores mais bem direcionados para esse chute inicial, ou, caso não seja possível realizar esta pré-visualização, utiliza-se, simplesmente, a ordem de grandeza esperada de cada variável. Neste caso estavam sendo calculados os valores dos termos  $T_0$ ,  $D_T$ ,  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $f$ ,  $\varphi_1$  e  $\varphi_2$  da equação (2-1).

O programa foi escrito de modo a permitir a utilização de dois métodos de minimização, e facilitar a troca entre eles. Primeiramente, utilizava-se o método Nelder-Mead, que é um processo de busca direta baseada em um método simplex. Este simplex possui conjunto de  $n + 1$  pontos, que podem ser entendidos como seus vértices, assim como os valores correspondentes da função  $J$  para cada ponto. Através de um processo iterativo, o valor da função dos seus vértices vai sendo gradualmente reduzida, até um ponto em que o simplex atinja um tamanho pequeno o suficiente em que a diferença entre esses valores seja menor que tolerância definida, finalizando o processo, como pode ser observado na figura A.1.

Caso o método Nelder-Mead não oferecesse resultados adequados, usualmente por causa de flutuações de temperatura ocorridas devido às alterações das condições de teste, optava-se pelo método Sequential Least Squares Programming (SLSQP).

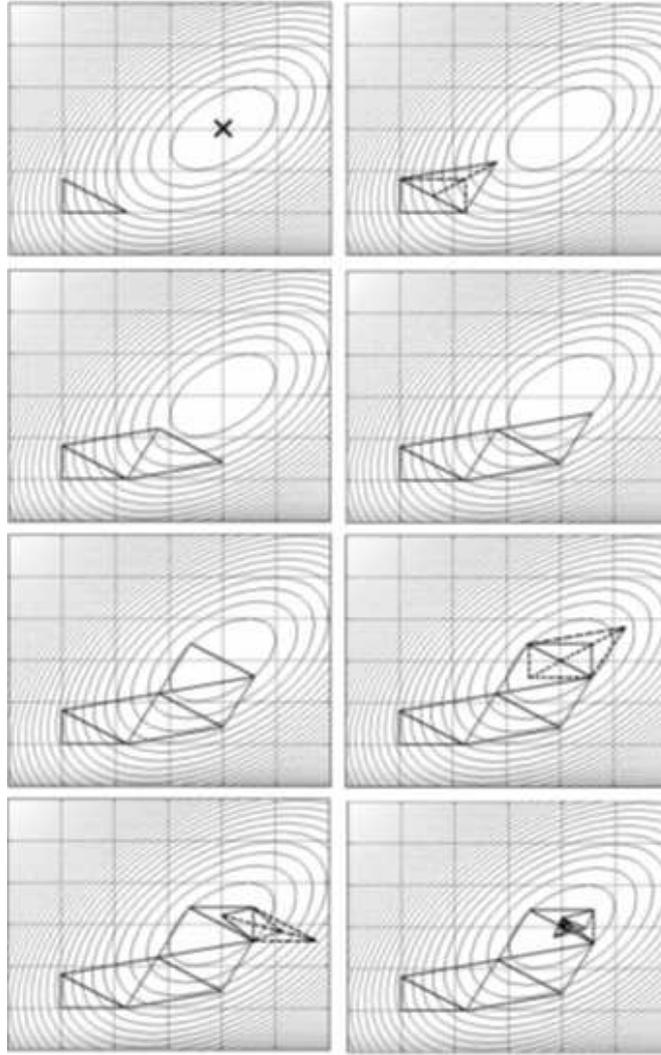


Figura A.1: Processo iterativo de redução de um simplex, através do método Nelder-Mead.

O otimizador SLSQP é um algoritmo sequencial de programação de mínimos quadrados, originalmente implementado por Dieter Kraft, que usa o método de Han-Powell quasi-Newton com uma atualização BFGS da matriz B e uma função de teste L1 no algoritmo de passo-comprimento. O otimizador usa uma versão ligeiramente modificada do solver não linear de mínimos quadrados do NNLS de Lawson e Hanson.

O método SLSQP permite o uso de limites para o valor de cada variável. Portanto, para situações onde ocorre uma certa flutuação da amplitude das senoides ou da frequência de teste, é possível definir um valor mínimo para  $T_1$ , abaixo dos valores reais que deveriam ser encontrados para evitar a convergência para resultados errados, forçando o programa a considerar as senoides no processo e limites inferior e superior para a frequência  $f$ , baseados no que podia ser observado dos dados obtidos.

Ambos os métodos são usados para minimizar a função de custo  $J$ , equação (2-2), baseada em mínimos quadrados. O processo de minimização foi utilizado com uma tolerância de  $10^{-7}$ , de modo a encontrar um resultado com uma boa exatidão, mas sem estender de mais o tempo de processamento.

```

import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.optimize import minimize

f_aquisicao = 50
data = pd.read_csv('pat2.txt', delimiter="\t")
data['tempo'] = data['frame']*(1/f_aquisicao)
plt.plot(data['tempo'], data['dT'])

janela_inicio = 500 #frame
janela_fim = 2000 #frame
tempo_minimiza = data['tempo'][janela_inicio:janela_fim]
    .reset_index(drop = True)
dados_minimiza = data['dT'][janela_inicio:janela_fim]
    .reset_index(drop = True)

def ErroMae(tempo, Texp, x0, T1_min, f_min, f_max):
    def Erro(x0):
        T0 = x0[0]
        DT = x0[1]
        T1 = x0[2]
        T2 = x0[3]
        f = x0[4]
        phi1 = x0[5]
        phi2 = x0[6]
        J = 0
        for i in range(len(tempo)):
            J = J + (Texp[i]-(T0 + DT*f*tempo[i] +
                T1*np.sin(2*np.pi*f*tempo[i]+phi1) +
                T2*np.sin(4*np.pi*f*tempo[i]+phi2)))
                **2
        return J
    #res = minimize(Erro, x0, method='Nelder-Mead',

```

```

        tol=1e-6)
    bnds = ((0, None), (None, None), (T1_min, None),
            (None, None), (f_min, f_max), (None, None),
            (None, None))
    res = minimize(Erro, x0, method='SLSQP', bounds=
                  bnds, tol=1e-7)
    return res

erro_J = float('Inf')
DT_valores = []
T1_valores = []
T2_valores = []
f_valores = []
J_valores = []
Temp_valores = []
for k in range(teste_inicio, teste_fim, passo):
    f_chute = np.random.randint(lim_inf_f, lim_sup_f)
    x0 = [data['dT'].mean(), DT_chute, T1_chute, T2_
          chute, f_chute, varphi1_chute, varphi2_chute]
    val = ErroMae(tempo_minimiza, dados_minimiza, x0,
                  T1_min, f_min, f_max)
    T0 = val.x[0]
    DT = val.x[1]
    T1 = val.x[2]
    T2 = val.x[3]
    f = val.x[4]
    phi1 = val.x[5]
    phi2 = val.x[6]
    J = 0
    Temp_valores = []
    for i in range(len(tempo_minimiza)):
        J = J + (dados_minimiza[i] - (T0 + DT*f*tempo_
            minimiza[i] + T1*np.sin(2*np.pi*f*tempo_
            minimiza[i]+phi1) + T2*np.sin(4*np.pi*f*
            tempo_minimiza[i]+phi2)))**2
    DT_valores.append(DT)
    T1_valores.append(T1)
    T2_valores.append(T2)
    f_valores.append(f)

```

```
J_valores.append(J)
if J < erro_J and abs(T1)>abs(T2):
    chute = k
    erro_J = J
    valores = val.x

print('T0 =',round(valores[0],4))
print('DT =',round(valores[1],4))
print('T1 =',round(valores[2],4))
print('T2 =',round(valores[3],4))
print('f =',round(valores[4],4))
print('phi1 =',round(valores[5],4))
print('phi2 =',round(valores[6],4))
```

## A.2 Aplicação

Durante os testes realizados, a aquisição de dados foi feita por, aproximadamente, um minuto, para cada valor de tensão aplicada. A câmera térmica foi utilizada com uma frequência de aquisição de 50 *Hz*, o que resultou em arquivos contendo em torno de 3000 medições de temperatura para cada patamar de tensão.

Esses valores foram escolhidos de modo a oferecer uma janela de dados confortável para se trabalhar, permitindo posicionar a janela de minimização evitando flutuações de temperatura, ocorridas devido às alterações das condições de teste, e períodos de ruído exagerado. No entanto, o método pode ser aplicado em intervalos bem menores do que os que foram utilizados, permitindo testes mais curtos.

Para a análise feita neste projeto, foi utilizado um intervalo de, preferencialmente, 30 a 50 *ciclos*, pois entendeu-se que uma janela de dados maior permitiria que processo de minimização obtivesse valores mais próximos aos reais, uma vez que a maior quantidade de pontos reduziria a influência daqueles afetados mais drasticamente pelo ruído, no entanto, intervalos menores poderiam ter sido utilizados. Para analisar a influência do número de ciclos usados durante processo de minimização, este foi realizado com um intervalo de dados equivalente a 10 *ciclos*, e, então, repetido para intervalos progressivamente maiores, utilizando o último patamar de tensão do teste realizado com o segundo corpo de prova de aço, e os resultados obtidos foram usados para montar a tabela A.1.

<i>Ciclos</i>	$T_0$ [°C]	$D_T$ [mK/ciclo]	$T_1$ [mK]	$T_2$ [mK]
10	0.358	0.1	242.5	1.6
20	0.421	0	258.2	21.5
30	0.447	-0.5	240.7	15.9
40	0.424	0	264.5	43.1
50	0.431	-0.1	258.1	29.2

Tabela A.1: Resultado do processo de minimização realizado com o último patamar de tensão aplicado no segundo corpo de prova de aço, contendo os valores  $T_0$ ,  $D_T$ ,  $T_1$  e  $T_2$  obtidos para diferentes intervalos.

Na tabela A.1 vemos que valores de  $T_0$ ,  $D_T$ ,  $T_1$  e  $T_2$  sofrem pequenas variações dependendo do número de ciclos usados para o processo de minimização,  $T_0$  e  $T_2$  sendo os mais afetados, porém se mantendo relativamente próximos, permitindo dizer que uma janela de 20 *ciclos* pode fornecer resultados tão precisos quanto uma janela de 50 *ciclos*.

## B Resultados

No capítulo 2, os resultados de cada processo de minimização foram apresentados nas tabelas 2.2, 2.5 e 2.12. Enquanto esses resultados são muito úteis para observar o comportamento térmico dos corpos de prova, ao longo dos patamares de tensão aplicados, os valores em si não permitem determinar a exatidão do processo.

As próximas seções contêm a representação gráfica da equação (2-1), proposta por Krapez, utilizando os valores obtidos a partir do processo de minimização, sobreposta ao sinal térmico captado pela câmera térmica durante os testes realizados, para cada valor de tensão aplicado em cada um dos quatro ensaios realizados.

Pode-se observar que, para os três corpos de prova, os últimos patamares de tensão apresentaram resultados que se adequaram melhor ao sinal térmico. Tensões maiores implicam em amplitudes  $T_1$  mais altas, o que diminui a influência do ruído dos testes. Os primeiros patamares de tensão aplicados resultaram em valores de  $T_1$  relativamente baixos, e isso, somado a sensibilidade de  $30\text{ mK}$  da câmera, levou a pequenas flutuações do sinal térmico que dificultam a convergência do processo de minimização.

### B.1 Teste com o primeiro corpo de prova de aço

A figura B.1 apresenta os resultados do primeiro teste realizado com o primeiro corpo de prova de aço, com uma tensão aplicada de  $95.967\text{ MPa}$ . O intervalo de dados usado para o processo de minimização foi  $10 - 40\text{ s}$ , e o método iterativo usado foi SLSQP. Os resultados obtidos para esse teste foram:  $T_0 = 1.044\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $D_T = 0.6\text{ mK/ciclo}$ ,  $T_1 = 31.7\text{ mK}$ ,  $T_2 = 4.3\text{ mK}$ ,  $f = 0.695\text{ Hz}$ ,  $\varphi_1 = 1.689\text{ rad}$  e  $\varphi_2 = 1.589\text{ rad}$ .

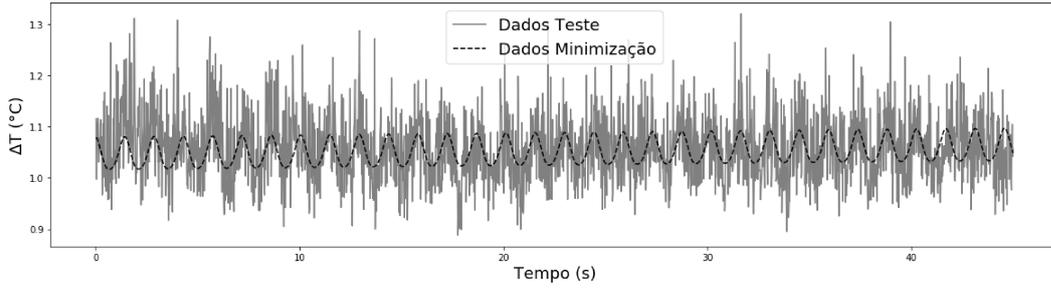


Figura B.1: Resultado do primeiro teste realizado com o primeiro corpo de prova de aço. Tensão aplicada de  $95.967 \text{ MPa}$ .

A figura B.2 apresenta os resultados do segundo teste realizado com o primeiro corpo de prova de aço, com uma tensão aplicada de  $191.93 \text{ MPa}$ . O intervalo de dados usado para o processo de minimização foi  $10 - 30 \text{ s}$ , e o método iterativo usado foi SLSQP. Os resultados obtidos para esse teste foram:  $T_0 = 1.07 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $D_T = 1.1 \text{ mK/ciclo}$ ,  $T_1 = 61.8 \text{ mK}$ ,  $T_2 = 5.2 \text{ mK}$ ,  $f = 0.629 \text{ Hz}$ ,  $\varphi_1 = -4.808 \text{ rad}$  e  $\varphi_2 = -2.228 \text{ rad}$ .

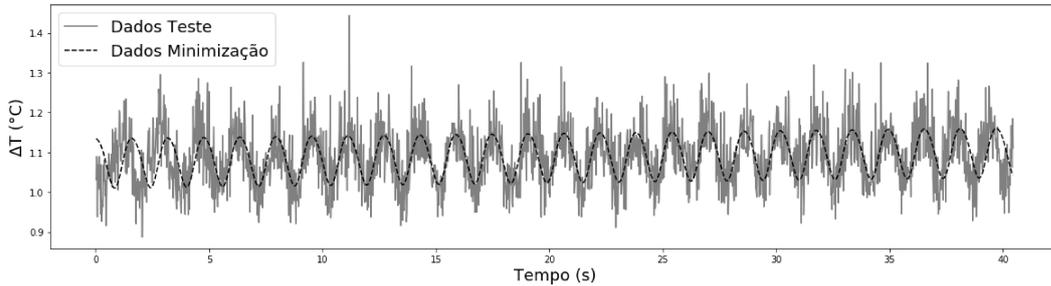


Figura B.2: Resultado do segundo teste realizado com o primeiro corpo de prova de aço. Tensão aplicada de  $191.93 \text{ MPa}$ .

A figura B.3 apresenta os resultados do terceiro teste realizado com o primeiro corpo de prova de aço, com uma tensão aplicada de  $219.14 \text{ MPa}$ . O intervalo de dados usado para o processo de minimização foi  $10 - 40 \text{ s}$ , e o método iterativo usado foi SLSQP. Os resultados obtidos para esse teste foram:  $T_0 = 1.066 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $D_T = 0.9 \text{ mK/ciclo}$ ,  $T_1 = 83.4 \text{ mK}$ ,  $T_2 = 7.7 \text{ mK}$ ,  $f = 0.696 \text{ Hz}$ ,  $\varphi_1 = -0.622 \text{ rad}$  e  $\varphi_2 = -2.413 \text{ rad}$ .

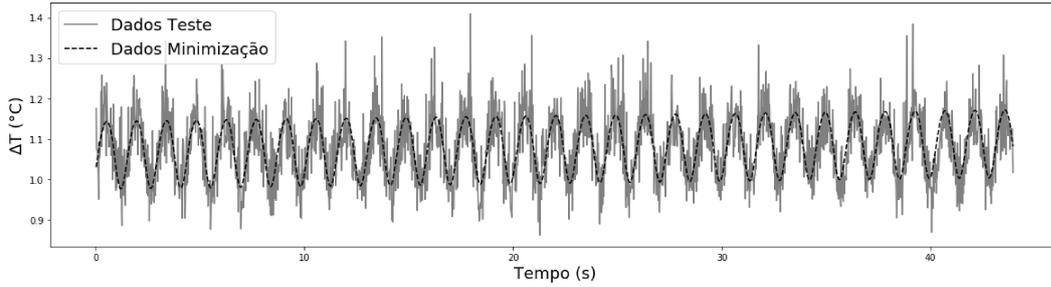


Figura B.3: Resultado do terceiro teste realizado com o primeiro corpo de prova de aço. Tensão aplicada de 219.14 *MPa*.

A figura B.4 apresenta os resultados do quarto teste realizado com o primeiro corpo de prova de aço, com uma tensão aplicada de 237.66 *MPa*. O intervalo de dados usado para o processo de minimização foi 10 – 40 *s*, e o método iterativo usado foi SLSQP. Os resultados obtidos para esse teste foram:  $T_0 = 1.118$  °C,  $D_T = -0.6$  *mK/ciclo*,  $T_1 = 101.9$  *mK*,  $T_2 = 1.9$  *mK*,  $f = 0.697$  *Hz*,  $\varphi_1 = 2.027$  *rad* e  $\varphi_2 = -0.354$  *rad*.

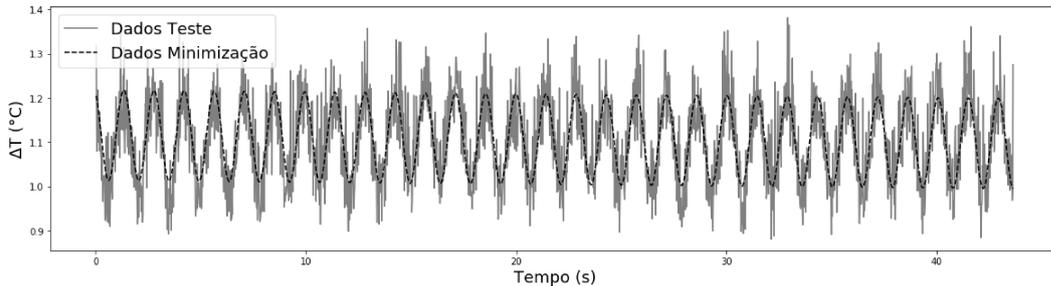


Figura B.4: Resultado do quarto teste realizado com o primeiro corpo de prova de aço. Tensão aplicada de 237.66 *MPa*.

A figura B.5 apresenta os resultados do quinto teste realizado com o primeiro corpo de prova de aço, com uma tensão aplicada de 254.51 *MPa*. O intervalo de dados usado para o processo de minimização foi 10 – 30 *s*, e o método iterativo usado foi SLSQP. Os resultados obtidos para esse teste foram:  $T_0 = 1.126$  °C,  $D_T = 0$  *mK/ciclo*,  $T_1 = 115.1$  *mK*,  $T_2 = 3.8$  *mK*,  $f = 0.548$  *Hz*,  $\varphi_1 = -1.374$  *rad* e  $\varphi_2 = -1.811$  *rad*.

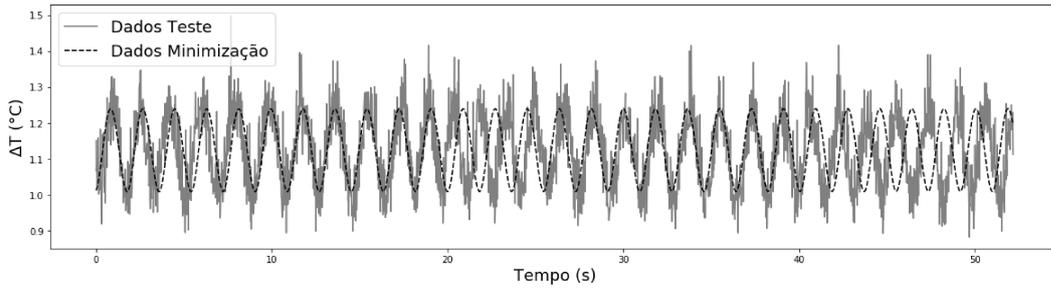


Figura B.5: Resultado do quinto teste realizado com o primeiro corpo de prova de aço. Tensão aplicada de 254.51 *MPa*.

A figura B.6 apresenta os resultados do sexto teste realizado com o primeiro corpo de prova de aço, com uma tensão aplicada de 270.78 *MPa*. O intervalo de dados usado para o processo de minimização foi 10 – 40 *s*, e o método iterativo usado foi SLSQP. Os resultados obtidos para esse teste foram:  $T_0 = 1.118 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $D_T = 0.1 \text{ mK/ciclo}$ ,  $T_1 = 120.2 \text{ mK}$ ,  $T_2 = 5.9 \text{ mK}$ ,  $f = 0.525 \text{ Hz}$ ,  $\varphi_1 = -1.825 \text{ rad}$  e  $\varphi_2 = -8.062 \text{ rad}$ .

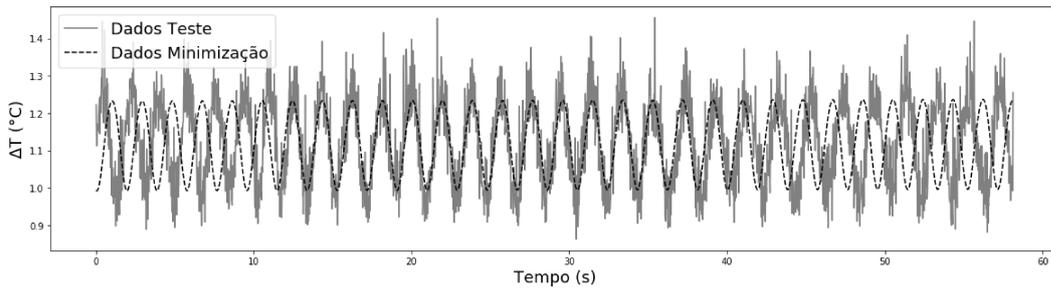


Figura B.6: Resultado do sexto teste realizado com o primeiro corpo de prova de aço. Tensão aplicada de 270.78 *MPa*.

A figura B.7 apresenta os resultados do sétimo teste realizado com o primeiro corpo de prova de aço, com uma tensão aplicada de 285.32 *MPa*. O intervalo de dados usado para o processo de minimização foi 10 – 40 *s*, e o método iterativo usado foi SLSQP. Os resultados obtidos para esse teste foram:  $T_0 = 1.137 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $D_T = 0.4 \text{ mK/ciclo}$ ,  $T_1 = 138.8 \text{ mK}$ ,  $T_2 = 0.5 \text{ mK}$ ,  $f = 0.565 \text{ Hz}$ ,  $\varphi_1 = -4.870 \text{ rad}$  e  $\varphi_2 = -0.359 \text{ rad}$ .

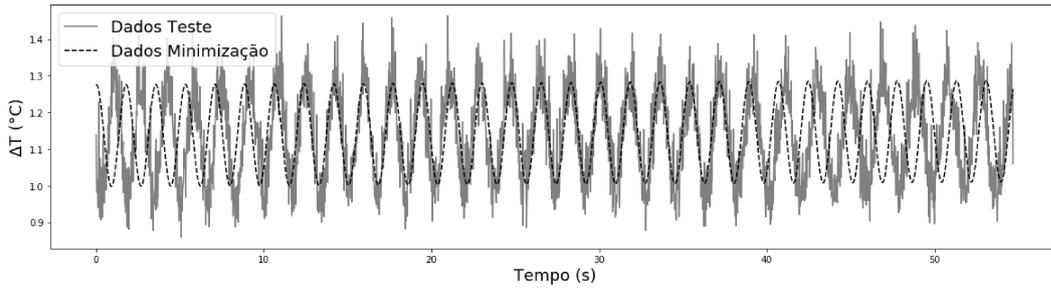


Figura B.7: Resultado do sétimo teste realizado com o primeiro corpo de prova de aço. Tensão aplicada de 285.32 *MPa*.

A figura B.8 apresenta os resultados do oitavo teste realizado com o primeiro corpo de prova de aço, com uma tensão aplicada de 296.46 *MPa*. O intervalo de dados usado para o processo de minimização foi 10 – 40 *s*, e o método iterativo usado foi SLSQP. Os resultados obtidos para esse teste foram:  $T_0 = 1.150$  °C,  $D_T = 0.3$  *mK/ciclo*,  $T_1 = 166.1$  *mK*,  $T_2 = 0$  *mK*,  $f = 0.696$  *Hz*,  $\varphi_1 = 3.196$  *rad* e  $\varphi_2 = 2.347$  *rad*.

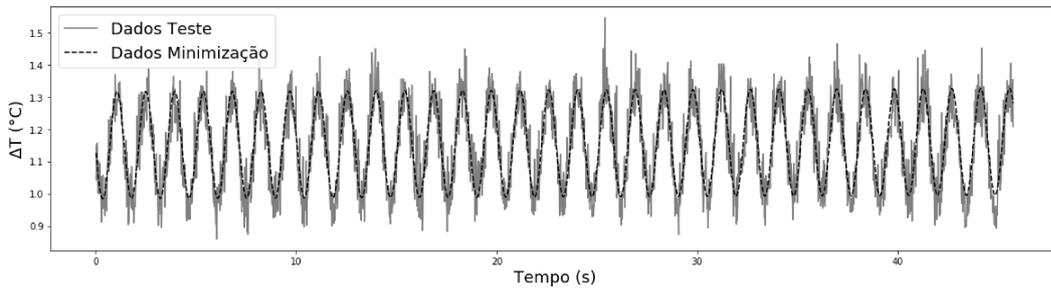


Figura B.8: Resultado do oitavo teste realizado com o primeiro corpo de prova de aço. Tensão aplicada de 296.46 *MPa*.

## B.2

### Teste com o segundo corpo de prova de aço

A figura B.9 apresenta os resultados do primeiro teste realizado com o segundo corpo de prova de aço, com uma tensão aplicada de 86.33 *MPa*. O intervalo de dados usado para o processo de minimização foi 10 – 30 *s*, e o método iterativo usado foi Nelder-Mead. Os resultados obtidos para esse teste foram:  $T_0 = 0.179$  °C,  $D_T = 0.1$  *mK/ciclo*,  $T_1 = 15.5$  *mK*,  $T_2 = 1.2$  *mK*,  $f = 2.182$  *Hz*,  $\varphi_1 = 0.012$  *rad* e  $\varphi_2 = -0.002$  *rad*.

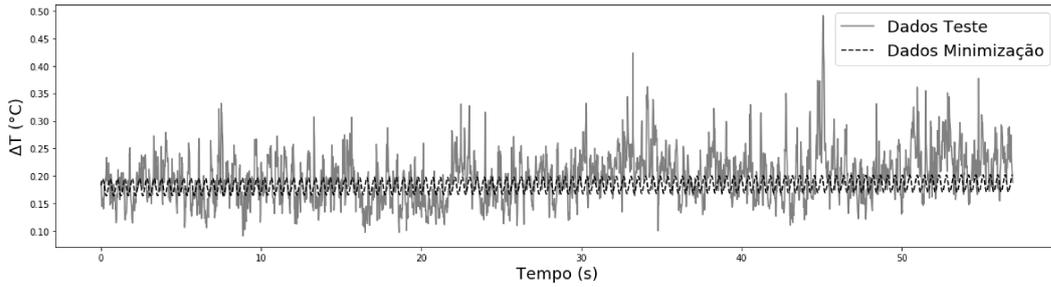


Figura B.9: Resultado do primeiro teste realizado com o segundo corpo de prova de aço. Tensão aplicada de  $86.33 \text{ MPa}$ .

A figura B.10 apresenta os resultados do segundo teste realizado com o segundo corpo de prova de aço, com uma tensão aplicada de  $128.76 \text{ MPa}$ . O intervalo de dados usado para o processo de minimização foi  $20 - 40 \text{ s}$ , e o método iterativo usado foi Nelder-Mead. Os resultados obtidos para esse teste foram:  $T_0 = 0.206 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $D_T = 0 \text{ mK/ciclo}$ ,  $T_1 = 33 \text{ mK}$ ,  $T_2 = 1.7 \text{ mK}$ ,  $f = 2.351 \text{ Hz}$ ,  $\varphi_1 = 0.03 \text{ rad}$  e  $\varphi_2 = 0.008 \text{ rad}$ .

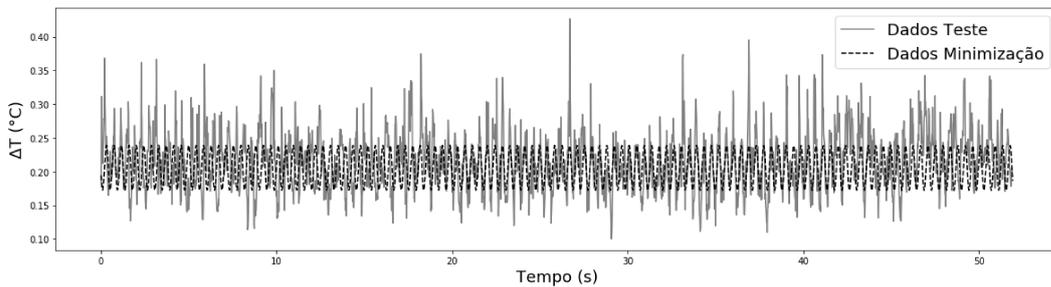


Figura B.10: Resultado do segundo teste realizado com o segundo corpo de prova de aço. Tensão aplicada de  $128.76 \text{ MPa}$ .

A figura B.11 apresenta os resultados do terceiro teste realizado com o segundo corpo de prova de aço, com uma tensão aplicada de  $156.06 \text{ MPa}$ . O intervalo de dados usado para o processo de minimização foi  $15 - 40 \text{ s}$ , e o método iterativo usado foi Nelder-Mead. Os resultados obtidos para esse teste foram:  $T_0 = 0.231 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $D_T = -0.1 \text{ mK/ciclo}$ ,  $T_1 = 46.1 \text{ mK}$ ,  $T_2 = 2.1 \text{ mK}$ ,  $f = 2.792 \text{ Hz}$ ,  $\varphi_1 = 0.043 \text{ rad}$  e  $\varphi_2 = 0 \text{ rad}$ .

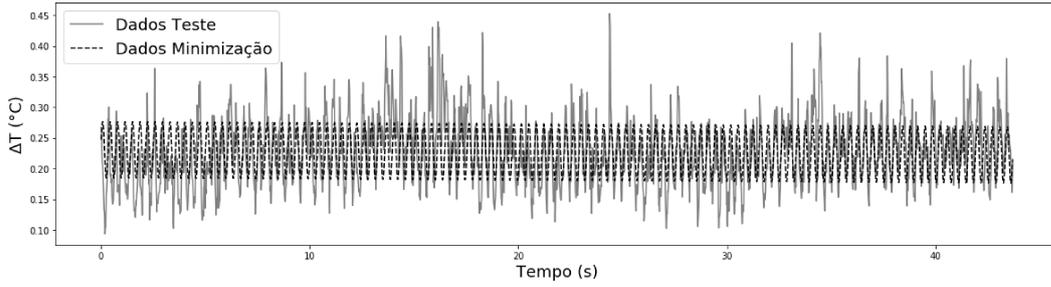


Figura B.11: Resultado do terceiro teste realizado com o segundo corpo de prova de aço. Tensão aplicada de  $156.06 \text{ MPa}$ .

A figura B.12 apresenta os resultados do quarto teste realizado com o segundo corpo de prova de aço, com uma tensão aplicada de  $176.58 \text{ MPa}$ . O intervalo de dados usado para o processo de minimização foi  $10 - 40 \text{ s}$ , e o método iterativo usado foi Nelder-Mead. Os resultados obtidos para esse teste foram:  $T_0 = 0.169 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $D_T = 0.3 \text{ mK/ciclo}$ ,  $T_1 = 42.8 \text{ mK}$ ,  $T_2 = 5 \text{ mK}$ ,  $f = 2.364 \text{ Hz}$ ,  $\varphi_1 = -0.047 \text{ rad}$  e  $\varphi_2 = -0.001 \text{ rad}$ .

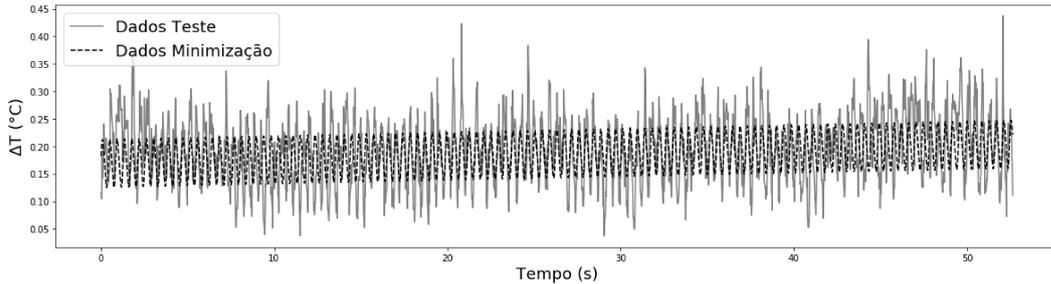


Figura B.12: Resultado do quarto teste realizado com o segundo corpo de prova de aço. Tensão aplicada de  $176.58 \text{ MPa}$ .

A figura B.13 apresenta os resultados do quinto teste realizado com o segundo corpo de prova de aço, com uma tensão aplicada de  $193.62 \text{ MPa}$ . O intervalo de dados usado para o processo de minimização foi  $10 - 40 \text{ s}$ , e o método iterativo usado foi Nelder-Mead. Os resultados obtidos para esse teste foram:  $T_0 = 0.233 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $D_T = -0.4 \text{ mK/ciclo}$ ,  $T_1 = 77.7 \text{ mK}$ ,  $T_2 = 0.9 \text{ mK}$ ,  $f = 2.787 \text{ Hz}$ ,  $\varphi_1 = 0.022 \text{ rad}$  e  $\varphi_2 = 0.006 \text{ rad}$ .

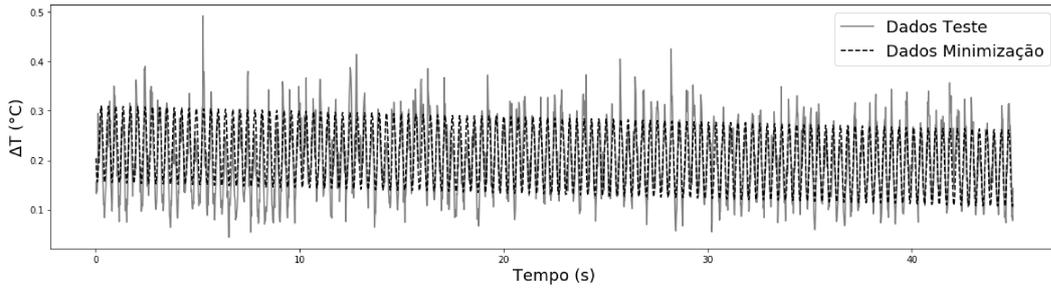


Figura B.13: Resultado do quinto teste realizado com o segundo corpo de prova de aço. Tensão aplicada de  $193.62 \text{ MPa}$ .

A figura B.14 apresenta os resultados do sexto teste realizado com o segundo corpo de prova de aço, com uma tensão aplicada de  $208.82 \text{ MPa}$ . O intervalo de dados usado para o processo de minimização foi  $10 - 40 \text{ s}$ , e o método iterativo usado foi Nelder-Mead. Os resultados obtidos para esse teste foram:  $T_0 = 0.170 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $D_T = 0.1 \text{ mK/ciclo}$ ,  $T_1 = 67 \text{ mK}$ ,  $T_2 = 2.3 \text{ mK}$ ,  $f = 2.163 \text{ Hz}$ ,  $\varphi_1 = -0.078 \text{ rad}$  e  $\varphi_2 = 0.074 \text{ rad}$ .

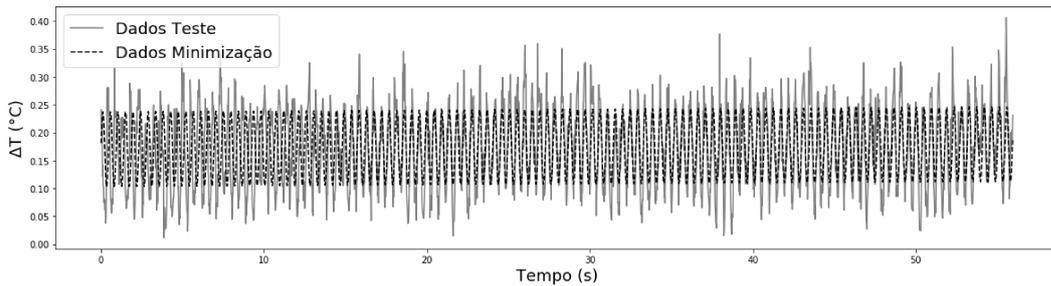


Figura B.14: Resultado do sexto teste realizado com o segundo corpo de prova de aço. Tensão aplicada de  $208.82 \text{ MPa}$ .

A figura B.15 apresenta os resultados do sétimo teste realizado com o segundo corpo de prova de aço, com uma tensão aplicada de  $236.89 \text{ MPa}$ . O intervalo de dados usado para o processo de minimização foi  $20 - 40 \text{ s}$ , e o método iterativo usado foi Nelder-Mead. Os resultados obtidos para esse teste foram:  $T_0 = 0.209 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $D_T = -0.4 \text{ mK/ciclo}$ ,  $T_1 = 116.4 \text{ mK}$ ,  $T_2 = -0.3 \text{ mK}$ ,  $f = 2.798 \text{ Hz}$ ,  $\varphi_1 = 0.003 \text{ rad}$  e  $\varphi_2 = 0.006 \text{ rad}$ .

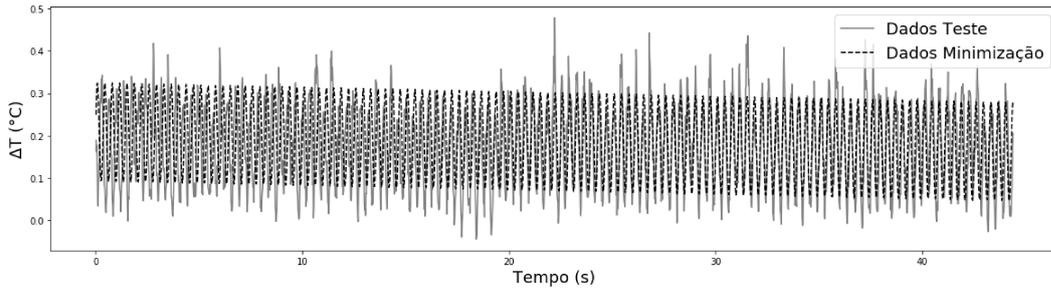


Figura B.15: Resultado do sétimo teste realizado com o segundo corpo de prova de aço. Tensão aplicada de  $236.89 \text{ MPa}$ .

A figura B.16 apresenta os resultados do oitavo teste realizado com o segundo corpo de prova de aço, com uma tensão aplicada de  $264.77 \text{ MPa}$ . O intervalo de dados usado para o processo de minimização foi  $30 - 50 \text{ s}$ , e o método iterativo usado foi Nelder-Mead. Os resultados obtidos para esse teste foram:  $T_0 = 0.216 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $D_T = 0.1 \text{ mK/ciclo}$ ,  $T_1 = 153.3 \text{ mK}$ ,  $T_2 = 12.3 \text{ mK}$ ,  $f = 2.048 \text{ Hz}$ ,  $\varphi_1 = -0.036 \text{ rad}$  e  $\varphi_2 = 0.037 \text{ rad}$ .

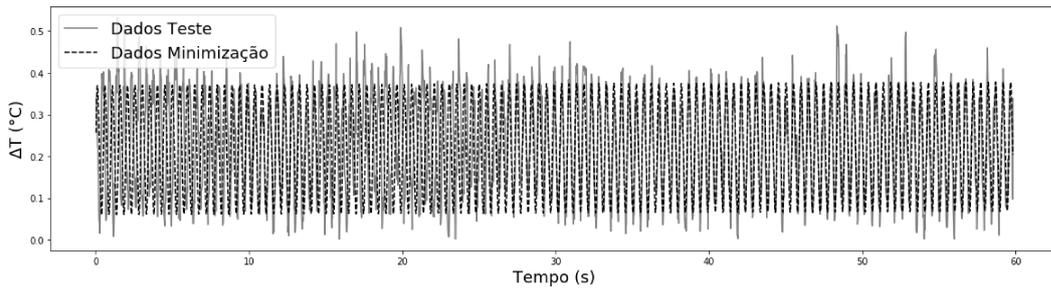


Figura B.16: Resultado do oitavo teste realizado com o segundo corpo de prova de aço. Tensão aplicada de  $264.77 \text{ MPa}$ .

A figura B.17 apresenta os resultados do nono teste realizado com o segundo corpo de prova de aço, com uma tensão aplicada de  $328.30 \text{ MPa}$ . O intervalo de dados usado para o processo de minimização foi  $0 - 20 \text{ s}$ , e o método iterativo usado foi Nelder-Mead. Os resultados obtidos para esse teste foram:  $T_0 = 0.250 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $D_T = -0.2 \text{ mK/ciclo}$ ,  $T_1 = 173.2 \text{ mK}$ ,  $T_2 = 53.4 \text{ mK}$ ,  $f = 2.376 \text{ Hz}$ ,  $\varphi_1 = -0.556 \text{ rad}$  e  $\varphi_2 = 0.138 \text{ rad}$ .

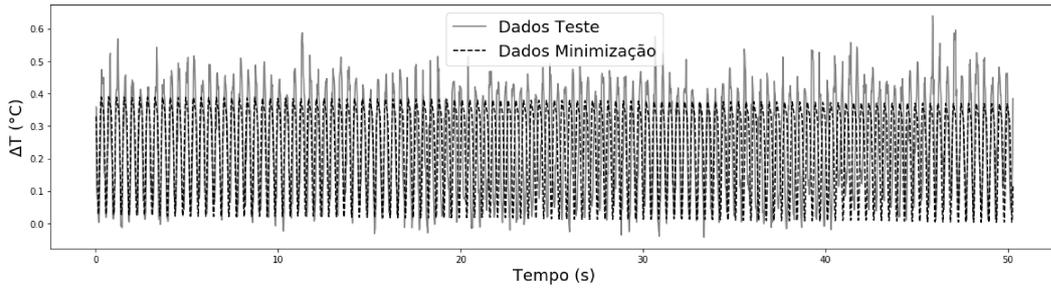


Figura B.17: Resultado do nono teste realizado com o segundo corpo de prova de aço. Tensão aplicada de  $328.30 \text{ MPa}$ .

A figura B.18 apresenta os resultados do décimo teste realizado com o segundo corpo de prova de aço, com uma tensão aplicada de  $367.65 \text{ MPa}$ . O intervalo de dados usado para o processo de minimização foi  $0 - 20 \text{ s}$ , e o método iterativo usado foi Nelder-Mead. Os resultados obtidos para esse teste foram:  $T_0 = 0.344 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $D_T = -0.8 \text{ mK/ciclo}$ ,  $T_1 = 210.7 \text{ mK}$ ,  $T_2 = 6.9 \text{ mK}$ ,  $f = 2.438 \text{ Hz}$ ,  $\varphi_1 = -2.379 \text{ rad}$  e  $\varphi_2 = 2.179 \text{ rad}$ .

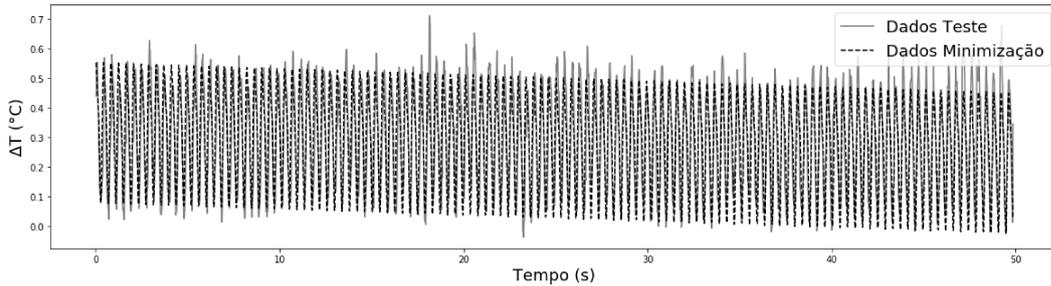


Figura B.18: Resultado do décimo teste realizado com o segundo corpo de prova de aço. Tensão aplicada de  $367.65 \text{ MPa}$ .

A figura B.19 apresenta os resultados do décimo primeiro teste realizado com o segundo corpo de prova de aço, com uma tensão aplicada de  $381.52 \text{ MPa}$ . O intervalo de dados usado para o processo de minimização foi  $10 - 30 \text{ s}$ , e o método iterativo usado foi Nelder-Mead. Os resultados obtidos para esse teste foram:  $T_0 = 0.429 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $D_T = -0.1 \text{ mK/ciclo}$ ,  $T_1 = 226.5 \text{ mK}$ ,  $T_2 = 18.3 \text{ mK}$ ,  $f = 2.786 \text{ Hz}$ ,  $\varphi_1 = 1.087 \text{ rad}$  e  $\varphi_2 = -2.278 \text{ rad}$ .

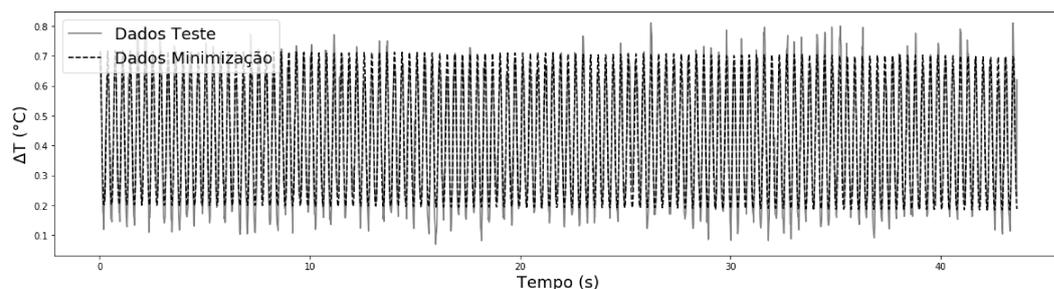


Figura B.19: Resultado do décimo primeiro teste realizado com o segundo corpo de prova de aço. Tensão aplicada de  $381.52 \text{ MPa}$ .

### B.3

#### Teste com o terceiro corpo de prova de aço durante a fase 2 do comportamento térmico

A figura B.20 apresenta os resultados do primeiro teste realizado com o terceiro corpo de prova de aço, durante a segunda fase do comportamento térmico, com uma tensão aplicada de  $72.84 \text{ MPa}$ . O intervalo de dados usado para o processo de minimização foi  $10 - 30 \text{ s}$ , e o método iterativo usado foi Nelder-Mead. Os resultados obtidos para esse teste foram:  $T_0 = 0.220 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $D_T = 0 \text{ mK/ciclo}$ ,  $T_1 = 40 \text{ mK}$ ,  $T_2 = 0.1 \text{ mK}$ ,  $f = 1.995 \text{ Hz}$ ,  $\varphi_1 = -0.514 \text{ rad}$  e  $\varphi_2 = 0.443 \text{ rad}$ .

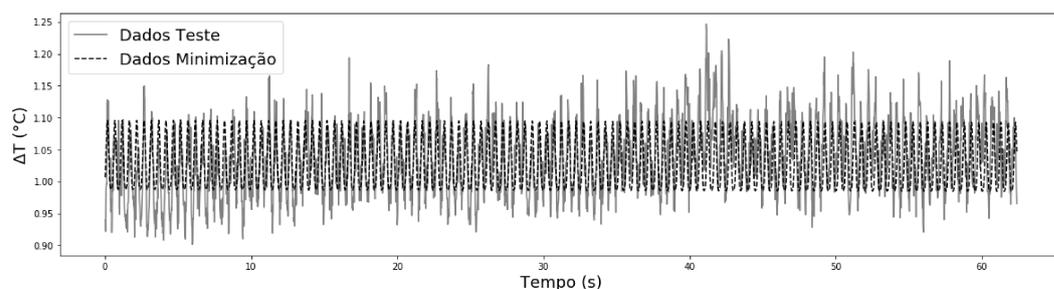


Figura B.20: Resultado do primeiro teste realizado com o terceiro corpo de prova de aço, durante a segunda fase do comportamento térmico. Tensão aplicada de  $72.84 \text{ MPa}$ .

A figura B.21 apresenta os resultados do segundo teste realizado com o terceiro corpo de prova de aço, durante a segunda fase do comportamento térmico, com uma tensão aplicada de  $104.81 \text{ MPa}$ . O intervalo de dados usado para o processo de minimização foi  $50 - 60 \text{ s}$ , e o método iterativo usado foi

Nelder-Mead. Os resultados obtidos para esse teste foram:  $T_0 = 0.230 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $D_T = 0 \text{ mK/ciclo}$ ,  $T_1 = 41 \text{ mK}$ ,  $T_2 = 0.3 \text{ mK}$ ,  $f = 1.995 \text{ Hz}$ ,  $\varphi_1 = -29.906 \text{ rad}$  e  $\varphi_2 = -25.630 \text{ rad}$ .

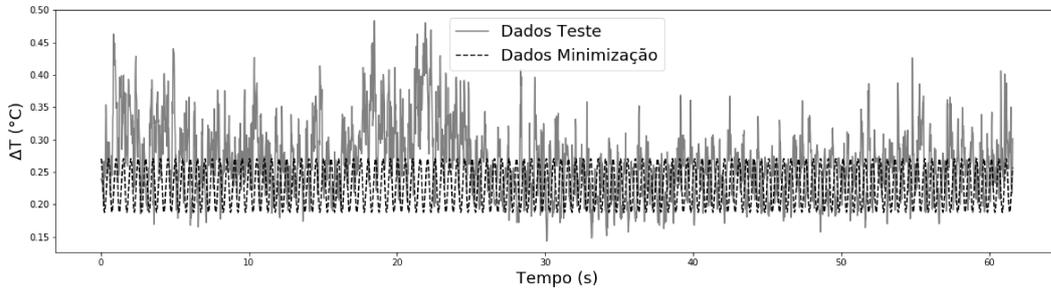


Figura B.21: Resultado do segundo teste realizado com o terceiro corpo de prova de aço, durante a segunda fase do comportamento térmico. Tensão aplicada de  $104.81 \text{ MPa}$ .

A figura B.22 apresenta os resultados do terceiro teste realizado com o terceiro corpo de prova de aço, durante a segunda fase do comportamento térmico, com uma tensão aplicada de  $141.78 \text{ MPa}$ . O intervalo de dados usado para o processo de minimização foi  $0 - 30 \text{ s}$ , e o método iterativo usado foi Nelder-Mead. Os resultados obtidos para esse teste foram:  $T_0 = 0.221 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $D_T = 0.1 \text{ mK/ciclo}$ ,  $T_1 = 43.6 \text{ mK}$ ,  $T_2 = 1.1 \text{ mK}$ ,  $f = 2.001 \text{ Hz}$ ,  $\varphi_1 = 0.014 \text{ rad}$  e  $\varphi_2 = -0.004 \text{ rad}$ .

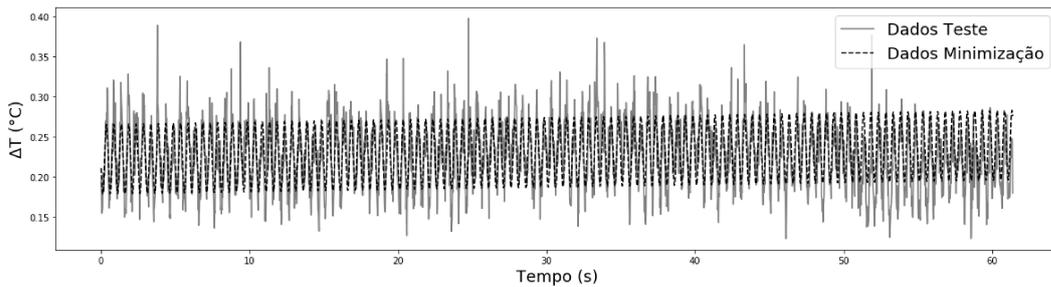


Figura B.22: Resultado do terceiro teste realizado com o terceiro corpo de prova de aço, durante a segunda fase do comportamento térmico. Tensão aplicada de  $141.78 \text{ MPa}$ .

A figura B.23 apresenta os resultados do quarto teste realizado com o terceiro corpo de prova de aço, durante a segunda fase do comportamento térmico, com uma tensão aplicada de  $185.37 \text{ MPa}$ . O intervalo de dados usado

para o processo de minimização foi  $0 - 20$  s, e o método iterativo usado foi Nelder-Mead. Os resultados obtidos para esse teste foram:  $T_0 = 0.292$  °C,  $D_T = -0.3$  mK/ciclo,  $T_1 = 53.3$  mK,  $T_2 = 5.3$  mK,  $f = 2.003$  Hz,  $\varphi_1 = 2.355$  rad e  $\varphi_2 = -1.577$  rad.

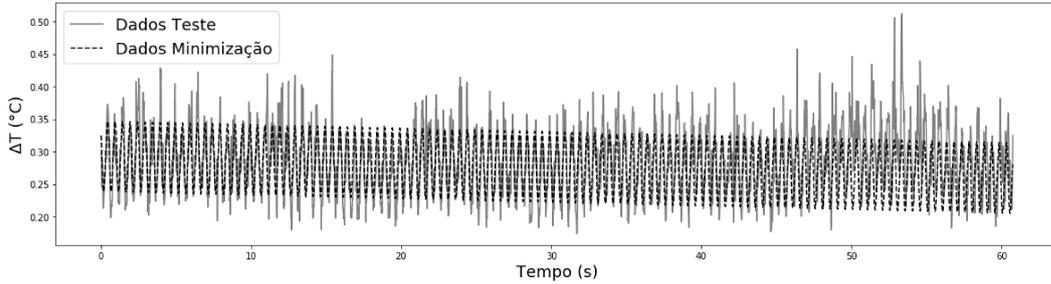


Figura B.23: Resultado do quarto teste realizado com o terceiro corpo de prova de aço, durante a segunda fase do comportamento térmico. Tensão aplicada de  $185.37$  MPa.

A figura B.24 apresenta os resultados do quinto teste realizado com o terceiro corpo de prova de aço, durante a segunda fase do comportamento térmico, com uma tensão aplicada de  $238.51$  MPa. O intervalo de dados usado para o processo de minimização foi  $50 - 60$  s, e o método iterativo usado foi Nelder-Mead. Os resultados obtidos para esse teste foram:  $T_0 = 0.378$  °C,  $D_T = -0.3$  mK/ciclo,  $T_1 = 53$  mK,  $T_2 = 4.4$  mK,  $f = 2.029$  Hz,  $\varphi_1 = 0.103$  rad e  $\varphi_2 = -0.019$  rad.

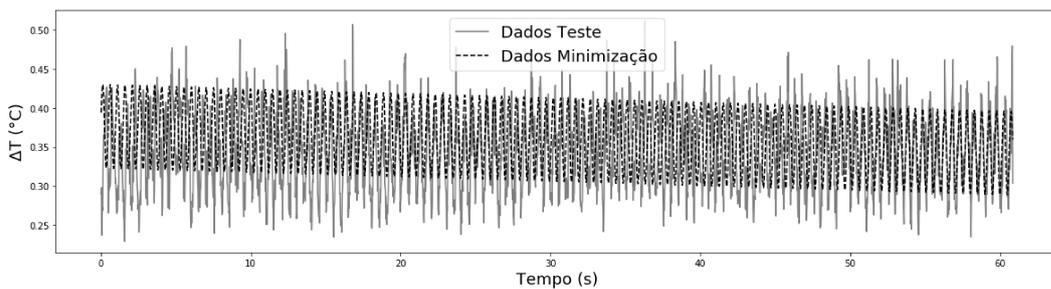


Figura B.24: Resultado do quinto teste realizado com o terceiro corpo de prova de aço, durante a segunda fase do comportamento térmico. Tensão aplicada de  $238.51$  MPa.

A figura B.25 apresenta os resultados do sexto teste realizado com o terceiro corpo de prova de aço, durante a segunda fase do comportamento

térmico, com uma tensão aplicada de  $302.46 \text{ MPa}$ . O intervalo de dados usado para o processo de minimização foi  $30 - 50 \text{ s}$ , e o método iterativo usado foi Nelder-Mead. Os resultados obtidos para esse teste foram:  $T_0 = 0.440 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $D_T = -0.3 \text{ mK/ciclo}$ ,  $T_1 = 67 \text{ mK}$ ,  $T_2 = 4.7 \text{ mK}$ ,  $f = 2.003 \text{ Hz}$ ,  $\varphi_1 = 0.029 \text{ rad}$  e  $\varphi_2 = -0.129 \text{ rad}$ .

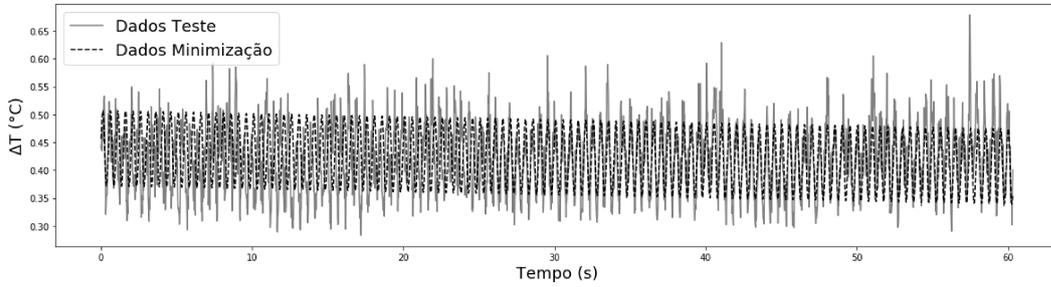


Figura B.25: Resultado do sexto teste realizado com o terceiro corpo de prova de aço, durante a segunda fase do comportamento térmico. Tensão aplicada de  $302.46 \text{ MPa}$ .

A figura B.26 apresenta os resultados do sétimo teste realizado com o terceiro corpo de prova de aço, durante a segunda fase do comportamento térmico, com uma tensão aplicada de  $340 \text{ MPa}$ . O intervalo de dados usado para o processo de minimização foi  $15 - 25 \text{ s}$ , e o método iterativo usado foi Nelder-Mead. Os resultados obtidos para esse teste foram:  $T_0 = 0.460 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $D_T = -0.2 \text{ mK/ciclo}$ ,  $T_1 = 67 \text{ mK}$ ,  $T_2 = 7.8 \text{ mK}$ ,  $f = 2.032 \text{ Hz}$ ,  $\varphi_1 = 0.114 \text{ rad}$  e  $\varphi_2 = 0.052 \text{ rad}$ .

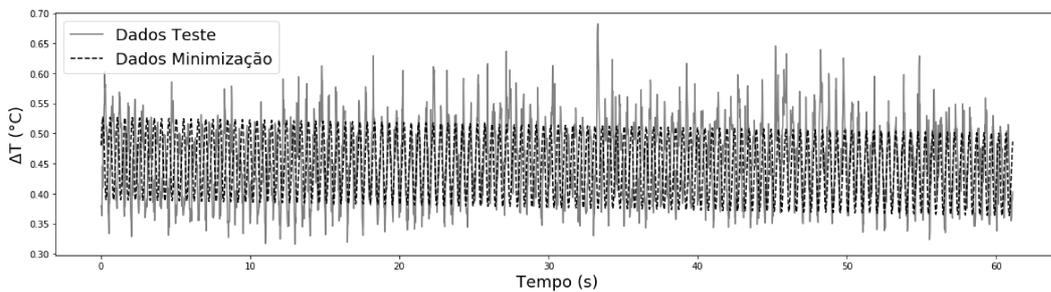


Figura B.26: Resultado do sétimo teste realizado com o terceiro corpo de prova de aço, durante a segunda fase do comportamento térmico. Tensão aplicada de  $340 \text{ MPa}$ .

A figura B.27 apresenta os resultados do oitavo teste realizado com o terceiro corpo de prova de aço, durante a segunda fase do comportamento

térmico, com uma tensão aplicada de  $384.12 \text{ MPa}$ . O intervalo de dados usado para o processo de minimização foi  $35 - 45 \text{ s}$ , e o método iterativo usado foi Nelder-Mead. Os resultados obtidos para esse teste foram:  $T_0 = 0.483 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $D_T = -0.1 \text{ mK/ciclo}$ ,  $T_1 = 82 \text{ mK}$ ,  $T_2 = 3.3 \text{ mK}$ ,  $f = 1.992 \text{ Hz}$ ,  $\varphi_1 = 0.005 \text{ rad}$  e  $\varphi_2 = -0.013 \text{ rad}$ .

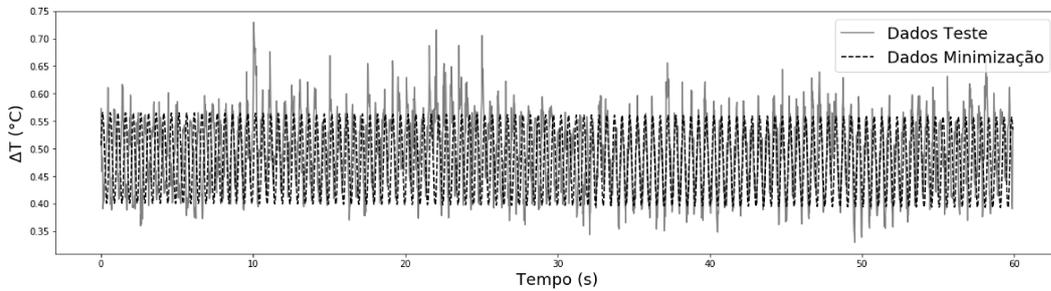


Figura B.27: Resultado do oitavo teste realizado com o terceiro corpo de prova de aço, durante a segunda fase do comportamento térmico. Tensão aplicada de  $384.12 \text{ MPa}$ .

A figura B.28 apresenta os resultados do nono teste realizado com o terceiro corpo de prova de aço, durante a segunda fase do comportamento térmico, com uma tensão aplicada de  $432.19 \text{ MPa}$ . O intervalo de dados usado para o processo de minimização foi  $0 - 15 \text{ s}$ , e o método iterativo usado foi Nelder-Mead. Os resultados obtidos para esse teste foram:  $T_0 = 0.501 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $D_T = -0.3 \text{ mK/ciclo}$ ,  $T_1 = 91.2 \text{ mK}$ ,  $T_2 = 2.8 \text{ mK}$ ,  $f = 2.001 \text{ Hz}$ ,  $\varphi_1 = -1.129 \text{ rad}$  e  $\varphi_2 = 0.655 \text{ rad}$ .

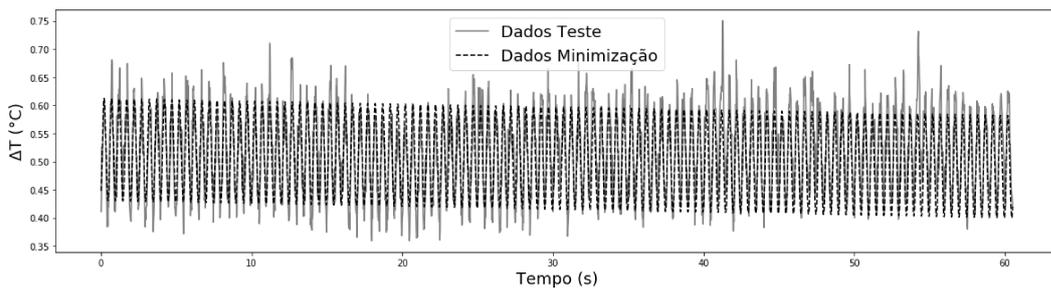


Figura B.28: Resultado do nono teste realizado com o terceiro corpo de prova de aço, durante a segunda fase do comportamento térmico. Tensão aplicada de  $432.19 \text{ MPa}$ .

#### B.4

##### Teste com o terceiro corpo de prova de aço durante a fase 1 do comportamento térmico

A figura B.29 apresenta os resultados do primeiro teste realizado com o terceiro corpo de prova de aço, durante a primeira fase do comportamento térmico, com uma tensão aplicada de  $72.84 \text{ MPa}$ . O intervalo de dados usado para o processo de minimização foi  $10 - 30 \text{ s}$ , e o método iterativo usado foi Nelder-Mead. Os resultados obtidos para esse teste foram:  $T_0 = 0.230 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $D_T = -0.3 \text{ mK/ciclo}$ ,  $T_1 = 25 \text{ mK}$ ,  $T_2 = 0 \text{ mK}$ ,  $f = 2.039 \text{ Hz}$ ,  $\varphi_1 = 0.005 \text{ rad}$  e  $\varphi_2 = 0.008 \text{ rad}$ .

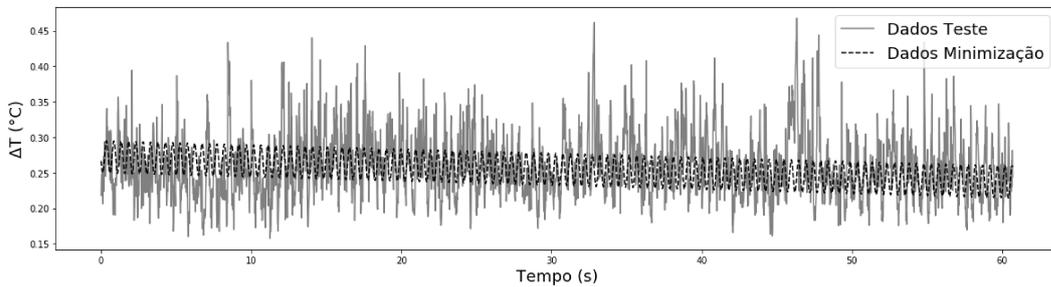


Figura B.29: Resultado do primeiro teste realizado com o terceiro corpo de prova de aço, durante a primeira fase do comportamento térmico. Tensão aplicada de  $72.84 \text{ MPa}$ .

A figura B.30 apresenta os resultados do segundo teste realizado com o terceiro corpo de prova de aço, durante a primeira fase do comportamento térmico, com uma tensão aplicada de  $104.81 \text{ MPa}$ . O intervalo de dados usado para o processo de minimização foi  $25 - 50 \text{ s}$ , e o método iterativo usado foi Nelder-Mead. Os resultados obtidos para esse teste foram:  $T_0 = 0.235 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $D_T = 0.1 \text{ mK/ciclo}$ ,  $T_1 = 34.7 \text{ mK}$ ,  $T_2 = 0.8 \text{ mK}$ ,  $f = 2.008 \text{ Hz}$ ,  $\varphi_1 = 0.011 \text{ rad}$  e  $\varphi_2 = -0.068 \text{ rad}$ .

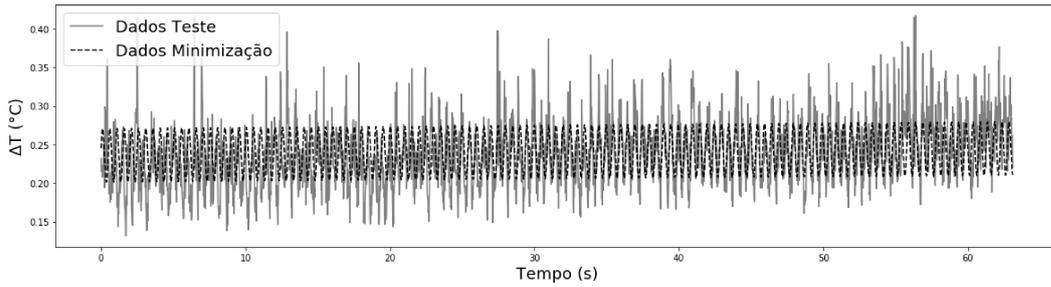


Figura B.30: Resultado do segundo teste realizado com o terceiro corpo de prova de aço, durante a primeira fase do comportamento térmico. Tensão aplicada de  $104.81 \text{ MPa}$ .

A figura B.31 apresenta os resultados do terceiro teste realizado com o terceiro corpo de prova de aço, durante a primeira fase do comportamento térmico, com uma tensão aplicada de  $141.78 \text{ MPa}$ . O intervalo de dados usado para o processo de minimização foi  $10 - 25 \text{ s}$ , e o método iterativo usado foi Nelder-Mead. Os resultados obtidos para esse teste foram:  $T_0 = 0.244 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $D_T = 0.1 \text{ mK/ciclo}$ ,  $T_1 = 29.5 \text{ mK}$ ,  $T_2 = 6.8 \text{ mK}$ ,  $f = 2.026 \text{ Hz}$ ,  $\varphi_1 = 0.099 \text{ rad}$  e  $\varphi_2 = -0.002 \text{ rad}$ .

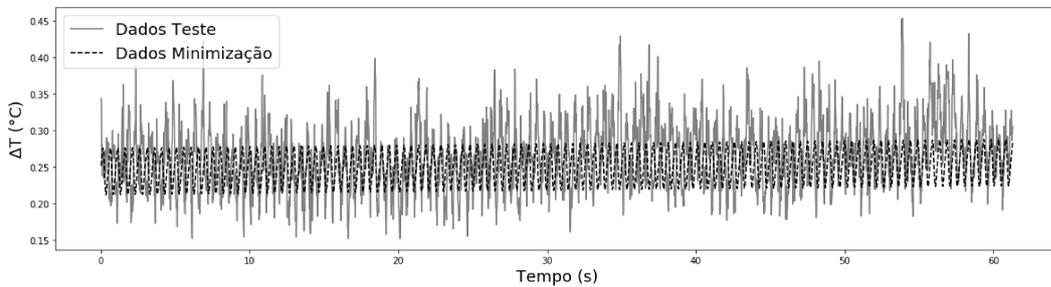


Figura B.31: Resultado do terceiro teste realizado com o terceiro corpo de prova de aço, durante a primeira fase do comportamento térmico. Tensão aplicada de  $141.78 \text{ MPa}$ .

A figura B.32 apresenta os resultados do quarto teste realizado com o terceiro corpo de prova de aço, durante a primeira fase do comportamento térmico, com uma tensão aplicada de  $185.37 \text{ MPa}$ . O intervalo de dados usado para o processo de minimização foi  $25 - 45 \text{ s}$ , e o método iterativo usado foi Nelder-Mead. Os resultados obtidos para esse teste foram:  $T_0 = 0.287 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $D_T = -0.2 \text{ mK/ciclo}$ ,  $T_1 = 49.2 \text{ mK}$ ,  $T_2 = 1.8 \text{ mK}$ ,  $f = 2.017 \text{ Hz}$ ,  $\varphi_1 = 0.014 \text{ rad}$  e  $\varphi_2 = 0.002 \text{ rad}$ .

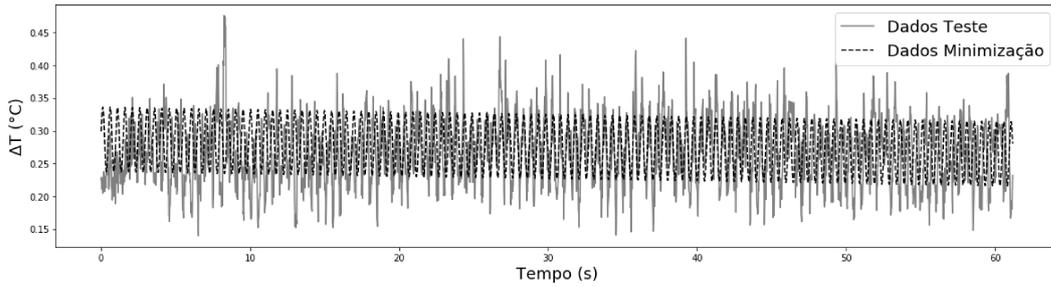


Figura B.32: Resultado do quarto teste realizado com o terceiro corpo de prova de aço, durante a primeira fase do comportamento térmico. Tensão aplicada de  $185.37 \text{ MPa}$ .

A figura B.33 apresenta os resultados do quinto teste realizado com o terceiro corpo de prova de aço, durante a primeira fase do comportamento térmico, com uma tensão aplicada de  $238.51 \text{ MPa}$ . O intervalo de dados usado para o processo de minimização foi  $30 - 50 \text{ s}$ , e o método iterativo usado foi Nelder-Mead. Os resultados obtidos para esse teste foram:  $T_0 = 0.331 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $D_T = 0 \text{ mK/ciclo}$ ,  $T_1 = 59 \text{ mK}$ ,  $T_2 = 1.1 \text{ mK}$ ,  $f = 2.002 \text{ Hz}$ ,  $\varphi_1 = 0.078 \text{ rad}$  e  $\varphi_2 = -0.009 \text{ rad}$ .

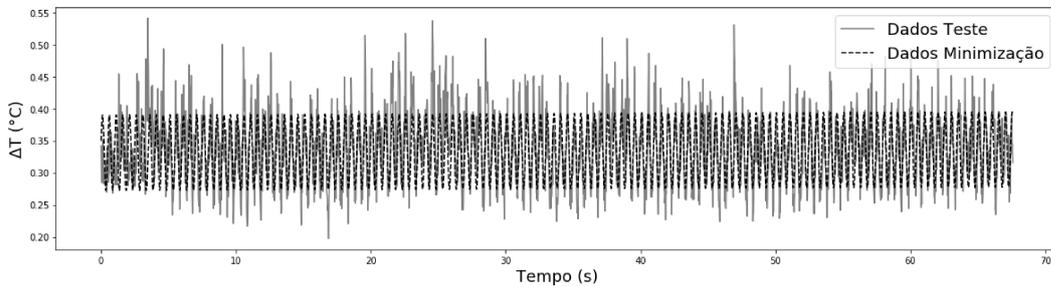


Figura B.33: Resultado do quinto teste realizado com o terceiro corpo de prova de aço, durante a primeira fase do comportamento térmico. Tensão aplicada de  $238.51 \text{ MPa}$ .

A figura B.34 apresenta os resultados do sexto teste realizado com o terceiro corpo de prova de aço, durante a primeira fase do comportamento térmico, com uma tensão aplicada de  $302.46 \text{ MPa}$ . O intervalo de dados usado para o processo de minimização foi  $15 - 35 \text{ s}$ , e o método iterativo usado foi Nelder-Mead. Os resultados obtidos para esse teste foram:  $T_0 = 0.362 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $D_T = 0.5 \text{ mK/ciclo}$ ,  $T_1 = 61.4 \text{ mK}$ ,  $T_2 = 6.4 \text{ mK}$ ,  $f = 2.002 \text{ Hz}$ ,  $\varphi_1 = 0.819 \text{ rad}$  e  $\varphi_2 = -0.827 \text{ rad}$ .

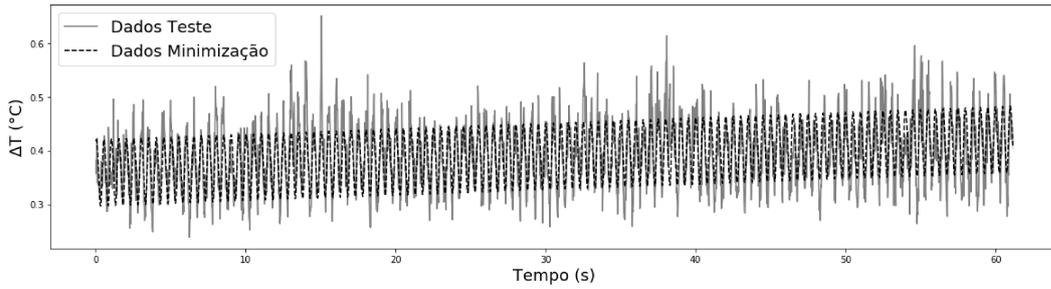


Figura B.34: Resultado do sexto teste realizado com o terceiro corpo de prova de aço, durante a primeira fase do comportamento térmico. Tensão aplicada de  $302.46 \text{ MPa}$ .

A figura B.35 apresenta os resultados do sétimo teste realizado com o terceiro corpo de prova de aço, durante a primeira fase do comportamento térmico, com uma tensão aplicada de  $340 \text{ MPa}$ . O intervalo de dados usado para o processo de minimização foi  $10 - 30 \text{ s}$ , e o método iterativo usado foi Nelder-Mead. Os resultados obtidos para esse teste foram:  $T_0 = 0.391 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $D_T = 0 \text{ mK/ciclo}$ ,  $T_1 = 70 \text{ mK}$ ,  $T_2 = 4.7 \text{ mK}$ ,  $f = 1.999 \text{ Hz}$ ,  $\varphi_1 = 0.785 \text{ rad}$  e  $\varphi_2 = 0.117 \text{ rad}$ .

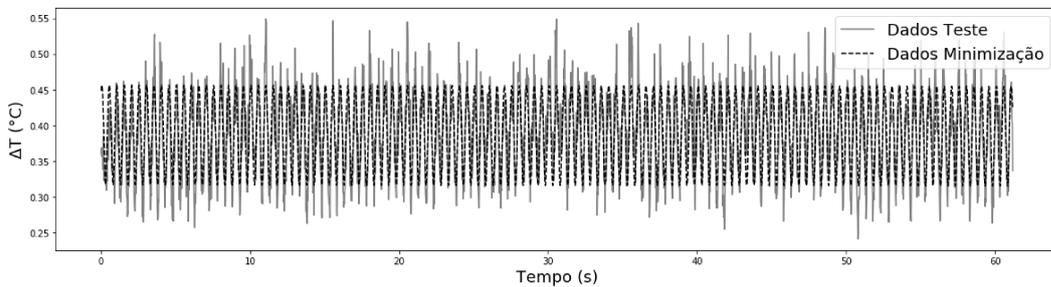


Figura B.35: Resultado do sétimo teste realizado com o terceiro corpo de prova de aço, durante a primeira fase do comportamento térmico. Tensão aplicada de  $340 \text{ MPa}$ .

A figura B.36 apresenta os resultados do oitavo teste realizado com o terceiro corpo de prova de aço, durante a primeira fase do comportamento térmico, com uma tensão aplicada de  $384.12 \text{ MPa}$ . O intervalo de dados usado para o processo de minimização foi  $15 - 35 \text{ s}$ , e o método iterativo usado foi Nelder-Mead. Os resultados obtidos para esse teste foram:  $T_0 = 0.413 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $D_T = -0.1 \text{ mK/ciclo}$ ,  $T_1 = 73 \text{ mK}$ ,  $T_2 = 7.1 \text{ mK}$ ,  $f = 2.008 \text{ Hz}$ ,  $\varphi_1 = 0.113 \text{ rad}$  e  $\varphi_2 = 0.308 \text{ rad}$ .

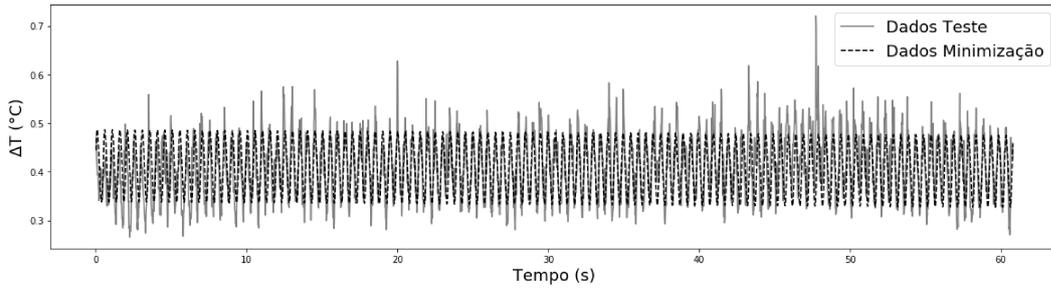


Figura B.36: Resultado do oitavo teste realizado com o terceiro corpo de prova de aço, durante a primeira fase do comportamento térmico. Tensão aplicada de  $384.12 \text{ MPa}$ .

A figura B.37 apresenta os resultados do nono teste realizado com o terceiro corpo de prova de aço, durante a primeira fase do comportamento térmico, com uma tensão aplicada de  $432.19 \text{ MPa}$ . O intervalo de dados usado para o processo de minimização foi  $35 - 50 \text{ s}$ , e o método iterativo usado foi Nelder-Mead. Os resultados obtidos para esse teste foram:  $T_0 = 0.590 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $D_T = -0.3 \text{ mK/ciclo}$ ,  $T_1 = 89.7 \text{ mK}$ ,  $T_2 = 0.4 \text{ mK}$ ,  $f = 2.010 \text{ Hz}$ ,  $\varphi_1 = -0.001 \text{ rad}$  e  $\varphi_2 = 0.028 \text{ rad}$ .

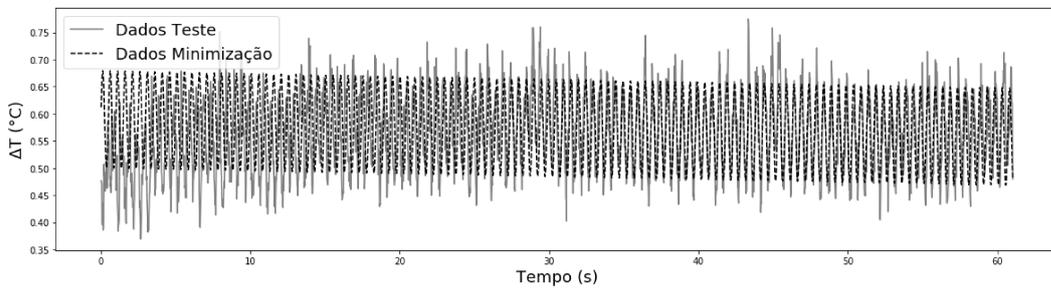


Figura B.37: Resultado do nono teste realizado com o terceiro corpo de prova de aço, durante a primeira fase do comportamento térmico. Tensão aplicada de  $432.19 \text{ MPa}$ .

A figura B.38 apresenta os resultados do nono teste realizado com o terceiro corpo de prova de aço, durante a primeira fase do comportamento térmico, com uma tensão aplicada de  $432.19 \text{ MPa}$ . O intervalo de dados usado para o processo de minimização foi  $10 - 25 \text{ s}$ , e o método iterativo usado foi Nelder-Mead. Os resultados obtidos para esse teste foram:  $T_0 = 0.581 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $D_T = 0.3 \text{ mK/ciclo}$ ,  $T_1 = 89.5 \text{ mK}$ ,  $T_2 = 20.5 \text{ mK}$ ,  $f = 2.023 \text{ Hz}$ ,  $\varphi_1 = 0.203 \text{ rad}$  e  $\varphi_2 = 0.191 \text{ rad}$ .

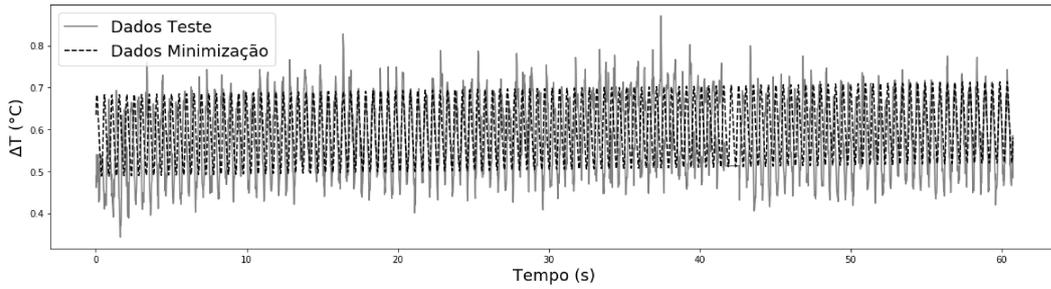


Figura B.38: Resultado do décimo teste realizado com o terceiro corpo de prova de aço, durante a primeira fase do comportamento térmico. Tensão aplicada de  $432.19 \text{ MPa}$ .

## B.5

### Teste com corpo de prova de policarbonato

A figura B.39 apresenta os resultados do primeiro teste realizado com o corpo de prova de policarbonato, com uma tensão aplicada de  $5.95 \text{ MPa}$ . O intervalo de dados usado para o processo de minimização foi  $10 - 40 \text{ s}$ , e o método iterativo usado foi SLSQP. Os resultados obtidos para esse teste foram:  $T_0 = 0.308 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $D_T = 3 \text{ mK/ciclo}$ ,  $T_1 = 73.7 \text{ mK}$ ,  $T_2 = 13.1 \text{ mK}$ ,  $f = 0.697 \text{ Hz}$ ,  $\varphi_1 = 4.915 \text{ rad}$  e  $\varphi_2 = 0.887 \text{ rad}$ .

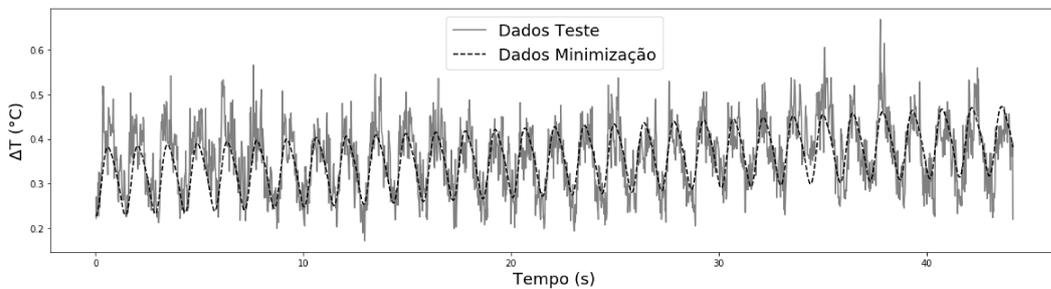


Figura B.39: Resultado do primeiro teste realizado com o corpo de prova de policarbonato. Tensão aplicada de  $5.95 \text{ MPa}$ .

A figura B.40 apresenta os resultados do segundo teste realizado com o corpo de prova de policarbonato, com uma tensão aplicada de  $10.12 \text{ MPa}$ . O intervalo de dados usado para o processo de minimização foi  $20 - 50 \text{ s}$ , e o método iterativo usado foi SLSQP. Os resultados obtidos para esse teste foram:  $T_0 = 0.332 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $D_T = 2 \text{ mK/ciclo}$ ,  $T_1 = 99.3 \text{ mK}$ ,  $T_2 = 5.8 \text{ mK}$ ,  $f = 0.514 \text{ Hz}$ ,  $\varphi_1 = 0.096 \text{ rad}$  e  $\varphi_2 = 0 \text{ rad}$ .

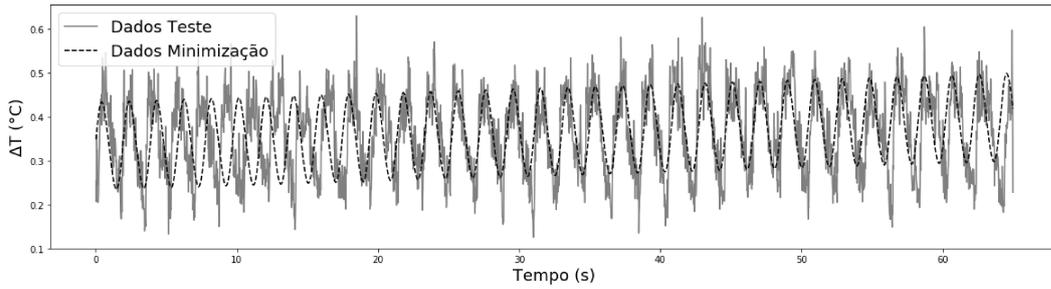


Figura B.40: Resultado do segundo teste realizado com o corpo de prova de policarbonato. Tensão aplicada de 10.12 *MPa*.

A figura B.41 apresenta os resultados do terceiro teste realizado com o corpo de prova de policarbonato, com uma tensão aplicada de 13.21 *MPa*. O intervalo de dados usado para o processo de minimização foi 20 – 50 *s*, e o método iterativo usado foi SLSQP. Os resultados obtidos para esse teste foram:  $T_0 = 0.359$  °C,  $D_T = 0.3$  mK/ciclo,  $T_1 = 133.2$  mK,  $T_2 = 31.8$  mK,  $f = 0.696$  Hz,  $\varphi_1 = -0.448$  rad e  $\varphi_2 = -3.382$  rad.

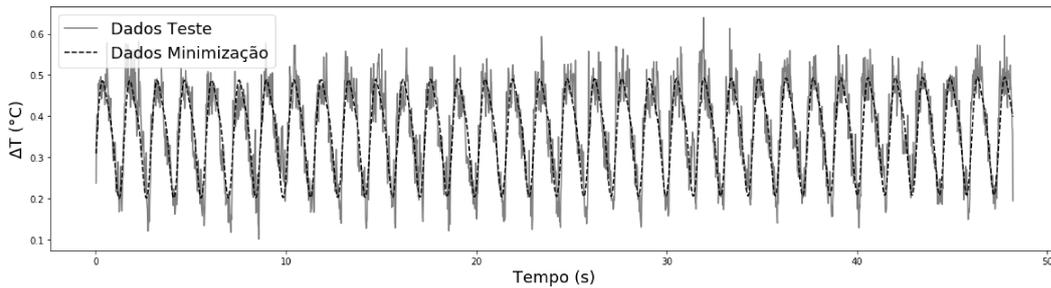


Figura B.41: Resultado do terceiro teste realizado com o corpo de prova de policarbonato. Tensão aplicada de 13.21 *MPa*.

A figura B.42 apresenta os resultados do quarto teste realizado com o corpo de prova de policarbonato, com uma tensão aplicada de 20.52 *MPa*. O intervalo de dados usado para o processo de minimização foi 20 – 50 *s*, e o método iterativo usado foi SLSQP. Os resultados obtidos para esse teste foram:  $T_0 = 0.366$  °C,  $D_T = 3$  mK/ciclo,  $T_1 = 182$  mK,  $T_2 = 42.8$  mK,  $f = 0.5$  Hz,  $\varphi_1 = -1.860$  rad e  $\varphi_2 = 0.146$  rad.

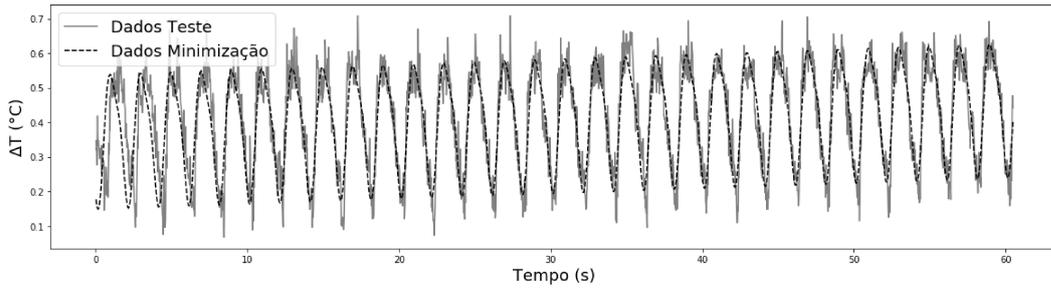


Figura B.42: Resultado do quarto teste realizado com o corpo de prova de policarbonato. Tensão aplicada de 20.52 *MPa*.

A figura B.43 apresenta os resultados do quinto teste realizado com o corpo de prova de policarbonato, com uma tensão aplicada de 24.75 *MPa*. O intervalo de dados usado para o processo de minimização foi 10 – 40 *s*, e o método iterativo usado foi SLSQP. Os resultados obtidos para esse teste foram:  $T_0 = 0.535$  °C,  $D_T = 1.6$  mK/ciclo,  $T_1 = 210$  mK,  $T_2 = 50.2$  mK,  $f = 0.696$  Hz,  $\varphi_1 = 5.187$  rad e  $\varphi_2 = 1.668$  rad.

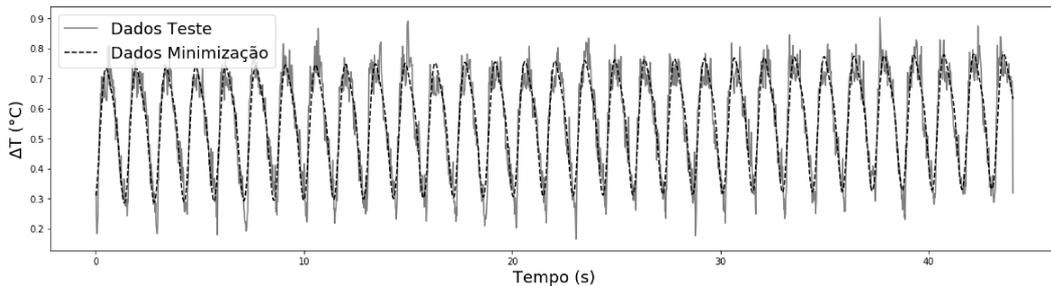


Figura B.43: Resultado do quinto teste realizado com o corpo de prova de policarbonato. Tensão aplicada de 24.75 *MPa*.

A figura B.44 apresenta os resultados do sexto teste realizado com o corpo de prova de policarbonato, com uma tensão aplicada de 35.29 *MPa*. O intervalo de dados usado para o processo de minimização foi 10 – 40 *s*, e o método iterativo usado foi SLSQP. Os resultados obtidos para esse teste foram:  $T_0 = 0.722$  °C,  $D_T = 4.7$  mK/ciclo,  $T_1 = 254.8$  mK,  $T_2 = 55.5$  mK,  $f = 0.502$  Hz,  $\varphi_1 = -0.489$  rad e  $\varphi_2 = 0.319$  rad.

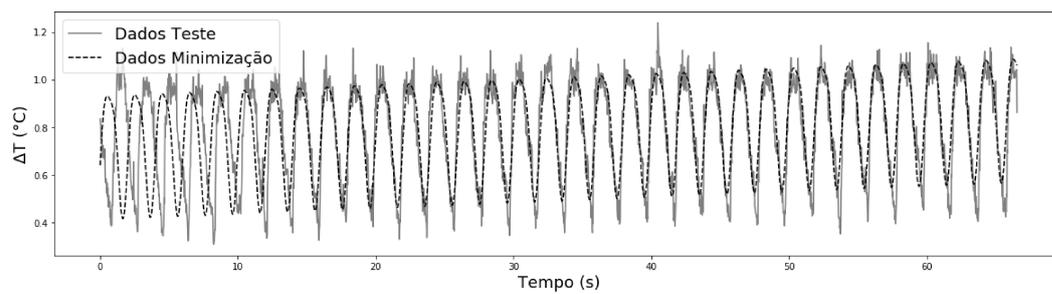


Figura B.44: Resultado do sexto teste realizado com o corpo de prova de policarbonato. Tensão aplicada de 35.29 *MPa*.

## C Elementos finitos

As tensões utilizadas para a interpretação dos resultados dos dois primeiros corpos de prova de aço vieram de uma análise de elementos finitos. A seguir serão apresentadas algumas características do modelo utilizado.

- Software: ANSYS versão 15.0
- Número de Elementos: 72360
- Número de Nós: 318231
- Tipo de análise: 3D
- Tipo de elemento: SOLID 186 (tetraédrico de 8 nós e 3 GL)

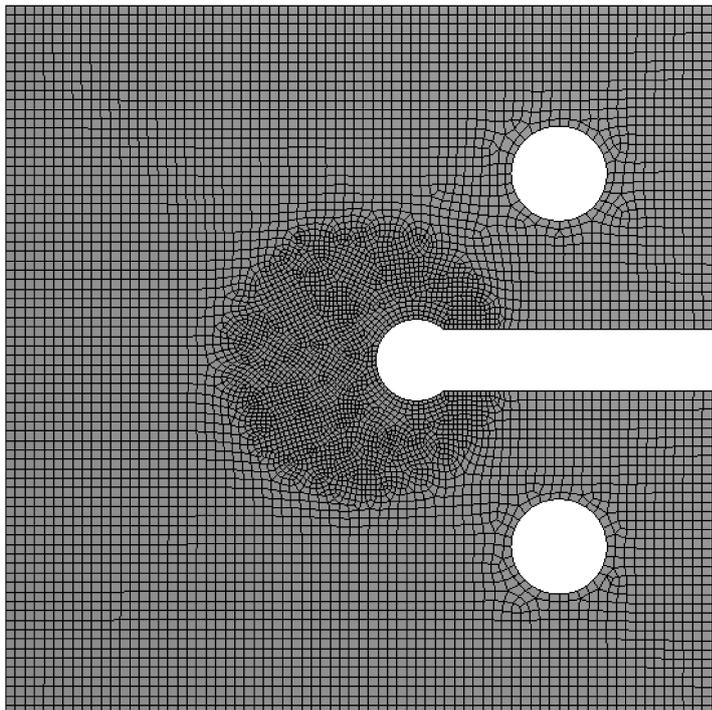


Figura C.1: Malha utilizada para a análise de elementos finitos dos dois primeiros corpos de prova de aço.

O modelo de elementos finitos do corpo de prova do tipo keyhole foi submetido a múltiplos carregamentos. A tabela C.1 contém o valor da tensão atuante no ponto crítico do corpo para alguns desses carregamentos, e as tabelas C.2 e C.3 contém os dados do último carregamento realizado.

Tempo (s)	Força (N)	$\sigma_y$ interior	$\sigma_y$ exterior	Tempo (s)	Força (N)	$\sigma_y$ interior	$\sigma_y$ exterior
0.2	200	19.08	18.15	39.2	1200	-46.22	-44.19
0.4	400	38.15	36.30	39.4	2400	63.93	61.11
0.7	700	66.77	63.53	39.7	4200	229.15	219.05
1	1000	95.38	90.75	40	6000	316.72	305.78
1.2	800	76.30	72.60	40.2	4800	206.57	200.49
1.4	600	57.22	54.44	40.4	3600	96.42	95.19
1.7	300	28.59	27.20	40.7	1800	-68.80	-62.75
2	0	0.00	0.00	41	0	-234.00	-220.66
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
6.2	400	38.13	36.28	45.2	1400	-105.52	-97.852
6.4	800	76.29	72.58	45.4	2800	22.985	24.992
6.7	1400	133.53	127.05	45.7	4900	215.74	209.26
7	2000	190.77	181.51	46	7000	326.57	317.15
7.2	1600	152.61	145.20	46.2	5600	198.06	194.31
7.4	1200	114.45	108.89	46.4	4200	69.557	71.462
7.7	600	57.21	54.43	46.7	2100	-123.2	-112.8
8	0	0.00	0.00	47	0	-315.93	-297.04
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
12.2	600	57.21	54.43	51.2	1600	-169.1	-156.68
12.4	1200	114.44	108.89	51.4	3200	-22.235	-16.285
12.7	2100	200.29	190.57	51.7	5600	198.06	194.3
13	3000	242.64	233.16	52	8000	332.64	326.59
13.2	2400	187.56	180.51	52.2	6400	185.78	186.2
13.4	1800	132.48	127.86	52.4	4800	38.912	45.81
13.7	900	49.86	48.88	52.7	2400	-181.38	-164.78
14	0	-32.72	-30.07	53	0	-344.12	-329.63
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
18.2	800	40.68	40.10	57.2	1800	-182.08	-176.74
18.4	1600	114.12	110.30	57.4	3600	-16.856	-18.798
18.7	2800	224.27	215.60	57.7	6300	230.97	218.11
19	4000	277.71	263.60	58	9000	346.21	339.25
19.2	3200	204.27	193.40	58.2	7200	180.99	181.31
19.4	2400	130.84	123.21	58.4	5400	15.765	23.369
19.7	1200	20.69	17.91	58.7	2700	-232.06	-213.54
20	0	-89.44	-87.36	59	0	-363.44	-342.84
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
24.2	1000	2.32	0.36	63.2	2000	-183.98	-174.87
24.4	2000	94.12	88.10	63.4	4000	-0.40514	0.62094
24.7	3500	231.80	219.72	63.7	7000	274.96	263.85
25	5000	302.59	289.25	64	10000	364.44	355.62
25.2	4000	210.80	201.50	64.2	8000	180.87	180.13
25.4	3000	119.01	113.76	64.4	6000	-2.7117	4.6435
25.7	1500	-18.68	-17.87	64.7	3000	-278.08	-258.59
26	0	-156.34	-149.45	65	0	-381.5	-358.05
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

Tabela C.1: Tensões atuantes no ponto crítico do corpo durante múltiplos carregamentos do modelo de elementos finitos.

Tempo (s)	Força (N)	$\sigma_y$ interior	$\sigma_y$ exterior (borda)	$\sigma_y$ interior s/ $\sigma_y$ residual	$\sigma_y$ exterior s/ $\sigma_y$ residual
67	0	-382.83	-362.65	0.00	0.00
67.2	100	-373.68	-353.9	9.15	8.75
67.4	200	-364.49	-345.12	18.34	17.53
67.7	350	-350.71	-331.95	32.12	30.70
68	500	-336.94	-318.78	45.89	43.87
68.2	600	-327.76	-310	55.07	52.65
68.4	700	-318.58	-301.23	64.25	61.42
68.7	850	-304.81	-288.07	78.02	74.58
69	1000	-291.04	-274.91	91.79	87.74
69.2	1100	-281.87	-266.13	100.96	96.52
69.4	1200	-272.69	-257.36	110.14	105.29
69.7	1350	-258.92	-244.2	123.91	118.45
70	1500	-245.15	-231.04	137.68	131.61
70.2	1600	-235.97	-222.26	146.86	140.39
70.4	1700	-226.79	-213.49	156.04	149.16
70.7	1850	-213.03	-200.33	169.80	162.32
71	2000	-199.26	-187.16	183.57	175.49
71.2	2100	-190.08	-178.39	192.75	184.26
71.4	2200	-180.9	-169.62	201.93	193.03
71.7	2350	-167.13	-156.46	215.70	206.19
72	2500	-153.37	-143.29	229.46	219.36
72.2	2600	-144.19	-134.52	238.64	228.13
72.4	2700	-135.01	-125.75	247.82	236.90
72.7	2850	-121.24	-112.59	261.59	250.06
73	3000	-107.47	-99.424	275.36	263.23
73.2	3100	-98.294	-90.65	284.54	272.00
73.4	3200	-89.116	-81.876	293.71	280.77
73.7	3350	-75.348	-68.715	307.48	293.94
74	3500	-61.58	-55.553	321.25	307.10
74.2	3600	-52.402	-46.779	330.43	315.87
74.4	3700	-43.223	-38.005	339.61	324.65
74.7	3850	-29.455	-24.844	353.38	337.81
75	4000	-15.688	-11.683	367.14	350.97
75.2	4100	-6.509	-2.909	376.32	359.74
75.4	4200	2.6696	5.8651	385.50	368.52
75.7	4350	16.437	19.026	399.27	381.68
76	4500	30.205	32.187	413.04	394.84
76.2	4600	39.384	40.961	422.21	403.61
76.4	4700	48.562	49.735	431.39	412.39
76.7	4850	62.33	62.897	445.16	425.55
77	5000	76.098	76.058	458.93	438.71
77.2	5100	85.277	84.832	468.11	447.48
77.4	5200	94.455	93.606	477.29	456.26

Tabela C.2: Tensões atuantes no ponto crítico do corpo durante o último carregamento do modelo de elementos finitos.

Tempo (s)	Força (N)	$\sigma_y$ interior	$\sigma_y$ exterior (borda)	$\sigma_y$ interior s/ $\sigma_y$ residual	$\sigma_y$ exterior s/ $\sigma_y$ residual
77.7	5350	108.22	106.77	491.05	469.42
78	5500	121.99	119.93	504.82	482.58
78.2	5600	131.17	128.7	514.00	491.35
78.4	5700	140.35	137.48	523.18	500.13
78.7	5850	154.12	150.64	536.95	513.29
79	6000	167.88	163.8	550.71	526.45
79.2	6100	177.06	172.57	559.89	535.22
79.4	6200	186.24	181.35	569.07	544.00
79.7	6350	200.01	194.51	582.84	557.16
80	6500	213.78	207.67	596.61	570.32
80.2	6600	222.95	216.44	605.78	579.09
80.4	6700	232.13	225.22	614.96	587.87
80.7	6850	245.9	238.38	628.73	601.03
81	7000	259.67	251.54	642.50	614.19
81.2	7100	268.85	260.31	651.68	622.96
81.4	7200	278.03	269.09	660.86	631.74
81.7	7350	291.79	282.25	674.62	644.90
82	7500	305.56	295.41	688.39	658.06
82.2	7600	314.74	304.18	697.57	666.83
82.4	7700	323.92	312.96	706.75	675.61
82.7	7850	337.69	326.12	720.52	688.77
83	8000	351.45	339.28	734.28	701.93
83.2	8100	359.26	348.06	742.09	710.71
83.4	8200	361.26	357.05	744.09	719.70
83.7	8350	363.48	362.94	746.31	725.59
84	8500	365.41	363.34	748.24	725.99
84.2	8600	366.61	363.61	749.44	726.26
84.4	8700	367.75	363.86	750.58	726.51
84.7	8850	369.68	364.25	752.51	726.90
85	9000	371.56	364.35	754.39	727.00
85.2	9100	372.71	364.32	755.54	726.97
85.4	9200	373.58	364.33	756.41	726.98
85.7	9350	375.07	364.41	757.90	727.06
86	9500	376.52	364.21	759.35	726.86
86.2	9600	377.41	364.19	760.24	726.84
86.4	9700	378.19	364.18	761.02	726.83
86.7	9850	379.25	364.22	762.08	726.87
87	10000	380.21	364.3	763.04	726.95

Tabela C.3: Tensões atuantes no ponto crítico do corpo durante o último carregamento do modelo de elementos finitos (CONT.).

$$\sigma_{nom} = \frac{P}{A} + \frac{Mc}{I} \tag{C-1}$$

Utilizando os dados das tabelas C.2 e C.3, em conjunto com equação (C-1), usada para calcular a tensão nominal  $\sigma_{nom}$  para cada carga  $P$ , foi calculado o valor do fator de concentração de tensão  $K_t$  para alguns carregamentos.

P [N]	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000
$\sigma_{nom}$ [MPa]	36.6	73.2	110	146	183	220	256	293
$\sigma_{max}$ [MPa]	91.8	184	275	367	459	551	643	734
$K_t$	2.51	2.51	2.51	2.51	2.51	2.51	2.51	2.51

Tabela C.4: Fator de concentração de tenção  $K_t$ .

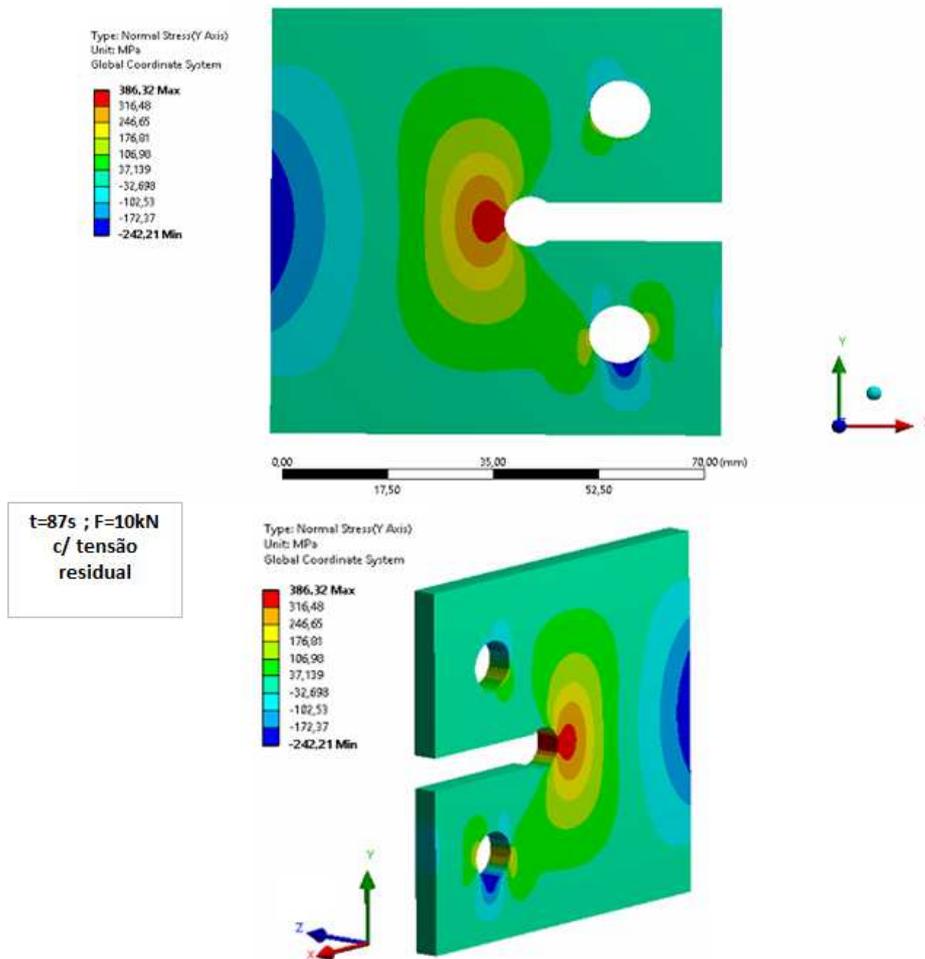


Figura C.2: Mapa de tensões do modelo de elementos finitos quando carregado com 10 kN.