



Luiz Cezar Mendes da Silva

**Avaliação de componentes sob carregamento
quase estático usando termografia por
infravermelho**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

Orientador: Prof. José Luiz de França Freire

Rio de Janeiro
Outubro de 2021



Luiz Cezar Mendes da Silva

**Avaliação de componentes sob carregamento
quase estático usando termografia por
infravermelho**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio. Aprovado pela Comissão Examinadora.

Prof. José Luiz de França Freire

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. Arthur Martins Barbosa Braga

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Dr. Vitor Eboli Lopes Paiva

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Dr. Giancarlo Luis Gómez Gonzáles

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 7 de Outubro de 2021

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial deste trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Luiz Cezar Mendes da Silva

O autor é formado em Licenciatura em Física pela Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, em 2009 e em Engenharia Mecânica pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, PUC-Rio, em 2017.

Ficha Catalográfica

Mendes, Luiz Cezar

Avaliação de componentes sob carregamento quase estático usando termografia por infravermelho / Luiz Cezar Mendes da Silva; Orientador: Prof. José Luiz de França Freire – 2021.

159 f: il.(color); 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 2021.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia Mecânica – Teses. Limite de escoamento; Limite de fadiga; Método quase estático IR; Termografia infravermelha; Temperatura mínima característica. I. Freire, José Luiz de França. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD: 621

A minha esposa Ida Ferreira, pelo amor, suporte e encorajamento.

Agradecimentos

Antes de começar os agradecimentos, é preciso localizar os futuros leitores em relação ao momento em que este trabalho foi desenvolvido. Ele começou antes e terminou durante a pandemia de COVID-19, no ano de 2021. Mais de 4 milhões de pessoas perderam suas vidas, inclusive meu primo, Edésio Vieira Gomes e o pai de um amigo, senhor José Edmilson. Assim eles terão real noção da energia necessária para completar esta pesquisa. Fica aqui minha homenagem.

Este trabalho só foi possível pela graça de Deus. Tenho grande gratidão à Ti, pela oportunidade de desenvolver essa dissertação.

À minha esposa Ida Ferreira, muito obrigado pelo amor, suporte e encorajamento;

À minha filha Valentina Ferreira Mendes, mesmo sem saber, ela foi de muito importância, pois trouxe-me alegrias infinitas;

Aos meus pais Luiz da Silva Sobrinho (in memoriam) e Carli Mendes da Silva, seus ensinamentos serão eternos;

Às minhas irmãs, Leila e Regina que mesmo distantes devido a pandemia, se fizeram presentes, sempre me incentivando;

Ao meu orientador, professor José Luiz de França Freire, muito obrigado pelo apoio, dedicação, orientações e incentivo nessa jornada;

Aos doutores Giancarlo Luis Gómez Gonzáles e Vitor Eboli Lopes Paiva, sem eles não haveriam dados para serem analisados e esta dissertação não teria existido.

À toda equipe do Laboratório de Fotomecânica da PUC-Rio, pelo suporte, logística e oportunidade para desenvolver a dissertação.

Aos meus amigos da PUC-Rio representados aqui pelo, André Xavier, Edson Sabino e Jonathan Aguiar. Os esforços de vocês me inspirava em cada momento de fraqueza. Muito obrigado pela ajuda de cada um. Vocês sabem que essa conquista é nossa;

Ao corpo técnico do departamento de engenharia mecânica da PUC-Rio, obrigado pelos bons serviços prestados durante o desenvolvimento dessa obra.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Resumo

Mendes, Luiz Cezar; Freire, José Luiz de França (Orientador). **Avaliação de componentes sob carregamento quase estático usando termografia por infravermelho**. Rio de Janeiro, 2021. 159p. Dissertação de Mestrado — Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A termografia por infravermelho (TIV) tem sido usada como ferramenta de avaliação não destrutiva para detectar falhas em componentes estruturais, desempenhando um papel importante nos programas de inspeção, de fabricação e manutenção. A TIV também pode ser aplicada para avaliar limites de fadiga para materiais estruturais a partir de testes de tensão cíclica uniaxial ou de tração uniaxial quase-estáticos.

Recentemente, o método quase-estático para medir o limite de fadiga via TIV, foi estendido para estados de tensão biaxial atuando na superfície de corpos de prova de tamanho real de dutos com anomalias geométricas. Os resultados mostraram que o método biaxial quase-estático previu satisfatoriamente a localização de pontos críticos para a iniciação da fadiga em espécimes tubulares com mochas.

Neste trabalho, as distribuições de tensões e deformações nos pontos críticos foram determinadas usando correlação de imagens digitais (DIC), aplicada a sete espécimes “dog bone”, padrão uniaxial, e oito espécimes de dutos de três metros de comprimento com tampas de cabeça plana fabricados a partir de tubos de aço API 5L Grau B. A determinação do estado de deformação superficial via DIC e a determinação das variações de temperatura correspondentes para os pontos do material de superfície observados ao longo dos testes, permitiram determinar não apenas o limite de fadiga do material, mas também o que conveniou-se chamar de temperatura mínima característica (TMC).

Os testes uniaxiais usando espécimes “dog bone” para o mesmo material indicam que as TMCs medidas estão intimamente relacionadas com o limite de escoamento do material (MYS).

Esta pesquisa destaca as observações experimentais relacionadas às medidas de tensão-deformação-temperatura no início do escoamento em pontos observados em ensaios uniaxiais e biaxiais. O objetivo deste trabalho é usar o monitoramento da temperatura de estruturas sob carga crescente quase-estática para prever a que “distância” do início do MYS estão os estados de tensão dos pontos observados.

Palavras-chave

Limite de escoamento; Limite de fadiga; Método quase estático IR; Termografia infravermelha; Temperatura mínima característica.

Abstract

Mendes, Luiz Cezar; Freire, José Luiz de França (Advisor). **Assessment of structural Components subjected to quasi-static loading using infrared thermography**. Rio de Janeiro, 2021. 159p. Dissertação de Mestrado — Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Infrared thermography (IRT) has been applied in several areas of science. Particularly in the field of engineering, which has proven to be an excellent tool in non-destructive evaluations of structural components. In addition, IRT has also been applied to assess fatigue limits for structural materials from uniaxial cyclic stress tests or quasi-static uniaxial tensile tests.

Recently, the quasi-static method to measure the fatigue limit via IRT was extended to biaxial stress states acting on the surface of real size pipeline specimens with dents. The results showed that the quasi-static biaxial method satisfactorily predicted the location of the hot spots for fatigue initiation in tubular specimens with dents.

In this dissertation, the strain distributions at the critical points were determined from mechanical test using digital image correlation (DIC) applied to seven uniaxial standard “dog bone” and eight 3-meter-long pipeline specimens with plane headed caps fabricated from API 5L Grade B steel. The determination of the deformation state via DIC and the corresponding temperature variations for observed points on the material surface allowed to determine not only the material endurance limit, but also what may be called as the characteristic minimum temperature (TMC). Uniaxial tests using “dog bone” specimens for the same material indicate that the measured TMC are closely related to the material yield strength (MYS).

This work brings originality in the definition and determination of the TMC point. In uniaxial tests the TMC point is determined through the temperature-strain-stress curves, while in biaxial tests, it is located in the temperature-pressure-strain curves.

Keywords

Characteristic minimum temperature; Fatigue limit; Yield strength; Infrared Thermography; IR Quase-Static.

Sumário

1	Introdução	24
1.1	Motivação	26
1.2	Objetivo	27
1.3	Apresentação da dissertação	28
2	Revisão teórica dos assuntos abordados	29
2.1	Termografia	29
2.1.1	Princípios Físicos	31
2.1.2	Sensores termográficos	34
2.1.3	Termografia Ativa, Passiva e o Efeito Termoelástico	35
2.1.4	Método Risitano quase estático para determinação do Limite de fadiga	37
2.1.5	Revisão de literatura	40
3	Metodologia	50
3.1	Procedimentos	50
3.2	Ensaio com estado de tensão uniaxial	53
3.3	Ensaio com estado de tensão biaxial	57
3.4	Definição do ponto da Temperatura Mínima Característica (TMC)	61
3.5	Definição da Zona da Temperatura Mínima Característica (ZTMC)	63
3.6	Questionamentos	64
4	Resultados e discussões	66
4.1	Resultados do ensaio com estado de tensão uniaxial	66
4.1.1	Primeira Série (Primeiro 1%)	66
4.1.2	Segunda Série (Segundo 1%)	67
4.1.3	Terceira Série (Terceiro 1%)	70
4.1.4	Quarta Série (3%)	73
4.1.5	Quinta Série (5%)	75
4.1.6	Discussões do ensaio com estado de tensão uniaxial	78
4.2	Resultados do ensaio com estado de tensão biaxial	79
4.2.1	Limite de Fadiga encontrados nos ensaios biaxiais	79
4.2.2	Valores encontrados no ponto da TMC nos ensaios biaxiais	81
4.2.2.1	Resultados do primeiro método aplicado para determinar o ponto da TMC	83
4.2.2.2	Resultados do segundo método aplicado para determinar o ponto da TMC	87
4.2.2.3	Resultados do terceiro método aplicado para determinar o ponto da TMC	87
4.2.2.4	Resultados da Zona da Temperatura Mínima Característica (ZTMC)	92
5	Conclusões	98
	Referências Bibliográficas	100
A	Revisão teórica	104

A.1	Relações entre tensões e deformações	104
A.2	Escoamento	106
A.3	Encruamento	107
B	Gráficos do ensaio biaxial. Espécime 1.	110
B.1	Determinações do ponto da TMC e da ZTMC. Espécime 1. Ponto E.	110
B.2	Gráfico das deformações em função da pressão. Espécime 1. Ponto E.	113
B.3	Determinações do ponto da TMC e da ZTMC. Espécime 1. Ponto F.	114
B.4	Gráfico das deformações em função da pressão. Espécime 1. Ponto F.	116
C	Gráficos do ensaio biaxial. Espécime 2.	117
C.1	Determinações do ponto da TMC e da ZTMC. Espécime 2. Ponto A.	117
C.2	Gráfico das deformações em função da pressão. Espécime 2. Ponto A.	120
D	Gráficos do ensaio biaxial. Espécime 4.	121
D.1	Determinações do ponto da TMC e da ZTMC. Espécime 4. Ponto A.	121
D.2	Gráfico das deformações em função da pressão. Espécime 4. Ponto A.	124
E	Gráficos do ensaio biaxial. Espécime 5.	125
E.1	Determinações do ponto da TMC e da ZTMC. Espécime 5. Ponto E.	125
E.2	Gráfico das deformações em função da pressão. Espécime 5. Ponto E.	128
E.3	Determinações do ponto da TMC e da ZTMC. Espécime 5. Ponto F.	129
E.4	Gráfico das deformações em função da pressão. Espécime 5. Ponto F.	131
F	Gráficos do ensaio biaxial. Espécime 6.	132
F.1	Determinações do ponto da TMC e da ZTMC. Espécime 6. Ponto E.	132
F.2	Gráfico das deformações em função da pressão. Espécime 6. Ponto E.	135
F.3	Determinações do ponto da TMC e da ZTMC. Espécime 6. Ponto F.	136
F.4	Gráfico das deformações em função da pressão. Espécime 6. Ponto F.	138
G	Gráficos do ensaio biaxial. Espécime 7.	139
G.1	Determinações do ponto da TMC e da ZTMC. Espécime 7. Ponto E.	139
G.2	Gráfico das deformações em função da pressão. Espécime 7. Ponto E.	142
G.3	Determinações do ponto da TMC e da ZTMC. Espécime 7. Ponto F.	143
G.4	Gráfico das deformações em função da pressão. Espécime 7. Ponto F.	145
H	Gráficos do ensaio biaxial. Espécime 8.	146
H.1	Determinações do ponto da TMC e da ZTMC. Espécime 8. Ponto E.	146
H.2	Gráfico das deformações em função da pressão. Espécime 8. Ponto E.	149
H.3	Determinações do ponto da TMC e da ZTMC. Espécime 8. Ponto F.	150
H.4	Gráfico das deformações em função da pressão. Espécime 8. Ponto F.	152
I	Gráficos do ensaio biaxial. Espécime 9.	153
I.1	Determinações do ponto da TMC e da ZTMC. Espécime 9. Ponto E.	153
I.2	Gráfico das deformações em função da pressão. Espécime 9. Ponto E.	156
I.3	Determinações do ponto da TMC e da ZTMC. Espécime 9. Ponto F.	157
I.4	Gráfico das deformações em função da pressão. Espécime 9. Ponto F.	159

Lista de Figuras

1.1	Câmera FLIR A655sc, usada para aplicação da termografia por infravermelho. (FLIR, n.d.d).	25
1.2	Curvas tensão-deformação e de temperatura-deformação, onde S_L é o limite de fadiga para $R = -1$, σ_{Mises} é a tensão equivalente de von Mises no ponto da temperatura mínima característica.	27
2.1	Espectro eletromagnético. (Gregorio-Hetem <i>et al.</i> , n.d.).	29
2.2	Diagrama esquemático do funcionamento de um câmera termográfica. (Muniz & Mendes, 2019).	30
2.3	Exemplo de imagem formada pela termografia por infravermelho em uns dos dutos ensaiados neste trabalho. (Adaptado de Paiva, 2020).	30
2.4	Exemplo de imagem formada pela termografia infravermelha em contadoras e disjuntores. (Adaptado de Carvalho, n.d.).	31
2.5	Distribuição espectral da excitância de corpos à temperatura de (100 a 5.800 K). (Muniz & Mendes, 2019).	32
2.6	Diagrama da radiação que chega na câmera.	33
2.7	Absortividade da atmosfera.(Adaptado de UFPR, n.d.).	34
2.8	Dois tipos de câmeras termográficas, uma quântica e a outra não-quântica. (Adaptado de FLIR, n.d.a) e (Adaptado de FLIR, n.d.b).	35
2.9	Exemplo de um sistema infravermelho para termografia ativa. (Target, n.d.).	36
2.10	Exemplo de um sistema infravermelho para termografia passiva (Target, n.d.).	36
2.11	Desenho esquemático da tensão aplicada e da variação de temperatura durante um ensaio estático. (Adaptado de Colombo <i>et al.</i> , 2012).	38
2.12	Curvas tensão-deformação e de temperatura-deformação, onde σ_0 é o limite de fadiga para $R = -1$. (Adaptado de Risitano & Risitano, 2013).	40
2.13	Contém imagens do ensaio realizado por La Rosa e Risitano. (La Rosa & Risitano, 2000).	41
2.14	Variações térmicas: (a) em um ponto de espécime não entalhado (primeira série). (b) nos pontos da amostra com orifício de 8 mm (segundo conjunto). (Clienti <i>et al.</i> , 2010).	42
2.15	a) Curvas de evolução da temperatura. b) Imagens termográficas do espécime. (Adaptado de Risitano <i>et al.</i> , 2010).	43
2.16	Espécime 2; Teste estático de tração monoaxial. Carga padrão vs deslocamento da barra transversal (linha azul) e T vs tempo (linha vermelha). (Risitano <i>et al.</i> , 2011).	44
2.17	Gráfico de tensão e variação de temperatura em função do tempo, para testes estáticos para um corpo de prova. (Colombo <i>et al.</i> , 2012).	45

2.18	a) Mapa de magnitude TSA. b) Gráfico de linha crítica para espécime de CR inferior $\Delta\sigma = 8,18$ MPa. (Adaptado de Vieira, 2016).	46
2.19	Imagem do espécime visto a partir da câmera térmica; (a) Sem isolamento térmico; (b) Com isolamento térmico. (Adaptado de Manhães, 2016).	46
2.20	Gráfico da tensão alternada do C36000 vs. tensão média para Gerber, Goodman e termográfica. (Rego, 2017)	47
2.21	As curvas azuis e cinza correspondem à temperatura, sendo que a azul é considerada a sua fase linear e a cinza o resto da curva. A curva vermelha corresponde à tensão. (CP estático 1). (Lemos, 2017).	48
2.22	Método quase estático IR aplicado a mosca 6 ponto E. (Paiva, 2020).	49
3.1	Geometria do espécime “dog bone”.	50
3.2	Geometria do duto.	51
3.3	Processo de criação da mosca: a) o corpo de prova é colocado na sela e alinhado com o indetador; b) o indetador é deslocado para produzir a mosca inicial; c) o penetrador é gradualmente retirado; d) a forma final da mosca inicial; e) o perfil da mosca é medido com um paquímetro; f) a mosca longitudinal plana obtida após re arredondamento. (Paiva, 2020).	51
3.4	Tipos de moscas: a) com duas concavidades; b) com uma concavidade. (Adaptado de Paiva, 2020).	53
3.5	Câmera FLIR A655sc empregada nos ensaios (Adaptado de FLIR, n.d.d), e a lente IV Close-up 5.8x(100 μ m) (Adaptado de FLIR, n.d.c).	54
3.6	(a) Em detalhe a câmera focando o corpo de prova fixado na máquina servo-hidráulica para realização do ensaio. (b) Configuração do ensaio de tração com utilização da TIV do corpo de prova 7.	55
3.7	Gráfico da tensão em função da deformação, acrescentado da variação da temperatura em função da deformação. Corpo de prova 7, primeira série. Limite de fadiga 230 MPa e Tensão da TMC de 310 MPa.	56
3.8	Gráfico da tensão em função da deformação, acrescentado da variação da temperatura em função da deformação. Corpo de prova 7, quinta série. Limite de fadiga 258 MPa e Tensão na TMC de 420 MPa.	56
3.9	a) Parte do duto 6 pintado de preto para análise termográfica e com pequenos pontos brancos para permitir a análise via DIC. b) Execução da calibração. (Paiva, 2020).	57
3.10	Configuração do ensaio nos dutos. (Adaptado de Paiva, 2020).	58
3.11	Gráfico da pressão x deformação do espécime 6, ponto E.	59
3.12	Gráfico da pressão x tensão do espécime 6, ponto E.	59
3.13	Gráfico da Pressão e Temperatura em função do Tempo em detalhes. Espécime 4, ponto A. Primeiro método aplicado para determinar o ponto da temperatura mínima característica.	61

3.14	Gráfico da Pressão e Temperatura em função do Tempo. Espécime 4, ponto A. Segundo método aplicado para determinar o ponto da temperatura mínima característica.	62
3.15	Gráfico da Pressão e Temperatura em função do Tempo. Espécime 4, ponto A. Terceiro método aplicado para determinar o ponto da TMC.	62
3.16	Gráfico da temperatura e deformação em função da pressão. Espécime 7, ponto F. Segundo método sobreposto a nuvem de temperatura.	63
3.17	Gráfico da pressão e temperatura em função do Tempo. Espécime 1, ponto E. Determinação da ZTMC.	64
4.1	Gráfico da tensão em função de deformação, acrescido da temperatura. Corpo de prova 7, primeira série. $S_L = 230$ MPa, $E = 200$ GPa, $\sigma_{Mises} = 310$ MPa no ponto da TMC e $\sigma_{MYS} = 400$ MPa.	67
4.2	Gráfico da temperatura e deformação em função da tensão. Corpo de prova 7, primeira série. $S_L = 230$ MPa, $E = 200$ GPa, $\sigma_{Mises} = 310$ MPa no ponto da TMC e $\sigma_{MYS} = 400$ MPa.	67
4.3	Gráfico da temperatura e deformação em função da tensão. Corpo de prova 7, segunda série. $S_L = 240$ MPa, $E = 183$ GPa, $\sigma_{Mises} = 390$ MPa no ponto da TMC e $\sigma_{MYS} = 420$ MPa.	68
4.4	Gráfico da temperatura e deformação em função da tensão. Corpo de prova 7, segunda série. $S_L = 240$ MPa, $\sigma_{Mises} = 390$ MPa no ponto da TMC e $\sigma_{MYS} = 420$ MPa.	68
4.5	Gráfico da tensão e temperatura em função da deformação. Corpo de prova 7, primeira e segunda séries juntas.	69
4.6	Representa o diagrama tensão-deformação para as duas séries sobrepostas. $E = 200$ GPa referente a primeira série e $E = 183$ GPa para segunda.	70
4.7	Gráfico da tensão em função de deformação, acrescido da temperatura. Corpo de prova 7, terceira série. Limite de fadiga 250 MPa, tensão no "cotovelo" da curva de temperatura 400 MPa e limite de escoamento no valor de 430 MPa.	71
4.8	Gráfico da temperatura e deformação em função da tensão. Corpo de prova 7, terceira série. Limite de fadiga 250 MPa, tensão no ponto da TMC 400 MPa e Limite de escoamento 430 MPa.	71
4.9	Gráfico da tensão e temperatura em função da deformação. Corpo de prova 7. Primeira, segunda e terceira séries juntas.	72
4.10	Gráfico da tensão e temperatura em função da deformação. Corpo de prova 7, quarta série. Limite de fadiga de 245 MPa, tensão no ponto da TMC de 410 MPa e limite de escoamento de 433 MPa.	73
4.11	Gráfico da temperatura e deformação em função da tensão. Corpo de prova 7, quarta série. Limite de fadiga 245 MPa, tensão no ponto da TMC 410 MPa e Limite de escoamento 433 MPa.	74
4.12	Gráfico da tensão e temperatura em função da deformação. Corpo de prova 7. Primeira, segunda, terceira e quarta séries juntas.	74

4.13	Gráfico da tensão e temperatura em função da deformação. Corpo de prova 7, quinta série. Limite de fadiga de 258 MPa, tensão no ponto da TMC de 420 MPa e limite de escoamento de 450 MPa.	75
4.14	Gráfico da temperatura e deformação em função da tensão. Corpo de prova 7, quinta série. Limite de fadiga 258 MPa e Limite de escoamento 450 MPa.	76
4.15	Gráfico da tensão e temperatura em função da deformação. Corpo de prova 7. Todas as séries juntas.	76
4.16	Gráfico da tensão e temperatura em função da deformação. Corpo de prova 7. Todas as séries juntas.	77
4.17	Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Espécime 4, ponto A. O ponto da TMC está relacionado com uma pressão de 1,12 MPa, cuja $\sigma_{Mises_TMC} = 408$ MPa e $\varepsilon_{Mises_TMC} = 0,2\%$.	82
4.18	Gráfico da pressão e temperatura em função da deformação. Espécime 4, ponto A. O ponto da TMC está relacionado com uma pressão de 1,05 MPa, cuja $\sigma_{Mises_TMC} = 382$ MPa.	82
4.19	Gráfico da pressão e temperatura em função da deformação. Espécime 4, ponto A. O ponto da TMC está relacionado com uma pressão de 1,00 MPa, cuja $\sigma_{Mises_TMC} = 364$ MPa.	83
4.20	Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Espécime 6, ponto E. O ponto da TMC está relacionado com uma pressão de 4,0 MPa, cuja $\varepsilon_{Mises} = 0,47\%$. Para a $\sigma_{MYS} = 450$ MPa encontrada no ensaio uniaxial, a $\varepsilon_{Mises} = 0,25\%$.	86
4.21	Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Espécime 6, ponto F. O ponto da TMC está relacionado com uma pressão de 3,90 MPa, cuja $\varepsilon_{Mises} = 0,49\%$. Para a $\sigma_{MYS} = 450$ MPa encontrado no ensaio uniaxial, a $\varepsilon_{Mises} = 0,26\%$.	87
4.22	Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo do espécime 1 ponto E. Nota-se os valores das σ_{Mises} e ε_{Mises} nos lados esquerdo e direito da ZTMC.	92
A.1	Máquina para condução do ensaio de tração usada nesta dissertação. INSTRON 5500R do Laboratório de Ensaos Mecânicos da PUC-Rio, LEM.	105
A.2	Comportamento tensão-deformação típico de um metal.	106
A.3	Métodos aplicados para determinar os limites de escoamentos com deformação permanente de 0,2% ou 0,5%.	107
A.4	Diagrama esquemático tensão-deformação em tração mostrando os fenômenos de recuperação da deformação elástica e de encruamento. (Adaptado de Callister Jr & Rethwisch, 2016).	108
B.1	Duto 1, ponto E. Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Primeiro método para determinar o ponto da TMC.	110
B.2	Duto 1, ponto E. Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Segundo método para determinar o ponto da TMC.	111
B.3	Duto 1, ponto E. Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Terceiro método para determinar o ponto da TMC.	111
B.4	Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo do espécime 1 ponto E. Determinação da ZTMC.	112

B.5	Gráfico das deformações ε_1 , ε_2 e ε_{Mises} em função da pressão. Espécime 1 ponto <i>E</i> .	113
B.6	Duto 1, ponto F. Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Primeiro método para determinar o ponto da TMC.	114
B.7	Duto 1, ponto F. Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Segundo método para determinar o ponto da TMC.	114
B.8	Duto 1, ponto F. Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Terceiro método para determinar o ponto da TMC.	115
B.9	Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo do espécime 1 ponto <i>F</i> . Determinação da ZTMC.	115
B.10	Gráfico das deformações ε_1 , ε_2 e ε_{Mises} em função da pressão. Espécime 1 ponto <i>F</i> .	116
C.1	Duto 2, ponto A. Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Primeiro método para determinar o ponto da TMC.	117
C.2	Duto 2, ponto A. Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Segundo método para determinar o ponto da TMC.	118
C.3	Duto 2, ponto A. Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Terceiro método para determinar o ponto da TMC.	118
C.4	Duto 2, ponto A. Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Determinação da ZTMC.	119
C.5	Gráfico das deformações ε_1 , ε_2 e ε_{Mises} em função da pressão. Espécime 2 ponto <i>A</i> .	120
D.1	Duto 4, ponto A. Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Primeiro método para determinar o ponto da TMC.	121
D.2	Gráfico da pressão e temperatura em função da deformação. Espécime 4, ponto A. O ponto da TMC está relacionado com uma pressão de 1,05 MPa, cuja $\sigma_{Mises_TMC} = 382$ MPa.	122
D.3	Gráfico da pressão e temperatura em função da deformação. Espécime 4, ponto A. O ponto da TMC está relacionado com uma pressão de 1,00 MPa, cuja $\sigma_{Mises_TMC} = 364$ MPa.	122
D.4	Duto 4, ponto A. Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Determinação da ZTMC.	123
D.5	Gráfico das deformações ε_1 , ε_2 e ε_{Mises} em função da pressão. Espécime 4 ponto <i>A</i> .	124
E.1	Duto 5, ponto E. Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Primeiro método para determinar o ponto da TMC.	125
E.2	Duto 5, ponto E. Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Segundo método para determinar o ponto da TMC.	126
E.3	Duto 5, ponto E. Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Terceiro método para determinar o ponto da TMC.	126
E.4	Duto 5, ponto E. Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Terceiro método para determinar o ponto da TMC.	127
E.5	Gráfico das deformações ε_1 , ε_2 e ε_{Mises} em função da pressão. Espécime 5, ponto <i>E</i> .	128
E.6	Duto 5, ponto F. Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Primeiro método para determinar o ponto da TMC.	129

E.7	Duto 5, ponto F. Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Segundo método para determinar o ponto da TMC.	129
E.8	Duto 5, ponto F. Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Terceiro método para determinar o ponto da TMC.	130
E.9	Duto 5, ponto F. Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Determinação da ZTMC.	130
E.10	Gráfico das deformações ε_1 , ε_2 e ε_{Mises} em função da pressão. Espécime 5, ponto F.	131
F.1	Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Espécime 6, ponto E. Primeiro método para determinação do ponto da TMC.	132
F.2	Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Espécime 6, ponto E. Segundo método para determinação do ponto da TMC.	133
F.3	Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Espécime 6, ponto E. Terceiro método para determinação do ponto da TMC.	133
F.4	Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Espécime 6, ponto E. Determinação da ZTMC	134
F.5	Gráfico das deformações ε_1 , ε_2 e ε_{Mises} em função da pressão. Espécime 6, ponto E.	135
F.6	Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Espécime 6, ponto F. Primeiro método para determinação do ponto da TMC.	136
F.7	Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Espécime 6, ponto F. Segundo método para determinação do ponto da TMC.	136
F.8	Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Espécime 6, ponto F. Terceiro método para determinação do ponto da TMC.	137
F.9	Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Espécime 6, ponto F. Determinação da ZTMC.	137
F.10	Gráfico das deformações ε_1 , ε_2 e ε_{Mises} em função da pressão. Espécime 6, ponto F.	138
G.1	Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Espécime 7, ponto E. Primeiro método para determinação do ponto da TMC.	139
G.2	Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Espécime 7, ponto E. Segundo método para determinação do ponto da TMC.	140
G.3	Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Espécime 7, ponto E. Terceiro método para determinação do ponto da TMC.	140
G.4	Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Espécime 7, ponto E. Determinação da ZTMC.	141
G.5	Gráfico das deformações ε_1 , ε_2 e ε_{Mises} em função da pressão. Espécime 7, ponto E.	142
G.6	Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Espécime 7, ponto F. Primeiro método para determinação do ponto da TMC.	143
G.7	Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Espécime 7, ponto F. Segundo método para determinação do ponto da TMC.	143
G.8	Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Espécime 7, ponto F. Terceiro método para determinação do ponto da TMC.	144
G.9	Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Espécime 7, ponto F. Determinação da ZTMC.	144

G.10	Gráfico das deformações ε_1 , ε_2 e ε_{Mises} em função da pressão. Espécime 7, ponto F .	145
H.1	Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Espécime 8, ponto E . Primeiro método para determinação do ponto da TMC.	146
H.2	Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Espécime 8, ponto E . Segundo método para determinação do ponto da TMC.	147
H.3	Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Espécime 8, ponto E . Terceiro método para determinação do ponto da TMC.	147
H.4	Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Espécime 8, ponto E . Determinação da ZTMC.	148
H.5	Gráfico das deformações ε_1 , ε_2 e ε_{Mises} em função da pressão. Espécime 8, ponto E .	149
H.6	Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Espécime 8, ponto F . Primeiro método para determinação do ponto da TMC.	150
H.7	Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Espécime 8, ponto F . Segundo método para determinação do ponto da TMC.	150
H.8	Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Espécime 8, ponto F . Terceiro método para determinação do ponto da TMC.	151
H.9	Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Espécime 8, ponto F . Determinação da ZTMC.	151
H.10	Gráfico das deformações ε_1 , ε_2 e ε_{Mises} em função da pressão. Espécime 8, ponto F .	152
I.1	Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Espécime 9, ponto E . Primeiro método para determinação do ponto da TMC.	153
I.2	Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Espécime 9, ponto E . Segundo método para determinação do ponto da TMC.	154
I.3	Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Espécime 9, ponto E . Terceiro método para determinação do ponto da TMC.	154
I.4	Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Espécime 9, ponto E . Determinação da ZTMC.	155
I.5	Gráfico das deformações ε_1 , ε_2 e ε_{Mises} em função da pressão. Espécime 9, ponto E .	156
I.6	Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Espécime 9, ponto F . Primeiro método para determinação do ponto da TMC.	157
I.7	Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Espécime 9, ponto F . Segundo método para determinação do ponto da TMC.	157
I.8	Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Espécime 9, ponto F . Terceiro método para determinação do ponto da TMC.	158
I.9	Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Espécime 9, ponto F . Determinação da ZTMC	158
I.10	Gráfico das deformações ε_1 , ε_2 e ε_{Mises} em função da pressão. Espécime 9, ponto F .	159

Lista de Tabelas

3.1	Dados do material: Aço API 5L Grau B (Paiva <i>et al.</i> , 2020).	50
3.2	Profundidades das moissas antes e depois do re arredondamento (Paiva, 2020).	52
3.3	Razão da biaxialidade dos pontos analisados.	60
4.1	Valores do Limite de Fadiga encontrados através do método quase-estático. Corpo de prova 7. Ensaio uniaxial.	78
4.2	Valores da tensão e variação da deformação nos pontos da TMC.	79
4.3	Limite de fadiga para $R = -1$, determinados através do MEF por Paiva (2020).	80
4.4	Valores do limite de fadiga determinados através da deformações medidas pelo ensaio DIC, nos pontos determinados por (Paiva, 2020).	81
4.5	Valores das pressões, das σ_{Mises} e das ε_{Mises} determinadas através do primeiro método para determinar o ponto da TMC. Ponto <i>A</i> dos espécimes 2 e 4.	84
4.6	Valores das pressões, das σ_{Mises} e das ε_{Mises} determinadas através do primeiro método para determinar o ponto da TMC. Ponto <i>E</i> dos espécimes 1, 5, 7, 8 e 9.	85
4.7	Valores das pressões, das σ_{Mises} e das ε_{Mises} determinadas através do primeiro método para determinar o ponto da TMC. Ponto <i>F</i> dos espécimes 1, 5, 7, 8 e 9.	85
4.8	Apresenta as médias das σ_{Mises} e das ε_{Mises} determinadas pelo primeiro método para determinar o ponto da TMC. Pontos <i>E</i> e <i>F</i> .	86
4.9	Valores das pressões, das σ_{Mises} e das ε_{Mises} determinadas através do segundo método para determinar o ponto da TMC, no ponto <i>A</i> dos espécimes 2 e 4.	88
4.10	Valores das pressões, das σ_{Mises} e das ε_{Mises} determinadas através do segundo método para determinar o ponto da TMC, no ponto <i>E</i> dos espécimes 1, 5, 7, 8 e 9.	88
4.11	Valores das pressões, das σ_{Mises} e das ε_{Mises} determinadas através do segundo método para determinar o ponto da TMC. Ponto <i>F</i> dos espécimes 1, 5, 7, 8 e 9.	89
4.12	Apresenta as médias das σ_{Mises} e das ε_{Mises} determinadas pelo segundo método para determinar o ponto da TMC. Pontos <i>E</i> e <i>F</i> .	89
4.13	Valores das pressões, das σ_{Mises} e das ε_{Mises} determinadas através do terceiro método para determinar o ponto da TMC, no ponto <i>A</i> dos espécimes 2 e 4.	90
4.14	Valores das pressões, das σ_{Mises} e das ε_{Mises} determinadas através do terceiro método para determinar o ponto da TMC, no ponto <i>E</i> dos espécimes 1, 5, 7, 8 e 9.	90
4.15	Valores das pressões, das σ_{Mises} e das ε_{Mises} determinadas através do terceiro método para determinar o ponto da TMC, no ponto <i>F</i> dos espécimes 1, 5, 7, 8 e 9.	91
4.16	Apresenta as médias das σ_{Mises} e das ε_{Mises} determinadas pelo terceiro método para definir o ponto da TMC. Pontos <i>E</i> e <i>F</i> .	91

4.17	Valores das pressões, σ_{Mises} e ε_{Mises} . Espécimes 2 e 4, extremidade esquerda da ZTMC, ponto A.	93
4.18	Valores das pressões, σ_{Mises} e ε_{Mises} . Extremidade esquerda da ZTMC. Pontos <i>E</i> e <i>F</i> . Os valores em destaque com asterisco (*), espécime 6, não fizeram parte da média. O valor da σ_{Mises} no ponto <i>E</i> do espécime 6 foi superior ao limite de escoamento do material no ensaio uniaxial, cujo o valor é de 450 MPa, cf. Seção 4.1.5.	94
4.19	Valores das pressões, σ_{Mises} e ε_{Mises} . Espécimes 2 e 4, extremidade direita da ZTMC, ponto A.	95
4.20	Valores das pressões e ε_{Mises} . Extremidade direita da ZTMC. Pontos <i>E</i> e <i>F</i> . Os valores destacados com asterisco (*), espécime 6, não fizeram parte da média, pois os valores da σ_{Mises} nos pontos <i>E</i> e <i>F</i> do espécime 6 foram superiores ao limite de escoamento do material no ensaio uniaxial, cujo valor é de 450 MPa (cf. Seção 4.1.5).	96

Lista de Símbolos

Abreviaturas

σ_{MYS} Resistência ao escoamento

CTDUT Centro de Tecnologia em Dutos

DIC Correlação de Imagens Digitais (Digital Image Correlation)

ETs Espécimes tubulares

IRT Infrared thermography

LEM Laboratório de Ensaios Mecânicos da PUC-Rio

MEF Método de Elementos Finitos

MYS Limite de escoamento do material (Material yield strenght)

M Limite de proporcionalidade

NDE Non-destructive evaluation

TIV Termografia por infravermelho

TMC Temperatura mínima característica

TSA Técnica termográfica de análise de tensões (“Thermoelastic Stress Analysis”)

ZTMC Zona da temperatura mínima característica

Variáveis

α Coeficiente de expansão térmica

Δl Variação do comprimento

ΔT Diferença de temperatura

κ Constante de Boltzmann

λ Comprimento de onda

μ Coeficiente de Poisson

ρ	Massa específica do material
σ	Tensão
σ_1	Tensão principal
σ_2	Tensão principal
σ_a	Tensão alternada
σ_{l0}	Resistência ao escoamento inicial
σ_{li}	Resistência ao escoamento após a liberação da carga
σ_l	Resistência ao escoamento
σ_{max}	Tensão máxima
σ_{min}	Tensão mínima
σ_{Mises_TMC}	Tensão equivalente de von mises no ponto da temperatura mínima característica
σ_{Mises}	Tensão equivalente de von Mises
σ_{MYS}	Tensão do limite de escoamento
σ_m	Tensão média
ε	Deformação
ε_1	Deformação principal
ε_2	Deformação principal
ε_λ	Emissividade espectral
ε_{Mises_TMC}	Deformação equivalente de von mises no ponto da temperatura mínima característica
ε_{Mises}	Deformação equivalente de von Mises
A_0	Área da seção transversal original
c	Velocidade da luz
C_p	Calor específico
E	Módulo de elasticidade, ou módulo de Young

F	Força
h	Constante de Planck
l_0	Comprimento original
l_i	Comprimento instantâneo
$M_\lambda(T)$	Excitância espectral
$M_{bb,\lambda}$	Excitância radiante de um corpo negro
R	Razão de tensão cíclica
S_L	Limite de fadiga
T	Temperatura
T_0	Temperatura inicial

*Lembre-se que as pessoas podem tirar tudo de
você, menos o seu conhecimento*

Albert Einstein.

.

1

Introdução

Esta pesquisa está inserida na área de integridade estrutural. Pode-se dizer que os métodos de avaliação de integridade estrutural têm por finalidade verificar a adequação das estruturas às suas finalidades, ou seja, avaliar a segurança, confiabilidade, durabilidade e condições de utilização das mesmas. Quanto maior for a eficiência do método, maior será a economia na implantação e manutenção de plantas industriais, na construção civil e em sistemas de transportes através de dutos.

Em sua maioria as estruturas são projetadas para assegurar que ocorram apenas deformações elásticas quando sujeitas a algum tipo de carregamento. Um componente estrutural que tenha sido deformado plasticamente, ou que tenha sofrido mudança permanente em sua forma, pode não ser capaz de funcionar como projetado. É de extrema importância conhecer os níveis de tensão e de deformação aonde ocorrem deformações plásticas para prevenir falhas mecânicas em componentes estruturais, seja por fadiga ou escoamento generalizado, tanto pela parte econômica quanto para preservar vidas e o meio ambiente.

Esta pesquisa converge com a necessidade de prevenção de falhas mecânicas, pois está relacionada diretamente com uma análise da integridade estrutural de componentes mecânicos de forma mais eficiente, contribuindo para o desenvolvimento de novos métodos para análise estrutural. Ela é uma continuação da linha de pesquisa sobre integridade estrutural usando termografia por infravermelho, desenvolvida no laboratório de Fotomecânica da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio).

Este trabalho está dividido em duas partes. A primeira envolvendo tensões uniaxiais, com realização de ensaios de tração usando termografia por infravermelho (TIV) em corpos de provas. Estes ensaios foram conduzidos no Laboratório de Ensaios Mecânicos (LEM) da PUC-Rio. A segunda parte considera estados de tensão biaxiais, com ensaios sob carregamento quase-estático usando a correlação de imagem digital (DIC) e a TIV em componentes estruturais; dutos – fabricados com o mesmo material do corpo de prova, aço API 5L Grau B. Estes ensaios foram realizados no centro tecnológico

destinado à área de dutos e terminais (CTDUT), fruto de uma parceria entre Petrobras, Transpetro e PUC-Rio. Embora o autor tenha participado de algumas atividades no CTDUT, o mesmo não esteve presente nos ensaios aplicados nos dutos, porém o mesmo se debruçou para analisar os dados que lhe foram fornecidos para o desenvolvimento desta pesquisa.

A aplicação da termografia por infravermelho se deu através de uma câmera de alta resolução de classe científica FLIR A655sc, Figura 1.1. As informações técnicas da câmera são apresentadas na Seção 3.2. Os dados de temperatura foram adquiridos e analisados usando o software ResearchIR da FLIR (FLIR, n.d.d).



Figura 1.1: Câmera FLIR A655sc, usada para aplicação da termografia por infravermelho. (FLIR, n.d.d).

Nos ensaios de tração foram determinadas as distribuições de tensões e deformações nos pontos críticos de corpos de provas do tipo dog bone. Suas dimensões são detalhadas na Figura 3.1, Seção 3. Com aplicação da TIV, a temperatura da superfície do corpo de prova foi registrada em tempo real. Foi possível determinar um ponto denominado temperatura mínima característica (TMC), que está intimamente relacionado com o limite de escoamento do material (MYS).

Posteriormente, oito espécimes tubulares (ETs), contendo anomalias geometrias tipo mossas (os detalhes da sua geometria são apresentados no Capítulo 3, na Figura 3.2). Os ETs foram fabricados a partir de tubos de aço API 5L Grau B – mesmo material do corpo de prova. Os ETs foram pressurizados com carregamentos quase estático. Os dados das deformações nos pontos críticos foram medidos por ensaio de correlação de imagem digital (DIC)¹. Assim como no ensaio de tração, foi aplicada a TIV e as temperaturas

¹Os dados dos ensaios DIC foram fornecidos pelo doutor Giancarlo Luis Gómez Gonzáles (PUC-Rio). Eles estão contidos no relatório do projeto.

em partes selecionadas da superfície dos componentes foram registradas em tempo real².

A determinação do estado de deformação superficial via DIC e as variações de temperatura correspondentes para os pontos da superfície dos ETs observados ao longo dos testes permitiram determinar não apenas o limite de fadiga do material, mas também o que conveniu-se chamar de temperatura mínima característica (TMC). Além deste ponto, foi possível determinar parte da região de transição da deformação elástica para a plástica. Esta região foi denominada zona de temperatura mínima característica (ZTMC).

Esta pesquisa comparou os valores das tensões e das deformações obtidos no ensaio de tração em corpos de provas dog bone com os valores encontrados nos ETs, procurando verificar se as deformações e tensões encontradas nos pontos das TMCs nos ETs têm valores similares aos encontrados nos pontos da TMCs dos corpos de provas dog bone.

1.1

Motivação

Neste trabalho é empregada a termografia por infravermelho (TIV), mais especificamente o método quase-estático (Risitano *et al.*, 2011) em componentes mecânicos. Com esse método é possível encurtar o tempo de obter informações valiosas, como o limite da fadiga (S_L) e o nível de dano que a peça está sofrendo.

Luong (1998) destacou algumas vantagens da utilização da TIV: (a) é uma técnica não destrutiva; (b) permite aquisição de dados em tempo real e (c) não necessita de contato com o corpo de prova. Soma-se a isso, o fato do método quase-estático necessitar de pequeno número de corpos de provas para mensurar o limite de fadiga e ser aplicado diretamente na estrutura. Sua praticidade e menor custo, quando comparado aos métodos tradicionais para determinação do limite de fadiga, também são fatores importantes que contribuem para seu emprego.

Na Figura 1.2 é apresentado o diagrama tensão-deformação-temperatura, do ensaio de tração, onde foi aplicado do método quase-estático no corpo de prova dog bone. No diagrama são destacados o ponto do S_L e o ponto da TMC. Foi evidenciado nos ensaios uniaxiais e biaxiais que a curva de temperatura tem um certo comportamento que vale a pena ser investigado. Um destes tem sido estudado que é o S_L do material, o outro é o ponto de mínimo da

²Os dados dos ensaios da TIV foram fornecidos pelo doutor Vitor Eboli Lopes Paiva (PUC-Rio). Eles estão contidos também no relatório do projeto.

curva de temperatura, que aparentemente está relacionado com o momento de escoamento do ponto analisado, e por conta disso, procurou-se:

1. Melhorar as observações dos ensaios uniaxiais e biaxiais por meio do diagrama tensão-deformação-temperatura.
2. A literatura fala sobre o S_L , mas não do ponto de mínimo da curva da temperatura (TMC). Quais informações podemos obter deste ponto?

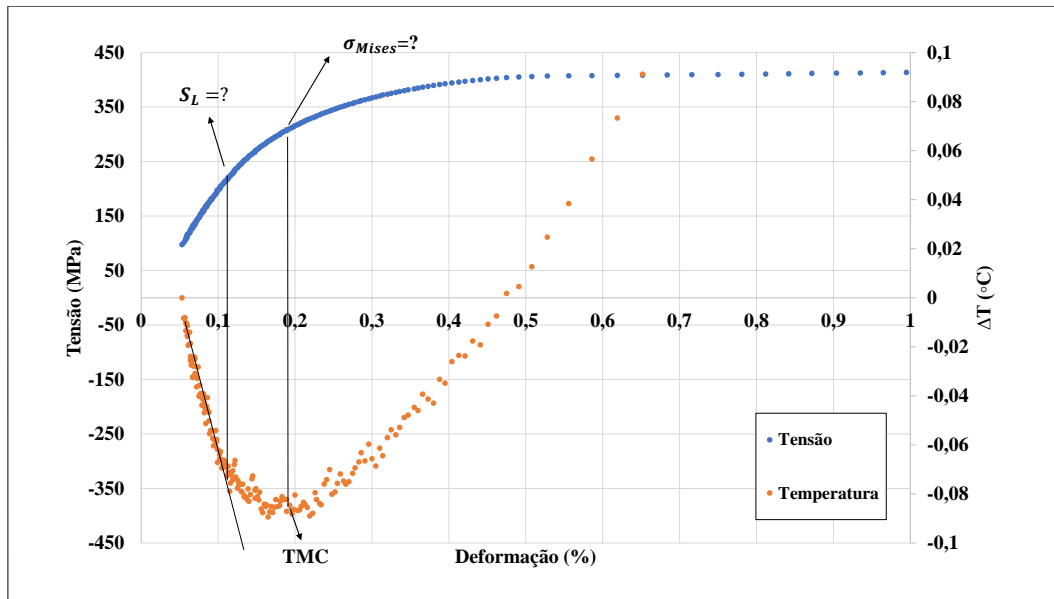


Figura 1.2: Curvas tensão-deformação e de temperatura-deformação, onde S_L é o limite de fadiga para $R = -1$, σ_{Mises} é a tensão equivalente de von Mises no ponto da temperatura mínima característica.

Além da motivação em relação ao próprio método aplicado, existe a motivação de fazer parte de um grande projeto, onde os resultados e conclusões gerados são compartilhados e analisados nesta dissertação. Alguns alunos de graduação, mestrado e doutorado deixaram sua contribuição neste projeto, tornando-se possível o desenvolvimento do assunto abordado. Assim como eles, o autor espera agregar valor com os resultados obtidos nesta dissertação.

1.2 Objetivo

Dado a relevância da análise estrutural em componentes mecânicos, esta pesquisa têm como objetivo global contribuir para o desenvolvimento de futuras técnicas de análise estrutural de componentes mecânicos através da aplicação da termografia por infravermelho, contribuindo assim para melhorar a análise estrutural, prevenindo falhas e consequentemente preservando vidas e o meio ambiente.

Outro ponto relevante desta pesquisa é comparar o valor de limite de fadiga encontrado por Paiva (2020), por meio do método Risitano quase-estático aplicado em seis corpos de provas, com o valor determinada através do ensaio realizado em um único corpo de prova, através do mesmo método, aplicado mais recentemente no corpo de prova sete (CP-7), (Paiva *et al.*, 2021).

Determinar S_L do aço API 5L Grau B através dos ensaios biaxiais, por meio das informações do ensaio de Correlação de Imagens Digitais (DIC).

Esta pesquisa usa as observações experimentais relacionadas às medidas de tensão-deformação-temperatura no início do escoamento em pontos de componentes submetidos a testes uniaxiais e biaxiais. O objetivo principal deste trabalho é usar o monitoramento da temperatura de estruturas sob carga crescente quase-estática para prever a que “distância” do início do escoamento (MYS) estão os estados de tensão dos pontos observados. Para isso, são analisados dois questionamentos:

1. Quais são as tensões e deformações equivalentes de von Mises no ponto mínimo da curva de temperatura nos ensaios uniaxiais e biaxiais?
2. As deformações nesses pontos, em ambos os ensaios, sugerem o escoamento do material?

1.3

Apresentação da dissertação

No Capítulo 2, é apresentado a parte teórica dos assuntos abordados nesta dissertação, além da revisão dos trabalhos mais atuais e relevantes na área da termografia aplicada ao estudo da fadiga.

Toda a metodologia desenvolvida é apresentada no Capítulo 3. Nela são detalhados as geometrias do corpo de prova e do componente mecânico. Os desenvolvimentos dos ensaios são descritos neste capítulo também.

Os resultados dos ensaios realizados nos corpos de prova e dos componentes mecânicos, assim como as discussões destes resultados são abordados no Capítulo 4.

As conclusões desta dissertação juntamente com as respostas aos questionamentos bordados no Capítulo 3 são apresentados no Capítulo 5. Os apêndices apresentam as relações entre tensão-deformação e as análises gráficas dos ETs.

2

Revisão teórica dos assuntos abordados

Neste capítulo serão abordados a termografia por infravermelho, o método quase-estático e a revisão de literatura.

2.1

Termografia

A termografia por infravermelho (TIV), que atua na faixa da radiação infravermelha, é uma técnica de aquisição e análise de informações térmicas a partir de imagens obtidas a distância, ou seja, sem contato (Jadin & Taib, 2012). Emprega instrumentos denominados termovisores ou câmeras termográficas (Muniz & Mendes, 2019). A Figura 2.1 mostra a localização da radiação infravermelha no espectro de luz, enquanto a Figura 2.2 mostra um diagrama esquemático do funcionamento de um câmera termográfica.

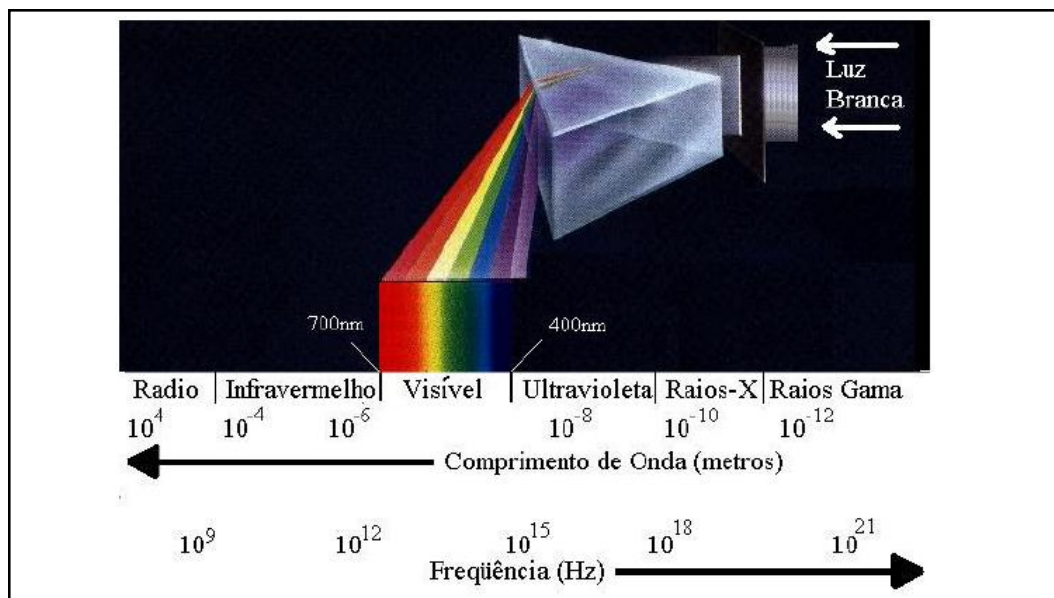


Figura 2.1: Espectro eletromagnético. (Gregorio-Hetem *et al.*, n.d.).

Na área industrial a termografia por infravermelho pode ser aplicada em diversos locais, como por exemplos em painéis, instalações elétricas, cabines elétricas, motores, acoplamentos, tanques, edifícios, tubulações, dutos, etc. Neste trabalho ela foi empregada em dutos com anomalias tipo mossas e em

ensaio de tração detalhados na Capítulo 3. As Figuras 2.3 e 2.4 apresentam exemplos de imagens formadas com a referida técnica.

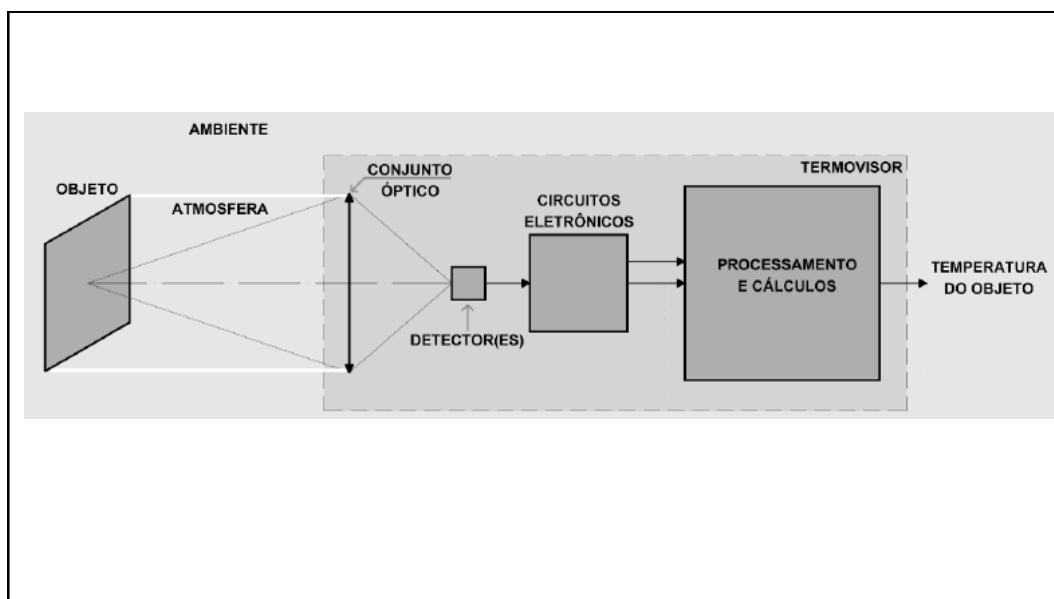


Figura 2.2: Diagrama esquemático do funcionamento de uma câmera termográfica. (Muniz & Mendes, 2019).

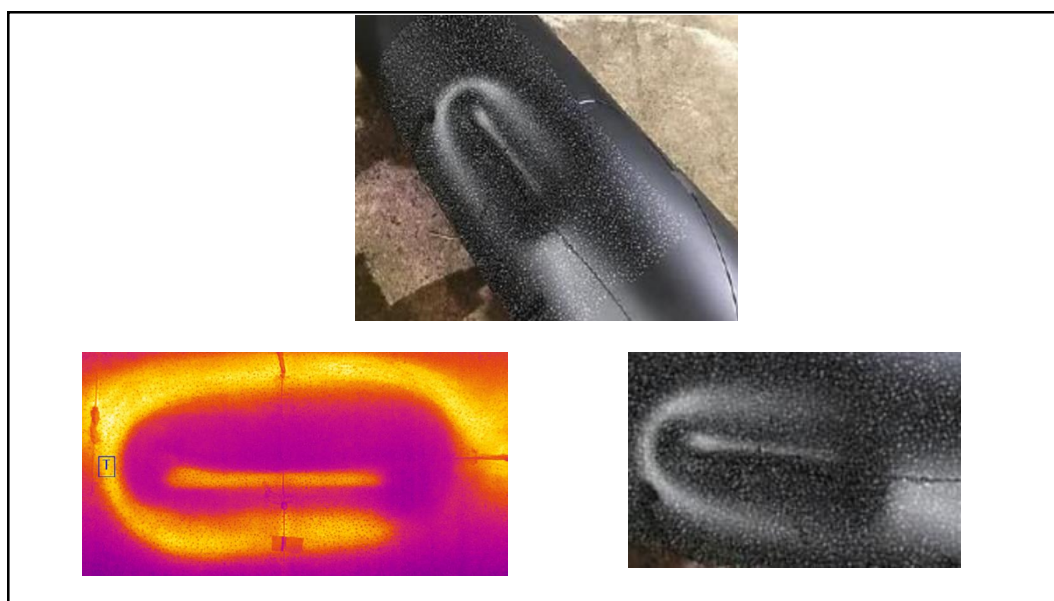


Figura 2.3: Exemplo de imagem formada pela termografia por infravermelho em uns dos dutos ensaiados neste trabalho. (Adaptado de Paiva, 2020).

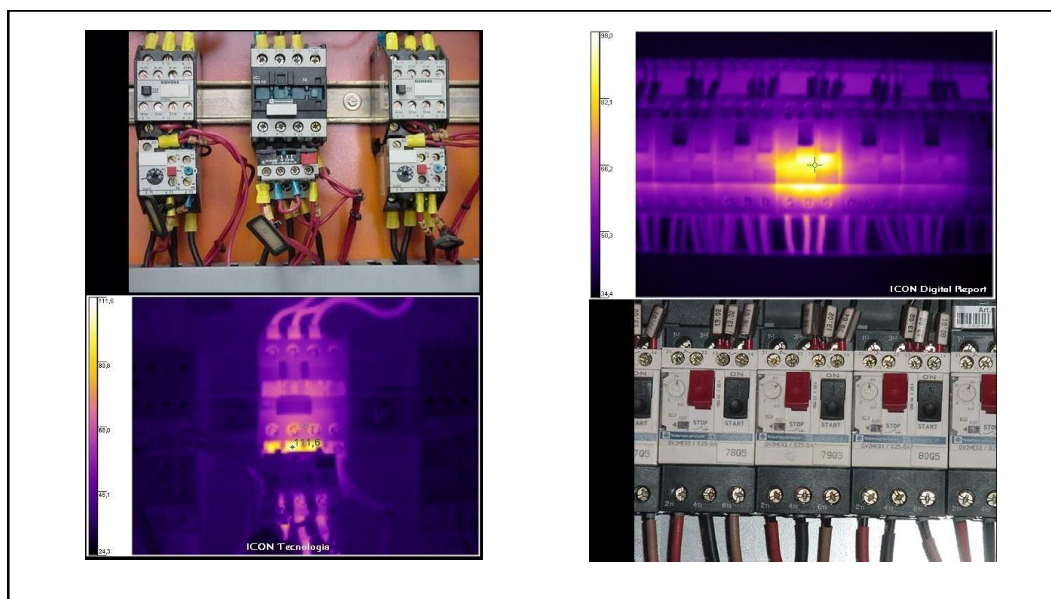


Figura 2.4: Exemplo de imagem formada pela termografia infravermelha em contadoras e disjuntores. (Adaptado de Carvalho, n.d.).

2.1.1

Princípios Físicos

De acordo com o International Lighting Vocabulary, publicado pelo IEC (International Electrotechnical Commission), a radiação eletromagnética contida acima da faixa destinada à comunicação via rádio e abaixo dos raios X é denominada radiação óptica. Assim, a radiação óptica é definida como a radiação com comprimentos de onda entre 1 nm e 1 mm. A radiação óptica é subdividida em três escalas: infravermelha, visível e ultravioleta (Muniz & Mendes, 2019).

Quando se utiliza a radiação infravermelha emitida pelos corpos para estimativa de suas temperaturas, é comum o uso do termo “radiação térmica”. Esse termo é aplicado à energia térmica emitida pelos meios (sólidos, líquidos e gasosos) relacionada às oscilações e transições dos elétrons que, por sua vez, estão relacionadas à temperatura do meio.

A termografia se baseia no fato de que todos os corpos com temperatura acima do zero absoluto transmitem radiação térmica, radiação que inclui comprimentos de onda classificados como infravermelho (1 nm e 1 mm). Quanto maior for a temperatura do objeto, mais acentuada será a potência de sua radiação emitida. A distribuição espectral da radiação térmica, em função do comprimento de onda, emitida por um radiador ideal (corpo negro) é descrita pela Lei de Planck, 2.1

$$M_{\lambda}(T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{\frac{hc}{\lambda \kappa T}} - 1)}, \quad (2.1)$$

sendo $M_{\lambda}(T)$ a excitância espectral dada em $Wm^{-2}\mu m^{-1}$, T a temperatura absoluta do objeto (corpo negro) dado em K , h a constante de Planck ($6,62606957 \cdot 10^{-34} Js$), c é a velocidade da luz no vácuo ($2,99792458 \cdot 10^8 ms^{-1}$), λ o comprimento de onda analisado (em μm) e κ a constante de Boltzmann ($1,3806488 \cdot 10^{-23} JK^{-1}$), (Muniz & Mendes, 2019). Pode-se construir o gráfico da excitância em função do comprimento de onda, como visto na Figura 2.5.

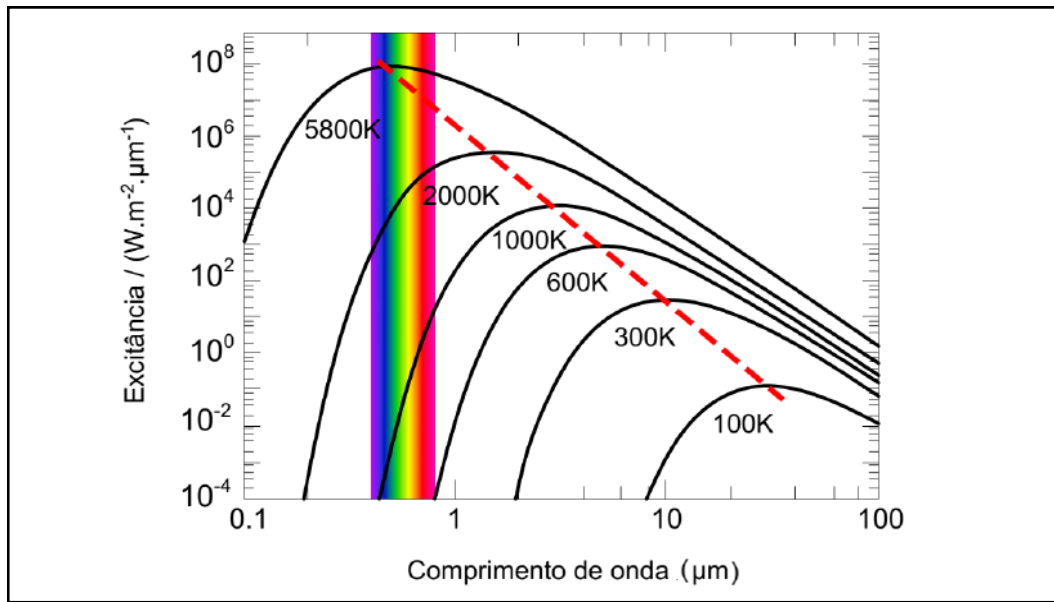


Figura 2.5: Distribuição espectral da excitância de corpos à temperatura de (100 a 5.800 K). (Muniz & Mendes, 2019).

Quando é desenvolvida a Lei de Planck desde as temperaturas ambientes até a temperatura solar, chega-se à conclusão de que a excitância espectral assume seus valores máximos na faixa de comprimento de onda de 1 a 20 μm , faixa que está contida no espectro infravermelho, como visualizado na Figura 2.1. Observe na Seção 2.1.5 que as câmeras usadas nas pesquisas operam justamente nas frequências contidas nessa faixa, a câmera utilizada nesta obra, apresenta uma faixa de operação de 7,5 a 14 μm , Seção. 3.2.

Ampliando a Lei de Planck para todos os objetos, deve-se considerar as propriedades radiantes de cada objeto sob análise. A uma mesma temperatura, corpos reais emitem radiação menor do que a emitida por radiadores perfeitos (corpo negro). Em função disso, a propriedade “emissividade espectral” é definida como a comparação entre a excitância emitida pelo objeto analisado e a excitância emitida por um corpo negro, ambos à mesma temperatura,

$$\varepsilon_\lambda = \frac{M_\lambda}{M_{bb,\lambda}}, \quad (2.2)$$

onde M_λ é a excitância radiante do objeto analisado no comprimento de onda λ em $Wm^{-2}\mu m^{-1}$ e $M_{bb,\lambda}$ é a excitância radiante de um corpo negro à mesma temperatura do objeto analisado no comprimento de onda λ em $Wm^{-2}\mu m^{-1}$ (Muniz & Mendes, 2019).

Através da integração da lei de Planck, obtêm-se a lei de Steffan-Boltzmann,

$$I = \varepsilon_c k T^4, \quad (2.3)$$

onde I é a intensidade total da radiação emitida pelo corpo, ε_c é a emissividade do corpo, $k = 5,67 \cdot 10^{-8} Wm^{-2}K^{-4}$ (constante de Stefan-Boltzmann) e T é a temperatura absoluta do corpo.

A câmera termográfica a partir da Lei de Planck, e considerando a radiação que chega nela, irá mensurar a temperatura do objeto. Porém, entre a superfície do objeto analisado e a câmera, existe a atmosfera do ambiente, esta também absorve, transmite e reflete energia. A Figura 2.6 mostra as radiações que chegam na câmera.

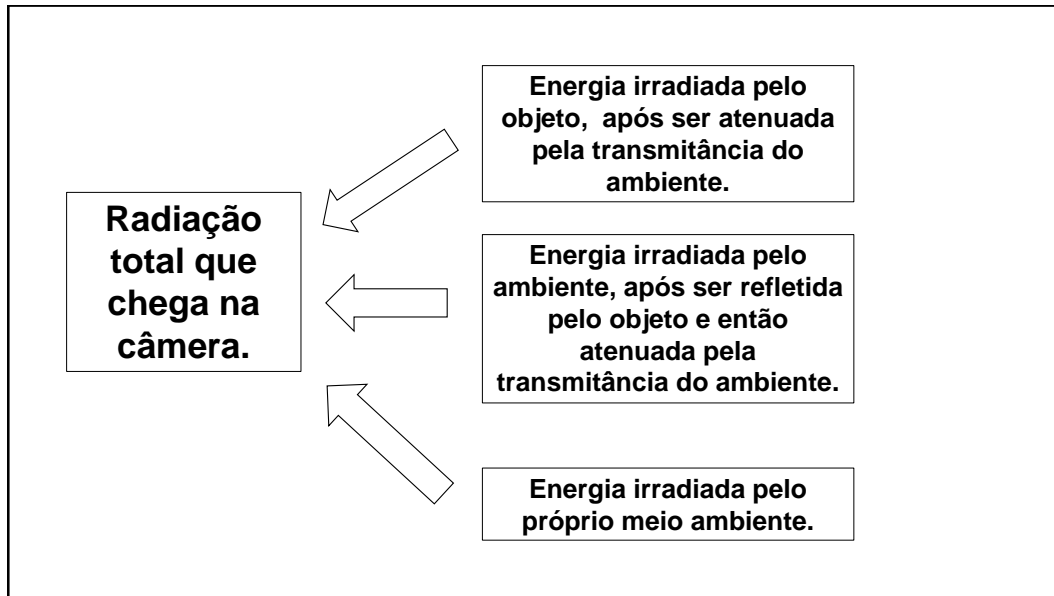


Figura 2.6: Diagrama da radiação que chega na câmera.

2.1.2

Sensores termográficos

Basicamente as câmeras de termografia são divididas em dois grupos, um que utiliza sensores quânticos e bolométricos. Antes de definir cada uma, se faz necessário a compreensão das chamadas “janelas atmosféricas”.

As “janelas atmosféricas” são intervalos de comprimentos de onda específicos que quase não são absorvidos pelo ambiente. Elas estão compreendidas entre 3-5 μm e 8-14 μm , são apresentadas na Figura 2.7.



Figura 2.7: Absortividade da atmosfera.(Adaptado de UFPR, n.d.).

Os sensores bolométricos, não-quânticos, são feitos de materiais que respondem a radiação infravermelha através de um aumento de temperatura. Este aumento causa uma mudança na resistência do material, que é então medida. Esses sensores não precisam de refrigeração, isso torna essas câmeras menores e mais baratas em relação as câmeras quânticas. Porém, é restrita apenas a uma “janela atmosférica”, referente aos comprimentos de ondas entre 8-14 μm .

Os sensores quânticos são feitos de materiais que respondem a radiação infravermelha absorvendo fótons. Com essa absorção, ocorre alteração de energia do átomo, ele salta para um estado de maior energia. Essa mudança gera uma variação na condutividade, que é medida. Estes sensores precisam de resfriamento. São mais sensíveis e precisos quando comparados aos sensores não-quânticos, e, por isso são mais caros. Podem funcionar em ambas as janelas atmosféricas.

A Figura 2.8 apresenta os dois tipos de câmeras descritos. Uma quântica e a outra não-quântica. Esta última foi usada nesta pesquisa, a FLIR A655sc.



Figura 2.8: Dois tipos de câmeras termográficas, uma quântica e a outra não-quântica. (Adaptado de FLIR, n.d.a) e (Adaptado de FLIR, n.d.b).

2.1.3

Termografia Ativa, Passiva e o Efeito Termoelástico

A TIV pode ser dividida em duas vertentes que são aplicadas na inspeção de um material, uma denominada ativa e a outra passiva.

A termografia ativa consiste na utilização de uma fonte de energia externa de modo a produzir contraste térmico em materiais que se encontram em equilíbrio com o ambiente. A Figura 2.9 possui exemplo de um sistema infravermelho para termografia ativa.

A termografia passiva não necessita de qualquer fonte de excitação artificial, pois neste caso o material analisado emite radiação infravermelha para ser detectado e analisado. A Figura 2.10 apresenta exemplo de um sistema infravermelho para termografia passiva.

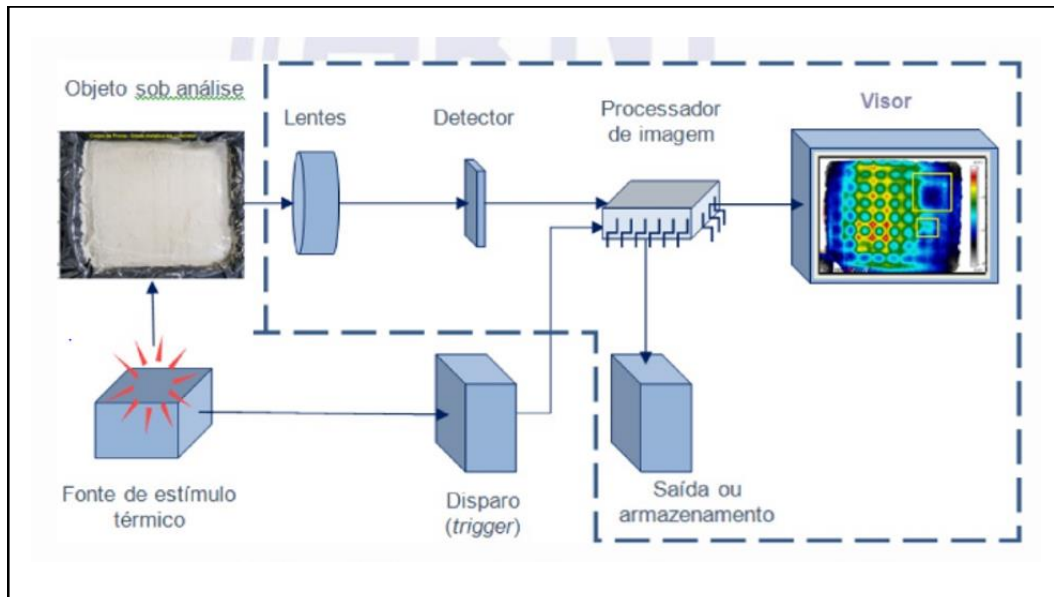


Figura 2.9: Exemplo de um sistema infravermelho para termografia ativa. (Target, n.d.).

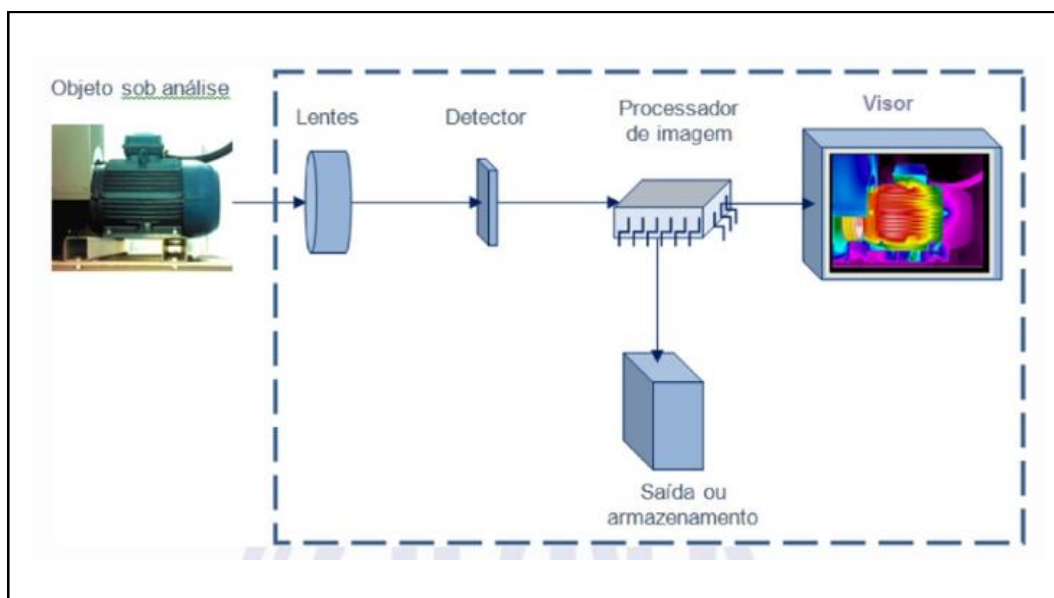


Figura 2.10: Exemplo de um sistema infravermelho para termografia passiva (Target, n.d.).

A termografia passiva mede a variação de temperatura com base no carregamento a que o componente está sujeito. Esse comportamento foi observado pela primeira vez por Willian Thomson (Lord Kelvin) ao final do século XIX. Através dessa técnica, o efeito termoelástico será estudado.

Em um processo adiabático, considerando-se os casos biaxial e linear elástico, o efeito termoelástico pode ser escrito como

$$\Delta T = -\frac{\alpha T_0}{\rho C_p}(\Delta \sigma_1 + \Delta \sigma_2), \quad (2.4)$$

onde T_0 é a temperatura de referência (ambiente), α é o coeficiente de expansão térmica, ρ é a massa específica do material, C_p é o calor específico a pressão constante do material e $\Delta \sigma_1$ e $\Delta \sigma_2$ são as variações das tensões principais (Vieira, 2016).

2.1.4

Método Risitano quase estático para determinação do Limite de fadiga

O método quase-estático, proposto por Risitano *et al.* (2011), faz uso da TIV e do ensaio de tração para medir o limite de fadiga do material (S_L). Mesmo sem trabalhar com carregamentos cíclicos, o método é capaz de prover o limite de fadiga para a razão de tensão cíclica

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} = -1. \quad (2.5)$$

Segundo Colombo *et al.* (2012), estudos na área de termografia estão presentes na literatura para relacionar o comportamento de tração estática (mecânica e térmica) às propriedades de fadiga de materiais homogêneos, por exemplo, aços e ligas de alumínio. A temperatura da superfície de um material sob carga de tração monotônica e estática tem uma tendência complexa ao longo do tempo, que pode ser dividida em três partes. A Figura 2.11 representa graficamente as três partes.

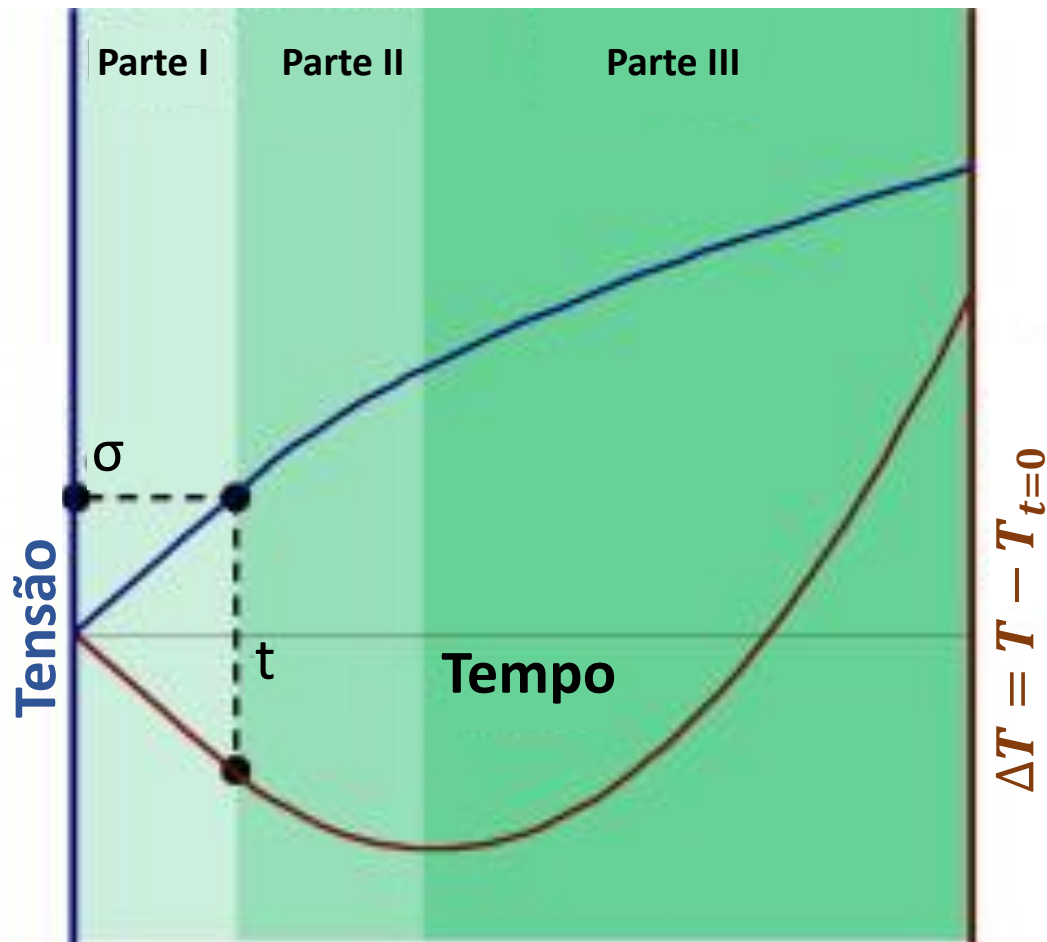


Figura 2.11: Desenho esquemático da tensão aplicada e da variação de temperatura durante um ensaio estático. (Adaptado de Colombo *et al.*, 2012).

Na primeira parte a variação da temperatura ($\Delta T = T - T_0$, diferença entre a temperatura instantânea e a inicial) ao longo do tempo pode ser esquematizada por uma reta decrescente; paralelamente, a tendência do tempo de carregamento também é elástica linear. Nesta fase, a variação do volume da amostra, diretamente proporcional à variação da deformação, é positiva, enquanto a variação da temperatura é negativa. O espécime mostra um comportamento globalmente elástico; esta fase é regulada pela teoria da termoelasticidade. É definido o limite de fadiga do material para $R = -1$ no final da primeira fase, ou seja, ao desvio da linearidade da curva de temperatura, início da plastificação. Este ponto marca a carga referente ao S_L .

Na segunda parte, micro-danos ocorrem no corpo de prova a partir de micro-defeitos existentes, mesmo que do ponto de vista macroscópico o material não apresente nenhum dano. Nesta fase, falta a proporcionalidade linear entre as tensões aplicadas e a temperatura. A tendência é da temperatura diminuir não linearmente, até um valor mínimo. Este ponto corresponde a um equilíbrio

entre a energia gasta pela deformação elástica (resfriamento do corpo de prova) e a energia absorvida pelo material para aumentar os defeitos e danos (aquecimento do corpo de prova).

Já na terceira fase o dano material está se espalhando e a propagação do dano dentro do corpo de prova leva à falha; quando a propagação finalmente se torna instável, ocorre uma liberação repentina de energia na forma de calor.

Risitano & Risitano (2013) descreveram que o procedimento proposto é baseado no fato de que as falhas por fadiga ocorrem em pontos onde o carregamento local, amplificado para defeitos estruturais ou superficiais, é capaz de produzir deformação plástica. As tensões são intensas nesses pontos em comparação com a média aplicada, e como resultado, as condições plásticas locais são alcançadas. Se a amostra for carregada em condições iguais as de um teste de fadiga, ela irá falhar. Portanto, de forma não convencional, o limite de fadiga do material é o valor médio da tensão (carga / área) em que, em algum ponto da curva tensão-deformação do material, condições plásticas locais e irreversíveis são alcançadas. Essas condições podem ser definidas por um teste axial estático que é tratado como o primeiro ciclo de um teste de fadiga simétrico. Uma mudança na tendência linear (fase termoelástica) no ponto na superfície da amostra, visível com análise de superfície térmica profunda, é uma consequência da energia liberada da micro-plástificação irreversível, deformação causada pela tensão local intensificada. Se este efeito não ocorrer, a linha deve permanecer reta até a tensão de escoamento ser alcançada.

A Figura 2.12, mostra o processo de microplastificação que ocorre na zona II durante um teste estático de tração. Depois da zona I, onde o carregamento médio é tão baixo que cada grão é submetido a tensão no campo elástico, a tensão média na zona II tem um valor tal que a maioria dos cristais têm deformações elásticas, mas alguns são plasticamente deformados. Após a remoção da carga, a amostra retorna à mesma condição macroscópica. A deformação plástica é mais visível na zona III, e a amostra fica permanentemente deformada após a carga ser removido. Finalmente, o fenômeno de deformação plástica aumenta e envolve todos os grãos na zona IV. O limite de escoamento marca a transição da zona III para a zona IV.

Podemos distinguir duas fases do metal cristalino em relação ao seu comportamento térmico durante um teste de tração estática:

1– Todos os grãos são deformados em um campo elástico (zona I na Figura 2.12) e a relação tensão-deformação é linear, ou seja, onde é aplicável a Lei de Hooke A.3.

2– Nem todos os grãos são deformados em um campo elástico, e apenas alguns são deformados no campo plástico (zona II na Figura 2.12).

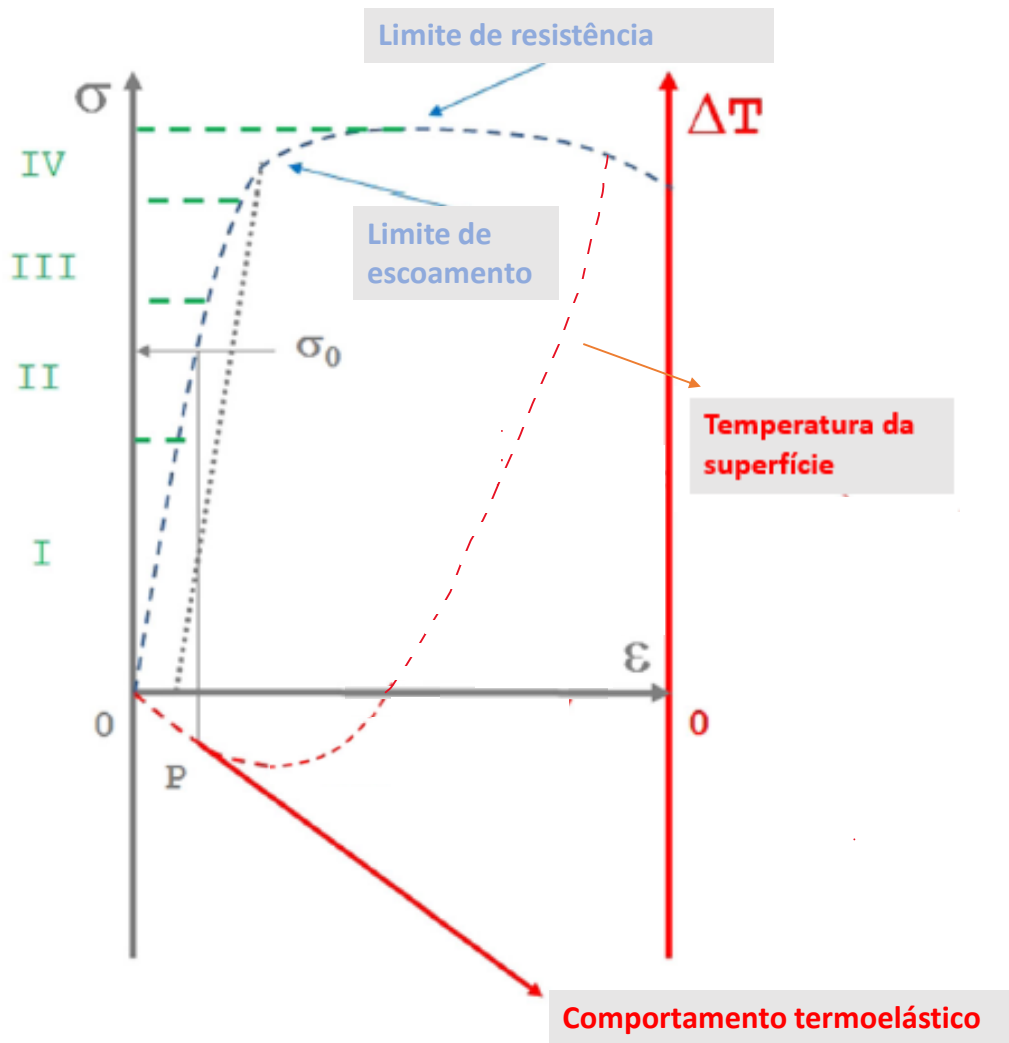


Figura 2.12: Curvas tensão-deformação e de temperatura-deformação, onde σ_0 é o limite de fadiga para $R = -1$. (Adaptado de Risitano & Risitano, 2013).

2.1.5 Revisão de literatura

Em 1998 Luong destaca três vantagens da termografia infravermelha, uma técnica que não é destrutiva, por adquirir dados em tempo real e por não haver contato com o corpo de prova. (Luong, 1998).

Nos anos seguintes, com o avanço tecnológico das câmeras termográficas, a termografia tem sido aplicada, explorada e desenvolvida por diversos pesquisadores em vários materiais.

La Rosa & Risitano (2000) propuseram um método para determinação do limite de fadiga. Em um corpo de prova feito de aço recozido C70 (UNI-3545-68) testado sob carregamento senoidal ($\sigma_{max} = 550$ MPa, $R = 0$), foi utilizada uma máquina trativa-compressiva de ensaios mecânicos e a Figura 2.13, mostra parte do ensaio.

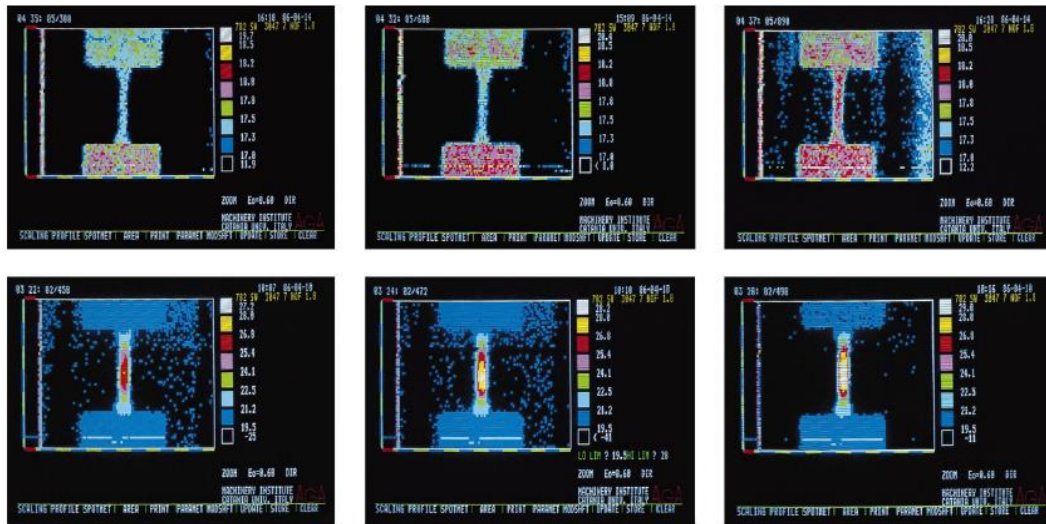


Figura 2.13: Contém imagens do ensaio realizado por La Rosa e Risitano. (La Rosa & Risitano, 2000).

Para realizar esta pesquisa usou-se: (a) a termografia infravermelha como instrumento de medição de temperatura; (b) o conhecimento do aumento da temperatura dos materiais quando sujeitos a carregamentos cíclicos; (c) quando estes carregamentos são superiores a resistência à fadiga do material, o aumento da temperatura se torna ainda mais acentuado. Portanto a partir do incremento da temperatura ΔT , que mede a variação de temperatura do ponto mais quente do corpo de prova em relação ao ambiente, mediu-se o limite de fadiga do material. Esse método foi denominado de método Risitano e também apresenta informações sobre a energia retida nos espécimes ou componentes mecânicos (La Rosa & Risitano, 2000).

Fargione *et al.* (2002), propuseram um rápido método para a determinação do limite de fadiga e de parâmetros dinâmicos da mecânica das trincas relativos à micro-mecânica do material. Utilizando materiais comumente usados na indústria, eles também apresentaram um novo procedimento para a determinação da curva de Wöhler, SN . Com este trabalho, os autores validaram a hipótese de que a falha por fadiga ocorre quando a energia de deformação plástica do material alcança um valor constante. Validada a relação entre energia e limite de fadiga.

Clienti *et al.* (2010) apresentaram uma primeira abordagem para determinação de parâmetros de fadiga, por meio da análise da variação térmica em ensaios estáticos em espécimes de plástico policloreto de vinila (PVC). Corpos de prova com de barras planas regulares com lagura de 30,2 mm, espessura de 4,7 mm e comprimento de 200 mm, com diversos furos centrais de 4,5, 6,5, 8,0 e 10,0 mm de diâmetro. Utilizaram uma câmera termográfica FLIR SC 3000. Veja na Figura 2.14 as variações térmicas em um ponto do espécime

não entalhado (primeira série) e as variações térmicas nos pontos da amostra com orifício de 8 mm (segundo conjunto). A temperatura foi mensurada em 4 pontos espaçados, o primeiro a 1 mm do furo e o último a 3 mm da borda, formando uma linha normal a carga aplicada, sendo constatada uma queda da temperatura à medida que a carga aumentava até quando a mesma se estabilizou. Destaca-se que no gráfico (a) da Figura 2.14, a primeira tangente no início do teste mostra uma queda acentuada da temperatura e em seguida uma queda menos acentuada, seguida de um aumento de temperatura. Assim a fase termo-elástica caracterizou-se pelo aumento da temperatura, denominando o início da “real plastificação” do material. Este ponto é muito bem definido nesta dissertação, tanto para o caso uniaxial quanto no caso biaxial, discutidos nas Seções 4.1 e 4.2, respectivamente.

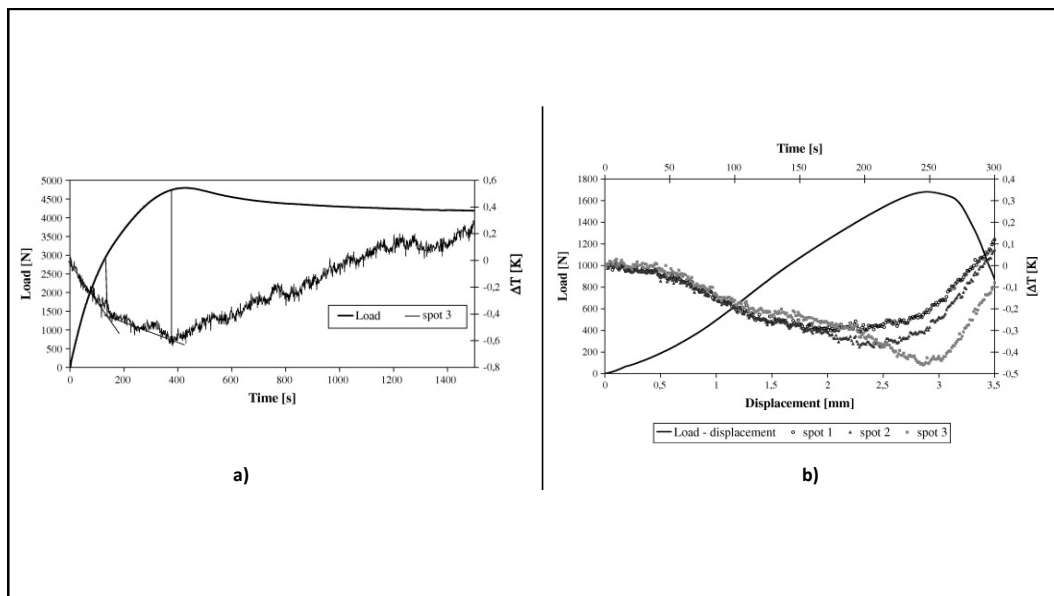


Figura 2.14: Variações térmicas: (a) em um ponto de espécime não entalhado (primeira série). (b) nos pontos da amostra com orifício de 8 mm (segundo conjunto). (Clienti *et al.*, 2010).

Risitano *et al.* (2010), avalia o limite de tensão da fase termo-elástica via análise termográfica da superfície do espécime durante o ensaio estático de tração. Adicionando a curva da temperatura medida em uma pequena área da superfície ao gráfico de tensão-deformação, foi possível avaliar a temperatura coincidente com o início da tendência não linear. Os autores demonstraram qual é o limite de fadiga do material, com $R = -1$ de dois espécimes com entalhes, a partir da mudança da linearidade da curva temperatura. Foi usada novamente a câmera Flir System model SC-3000. A Figura 2.15 mostra alguns resultados gráficos do referido estudo.

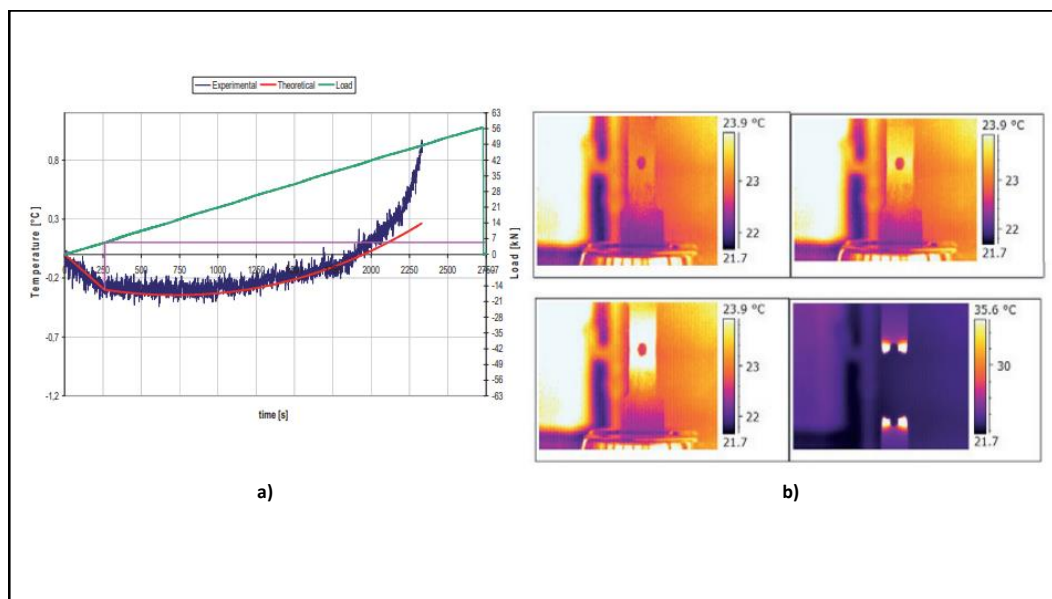


Figura 2.15: a) Curvas de evolução da temperatura. b) Imagens termográficas do espécime. (Adaptado de Risitano *et al.*, 2010).

Risitano *et al.* (2011) pesquisaram sobre o limite de fadiga por meio de ensaios estáticos de tração, explicando o processo de falha do espécime. Foi evidenciada a conexão entre a fase termo-elástica sob tração e o início de deformações plásticas pontuais por meio do gráfico de tensão-deformação, mesmo estando abaixo do limite de escoamento. Os ensaios foram realizados em 6 espécimes de aço AISI 304 e analisados via termografia, dos quais 3 foram feitos ensaios estáticos e os outros 3 ensaios cíclicos de fadiga $R = -1$. A conclusão foi que a leitura do limite de fadiga é clara, sendo uma boa aproximação com aquela encontrada pelo tradicional método e pelo método Risitano. O erro ficou em 10%. A leitura da temperatura foi através da câmera Flir System model SC-3000. Veja na Figura 2.16 o ensaio realizado no espécime 2.

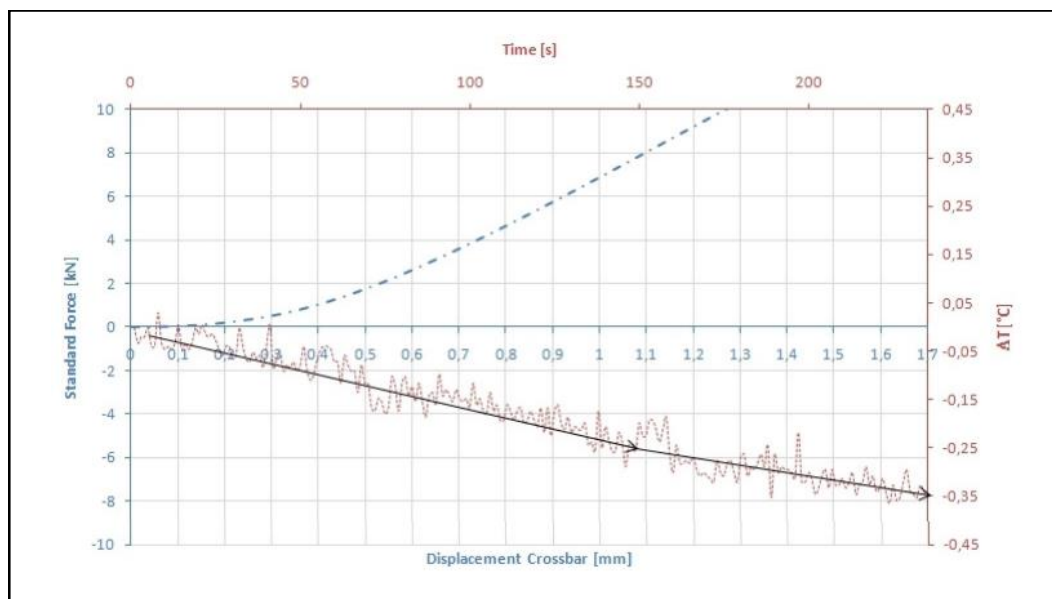


Figura 2.16: Espécime 2; Teste estático de tração monoaxial. Carga padrão vs deslocamento da barra transversal (linha azul) e T vs tempo (linha vermelha). (Risitano *et al.*, 2011).

Colombo *et al.* (2012) caracterizaram um novo material compósito fibra de basalto reforçado em termos estáticos e de fadiga fazendo uso da termografia. Este material, recém-desenvolvido é uma alternativa aos materiais fibra de carbono pelo seu preço, e de fibra de vidro pela sua resistência. Foram realizados ensaios estáticos de tração, onde os espécimes continham $25 \times 250 \text{ mm}^2$ de seção transversal com 50 mm de comprimento. A variação da temperatura foi medida através da câmera termográfica FLIR Titanium SC7000, com banda de onda de $2,5 - 5 \mu \text{ m}$. Aplicou-se o método Resitano nos ensaios estático para determinação do limite de fadiga do material. Na Figura 2.17, observa-se um dos gráficos do referido trabalho.

Crupi *et al.* (2015) analisaram experimentalmente o material SFRP (do inglês, Secreted frizzled-related protein) sob cargas estáticas e de fadiga via termografia e DIC. Os autores determinaram que a melhor técnica para a zona de fratura no material estudado é a de DIC e mostraram o comportamento da equação A.3, através de uma regressão linear aplicada nos dados amostrais da termografia. Os autores sugeriram também uma relação entre o incremento da temperatura e a frequência aplicada nos ensaios de fadiga além de uma abordagem teórica para prever a evolução da temperatura nos compósitos SFRP durante os testes.

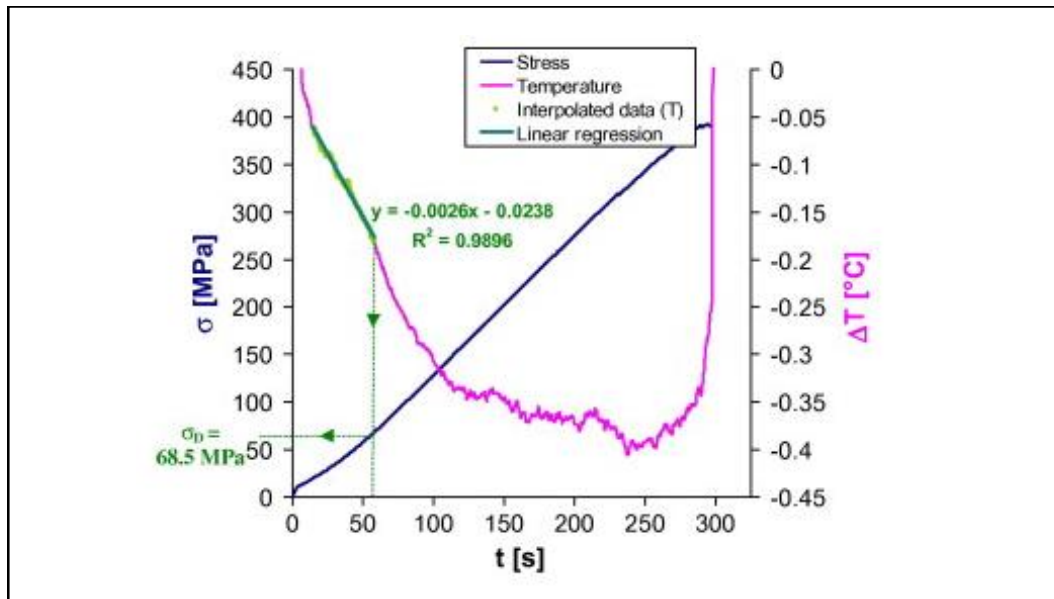


Figura 2.17: Gráfico de tensão e variação de temperatura em função do tempo, para testes estáticos para um corpo de prova. (Colombo *et al.*, 2012).

Vieira (2016) validou o uso da termografia como ferramenta que indica a iniciação e propagação de trincas por fadiga. Foi usada uma placa de policarbonato isenta de tensões residuais, a termografia passiva foi aplicada com o objetivo de localizar o ponto crítico. O campo de tensões foi medido via análise termoelástica de tensões (TSA) e a concentração de tensão para o surgimento das trincas. Além de determinar todos os coeficientes necessários para criação da curva de Wöhler e também os coeficientes da lei de Paris, o autor determinou o limite de fadiga do material. Foi usada a câmera Flir A655sc no seu trabalho. A Figura 2.18 contém uns dos gráficos obtidos neste trabalho.

Manhães (2016), em seu projeto de graduação, estudou o material policarbonato através de corpos de provas que foram submetidos ao tratamento térmico de recozimento antes de ensaiado, para aliviar as tensões residuais provenientes do processo de fabricação. Verificou-se a necessidade de isolamento térmico do corpo, a Figura 2.19 mostra a diferença do ensaio sem isolamento e com isolamento térmico. Foi utilizada a câmera Flir A655sc nos ensaios. O autor determinou o limite de fadiga para diferentes R e os coeficientes da equação de Wöhler, necessários para a criação da curva SN. Na sua conclusão ele destaca o potencial da termografia e também que o critério usado por ele foi arbitrário visual.

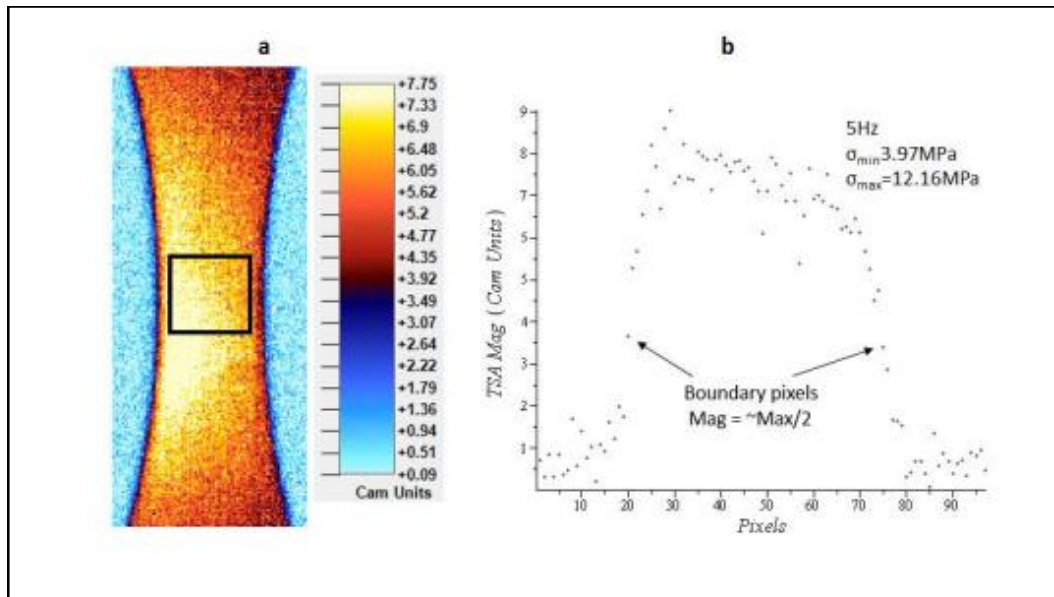


Figura 2.18: a) Mapa de magnitude TSA. b) Gráfico de linha crítica para espécime de CR inferior $\Delta\sigma = 8,18 \text{ MPa}$. (Adaptado de Vieira, 2016).

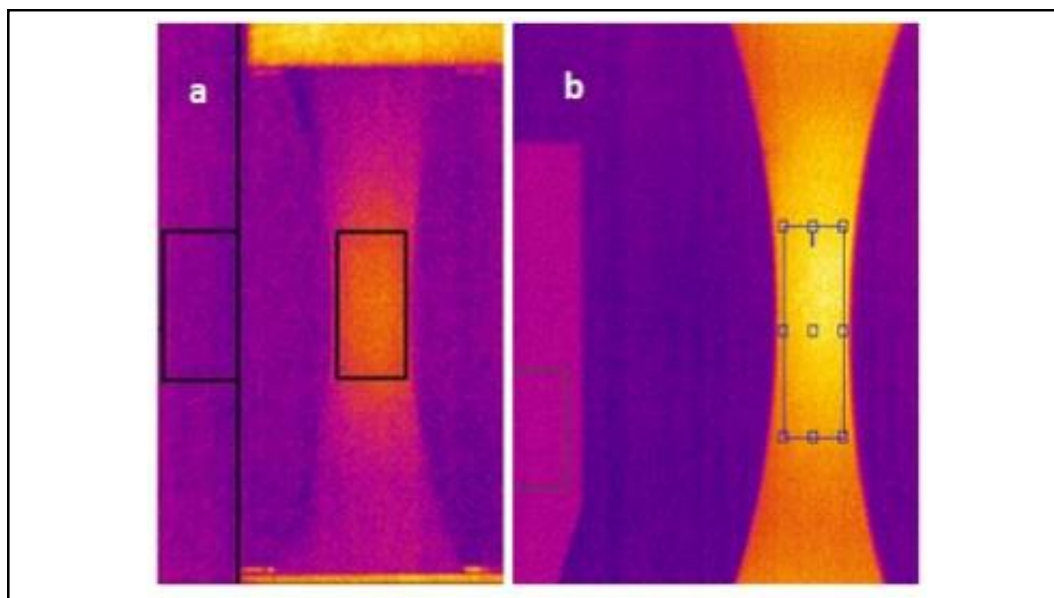


Figura 2.19: Imagem do espécime visto a partir da câmera térmica; (a) Sem isolamento térmico; (b) Com isolamento térmico. (Adaptado de Manhães, 2016).

No ano seguinte, em 2017 (Oliveira de Assis, 2017). Aplicou a termografia infravermelha para determinar o limite a resistência à fadiga e a curva SN do aço SAE 1020. Os corpos de prova estão de acordo com a norma ASTM E606M-12. Foram feitos dois experimentos sob as razões $R = 0,5$ e $R = -1$. O ensaio foi realizado com a câmera Flir A655sc. O autor comprovou que o método de Risitano é confiável como ferramenta para a determinação da curva SN e da resistência à fadiga para prever a vida útil do material estudado, um aço carbono.

Em seu projeto de graduação, Rego (2017) obteve resultados importantes através do método Risitano aplicado em corpos de provas feitos de duas ligas metálicas: latão (C3600) e alumínio (6351-T6). Ele concluiu que o método Risitano é uma ferramenta prática e eficiente, que pode fornecer uma maneira rápida e confiável de determinar o comportamento à fadiga partir de poucos espécimes de material. O trabalho abordou também a influência da relação de tensão R, foi fornecida uma equação mostrando a influência da tensão média aplicada no limite de fadiga dos materiais trabalhados. A Figura 2.20 mostra o gráfico da tensão alternada da liga de latão (C36000) vs. tensão média, para Gerber, Goodman e termográfica determinada no projeto.

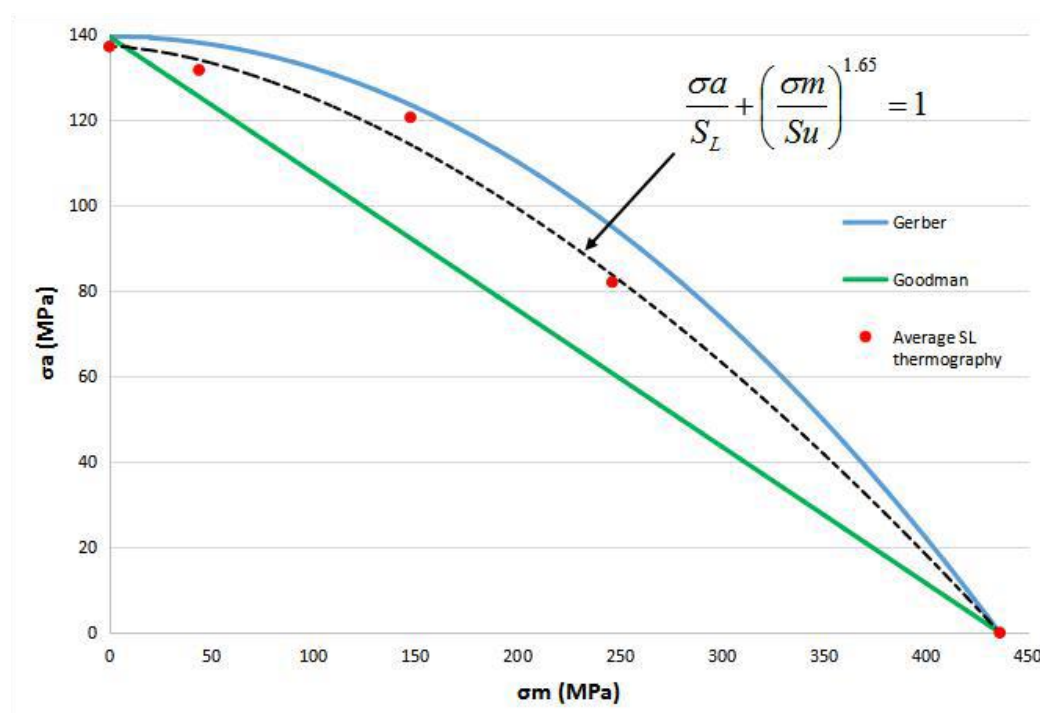


Figura 2.20: Gráfico da tensão alternada do C36000 vs. tensão média para Gerber, Goodman e termográfica. (Rego, 2017)

Lemos (2017), aplicou a termografia no estudo do Aço SAE 1020 sobre os efeitos dos esforços compressivos na fadiga. Ele empregou os métodos Risitano

cíclico, estático e o método de Luong, concluiu que nos testes cíclicos o método Risitano se mostraram mais conservadores que o método de Luong, embora não condigam com o limite de fadiga para o lado compressivo do diagrama $\sigma_a \times \sigma_m$. Os resultados para os dois testes estáticos usando o método Risitano estático apresentaram valores semelhantes à referência (Paiva *et al.*, 2017), quando testado até a falha, ou no carregamento de $\varepsilon = 5\%$. Veja na Figura 2.21 o resultados encontrados por Lemos para o CP estático 1. Foi utilizada a câmera Flir A655sc nos ensaios.

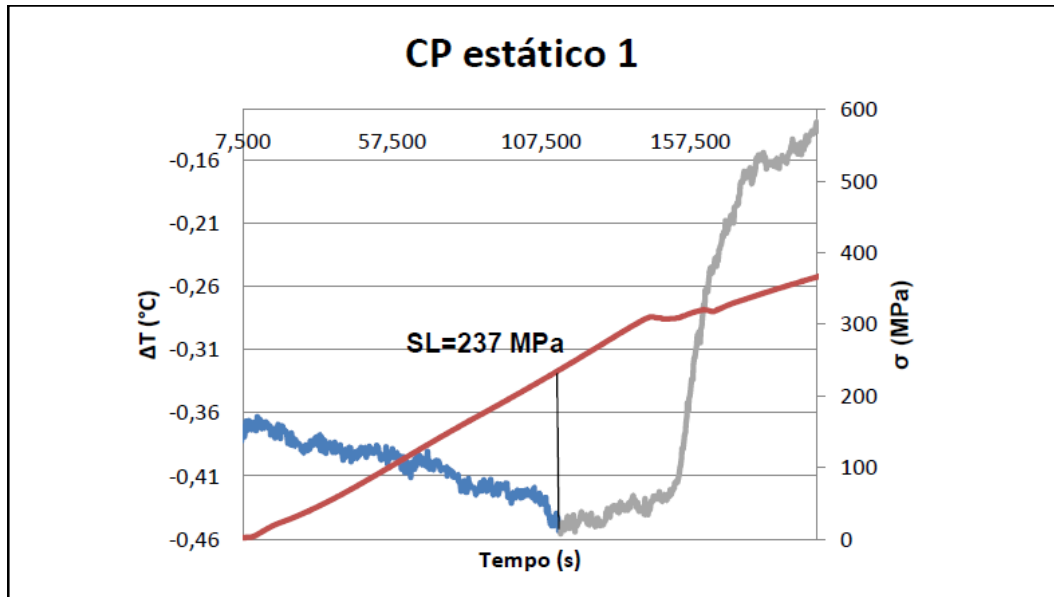


Figura 2.21: As curvas azuis e cinza correspondem à temperatura, sendo que a azul é considerada a sua fase linear e a cinza o resto da curva. A curva vermelha corresponde à tensão. (CP estático 1). (Lemos, 2017).

Alves *et al.* (2020), concluíram que o método Resitano se mostrou rápido, objetivo e usual em ambientes reais, após determinar o limite de fadiga do aço SAE 1045. Utilizou-se da câmera Fluke®, modelo VT04 A e 4 corpos de prova.

Também em 2020, o método quase-estático para medir o limite de fadiga via TIV, foi estendido para estados de tensão biaxial atuando na superfície de corpos de prova de tamanho real de dutos com anomalias geométricas (Paiva, 2020). Os resultados mostraram que o método biaxial quase-estático previu satisfatoriamente a localização de pontos críticos para a iniciação da fadiga em espécimes tubulares com mossas. Na Figura 2.22 é apresentado o resultado encontrado pelo autor em um espécime. Além desta extensão para o caso biaxial, o autor determinou o limite de fadiga para o caso uniaxial, aplicando o referido método em 6 corpos de provas com o mesmo material dos espécimes tubulares, o aço API 5L Grau B. O autor encontrou um valor muito próximo do esperado convencionamento, $S_L = 245 \text{ MPa}$ e $S_L = 250 \text{ MPa}$,

respectivamente.

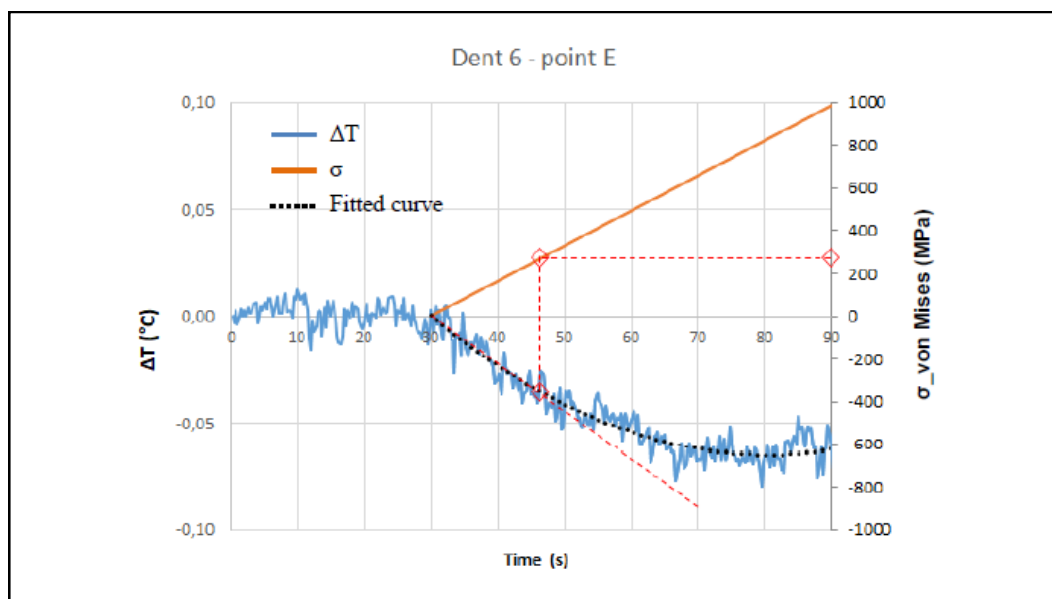


Figura 2.22: Método quase estático IR aplicado a mocha 6 ponto E. (Paiva, 2020).

Paiva *et al.* (2021), determinaram por meio do método quase estático e via DIC um ponto de temperatura mínima característica nos testes uniaxiais e biaxiais, em que estes pontos estão intimamente relacionados com o limite de escoamento do material (MYS).

3
Metodologia

Este capítulo tem como objetivo explicar o conjunto de métodos utilizados e o caminho percorrido desde o início até a conclusão deste trabalho.

3.1
Procedimentos

Sete espécimes do tipo “dog bone”, Figura 3.1 – os corpos de provas de 1 à 6 foram analisados por Paiva (2020) – padrão uniaxial e oito espécimes de duto de três metros de comprimento com tampos planos foram fabricados a partir de tubos de aço API 5L Grau B, Figura 3.2. Informações acerca do material são fornecidas na Tabela 3.1.

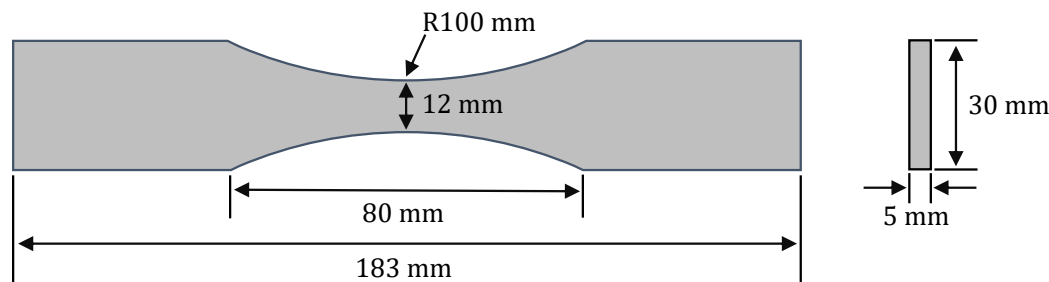


Figura 3.1: Geometria do espécime “dog bone”.

Tabela 3.1: Dados do material: Aço API 5L Grau B (Paiva *et al.*, 2020).

Composição química	0,13C, 0,54Mn, 0,01Si e baixo P, S
Limite de escoamento	316 MPa
Limite de fadiga para $R = 0,025$	183 MPa
Limite de fadiga para $R = -1$	253 MPa
Modulo de Elasticidade	182 GPa
Resistência à tração	500 MPa

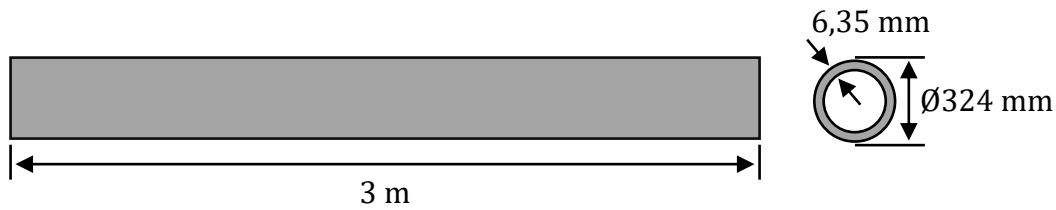


Figura 3.2: Geometria do duto.

Os oito espécimes tubulares contendo mossas artificialmente criadas, Figura 3.3 Paiva (2020), foram testados sob carregamento de pressão interna. As mossas foram geradas por meio de um elemento indentador acoplado ao atuador de uma máquina de teste servo-hidráulica de 500kN. Este procedimento gerou mossas com certo percentual de profundidade (com relação ao diâmetro externo do tubo), Tabela 3.2. Após a remoção do indentador, os espécimes tubulares foram pressurizados hidrostáticamente (tensão circunferencial nominal igual a 0,68 SMYS) para produzir recuperação parcial das mossas e diminuir o percentual de profundidade em relação ao diâmetro externo (rearredondamento da mossa), Tabela 3.2¹. Dois formatos de mossas foram obtidos nos dutos, como se observa na Figura 3.4.

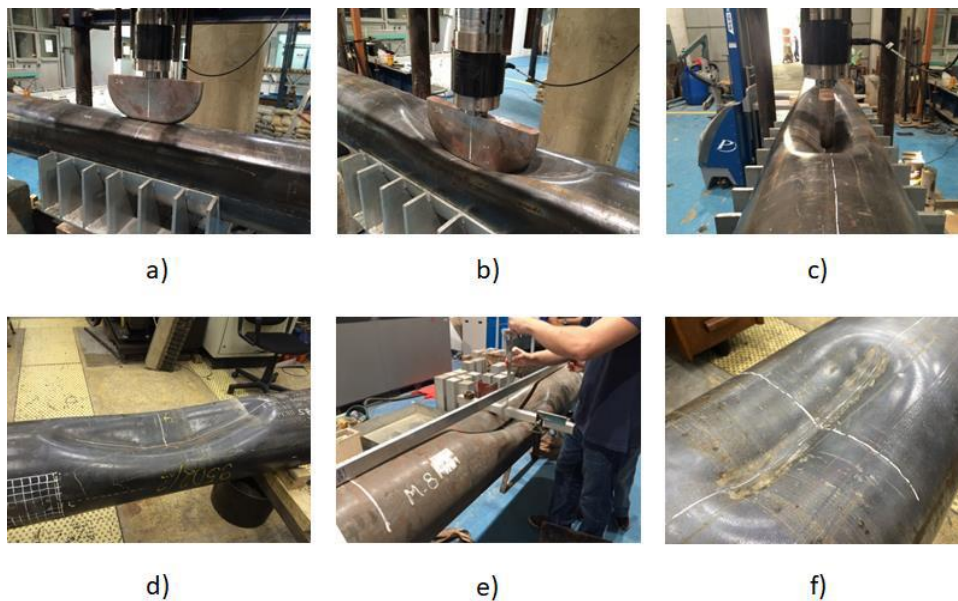


Figura 3.3: Processo de criação da mossa: a) o corpo de prova é colocado na sela e alinhado com o indentador; b) o indentador é deslocado para produzir a mossa inicial; c) o penetrador é gradualmente retirado; d) a forma final da mossa inicial; e) o perfil da mossa é medido com um paquímetro; f) a mossa longitudinal plana obtida após rearredondamento. (Paiva, 2020).

¹Na Tabela 3.2 foi aplicada a mesma nomenclatura do Paiva (2020) para facilitar as comparações dos resultados obtidos nesta dissertação. O espécime 3 foi utilizado para monitoramento da fadiga através da TIV, Paiva *et al.* (2018). Ela não foi estudada neste trabalho.

Tabela 3.2: Profundidades das mossas antes e depois do rearredondamento (Paiva, 2020).

Espécimes	Profundidade central antes do rebatimento (mm)	Profundidade central antes do rebatimento (% DE*)	Pressão de redefinição (MPa)	Profundidade central após recondicionamento (mm)	Profundidade central após recondicionamento (% DE*)
1	154,0	48,0	7,0	40,0	12,0
2**	155,5	48,0	7,0	1,5	0,0
4**	157,5	49,0	7,0	10,0	3,0
5	156,0	48,0	6,5	50,0	15,0
6	156,5	48,0	6,5	51,0	16,0
7	155,5	48,0	6,5	49,0	15,0
8	155,0	48,0	6,5	50,5	16,0
9	160,0	49,0	6,5	48,0	15,0
* DE = Diâmetro externo; ** Espécimes com mossas de duas concavidades Pressão de passagem do espécime 2 foi de 6,6 MPa Pressão de passagem do espécime 4 foi de 6,9 MPa					

As medições de temperatura foram feitas para todos os pontos da região da mossa de cada espécime, entretanto apenas três pontos foram objetos de análise, denominados pontos críticos (A, E e F, ilustrado na Figura 3.4). As distribuições de tensões em tais pontos foram determinadas usando correlação de imagens digitais. As distribuições de tensões foram também determinadas via Método de Elementos Finitos (MEF) por Paiva (2020). Nesses casos, foi utilizada a geometria exata de cada uma das mossas, determinadas por medições utilizando DIC.

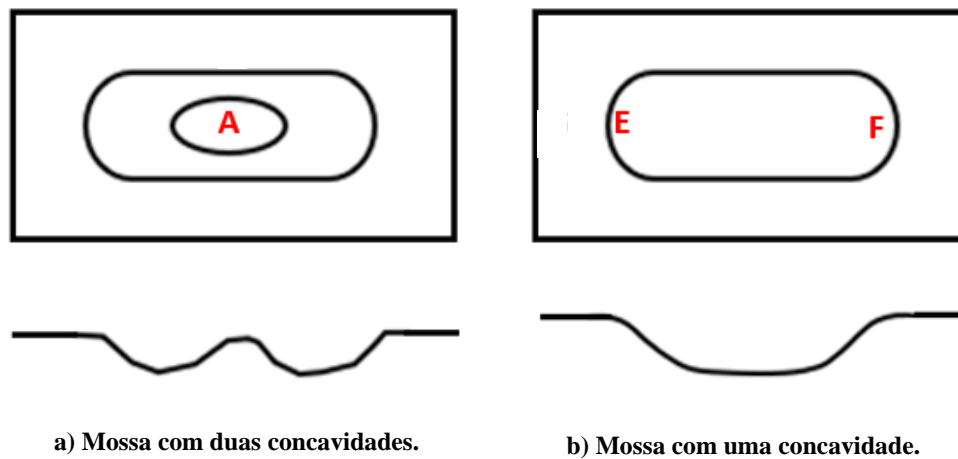


Figura 3.4: Tipos de moças: a) com duas concavidades; b) com uma concavidade. (Adaptado de Paiva, 2020).

3.2

Ensaio com estado de tensão uniaxial

Durante cada teste dos espécimes “dog bone”, a temperatura da superfície dos corpos de prova foi registrada em tempo real através de uma câmera de alta resolução de classe científica FLIR A655sc (640x480 microbolômetros não resfriados, taxa de aquisição de 50 Hz, resolução espacial de $17\mu m$, sensibilidade de $30mK$ e Faixa Espectral 7,5 a $14,0\mu m$) Paiva (2020). Os dados de temperatura foram adquiridos e analisados usando o software ResearchIR da FLIR (FLIR, n.d.d). Os deslocamentos dos corpos de prova uniaxiais foram medidos com um clip-gage de 25 mm. Abaixo, é possível observar na Figura 3.5 a câmera empregada no ensaio. Particularmente, o autor participou do ensaio com o CP 7, que além da câmera foi utilizada a lente IV Close-up 5.8 x ($100\mu m$), cujo campo de visão é de 64 x 48 a 172 mm. Na Figura 3.6 é apresentada a configuração do teste mencionado.

Os ensaios de tração uniaxial foram realizados em uma máquina servo-hidráulica INSTRON 5500R de 100 kN de capacidade, a uma taxa de deslocamento aplicada nos testes estáticos foi de 1 mm/min. Os espécimes foram carregados e descarregados cinco vezes até atingirem um certo nível de deformação plástica, a fim de analisar a influência da plasticidade acumulada nos resultados dos ensaios. Em cada um desses testes, o método estático foi aplicado.



Figura 3.5: Câmera FLIR A655sc empregada nos ensaios (Adaptado de FLIR, n.d.d), e a lente IV Close-up 5.8x(100 μm) (Adaptado de FLIR, n.d.c).

A sequência do procedimento de teste estático consistiu em carregar e descarregar os espécimes “dog bone” três vezes consecutivas até atingir 1% da deformação permanente, depois mais um ciclo completo até atingir 3% e um último ciclo completo até atingir 5% (Paiva *et al.*, 2020). Os gráficos da primeira e quinta séries do corpo de prova 7 são mostrados nas Figuras 3.7 e 3.8 respectivamente. Os primeiros valores das tensões destacados em cada gráfico são referentes ao limite de fadiga (S_L), já os segundos valores são referentes à temperatura mínima característica (Paiva *et al.*, 2021). Os referidos gráficos foram apresentados aqui por questão didática; os demais resultados serão apresentados e analisados no Capítulo 4. Essa sequência de apresentação dos dados foi escolhida propositalmente para ilustrar o valor constante do limite de fadiga do material, onde haverão aumentos nos valores da tensão no ponto da temperatura mínima característica e no valor do limite de escoamento do material, conforme teoria detalhada no Apêndice A.3. Note apenas como os valores do limite de fadiga são próximos, e que houve aumento da tensão referente ao ponto do “cotovelo” da curva de temperatura. Este ponto iremos chamar de temperatura mínima característica (TMC), como definido por (Paiva *et al.*, 2021), cf. na Seção 2.1.5.

O autor tentou de alguma forma automatizar definição do ponto do limite de fadiga dos casos uniaxiais, através de programas desenvolvidos em Matlab, porém o mesmo não obteve resultados satisfatórios, possivelmente devido a variabilidade dos dados da temperatura e do próprio comportamento de sua curva.

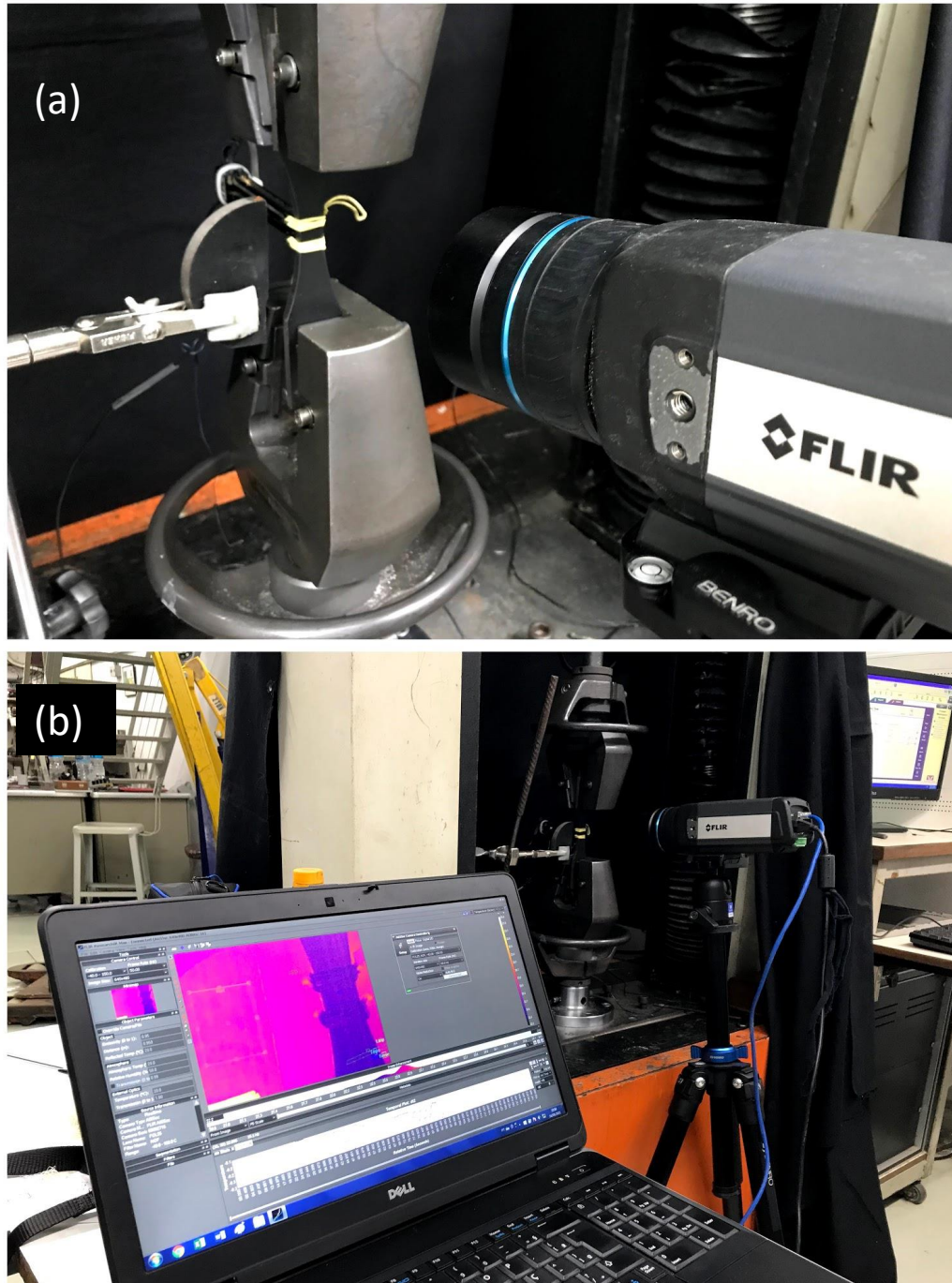


Figura 3.6: (a) Em detalhe a câmera focando o corpo de prova fixado na máquina servo-hidráulica para realização do ensaio. (b) Configuração do ensaio de tração com utilização da TIV do corpo de prova 7.

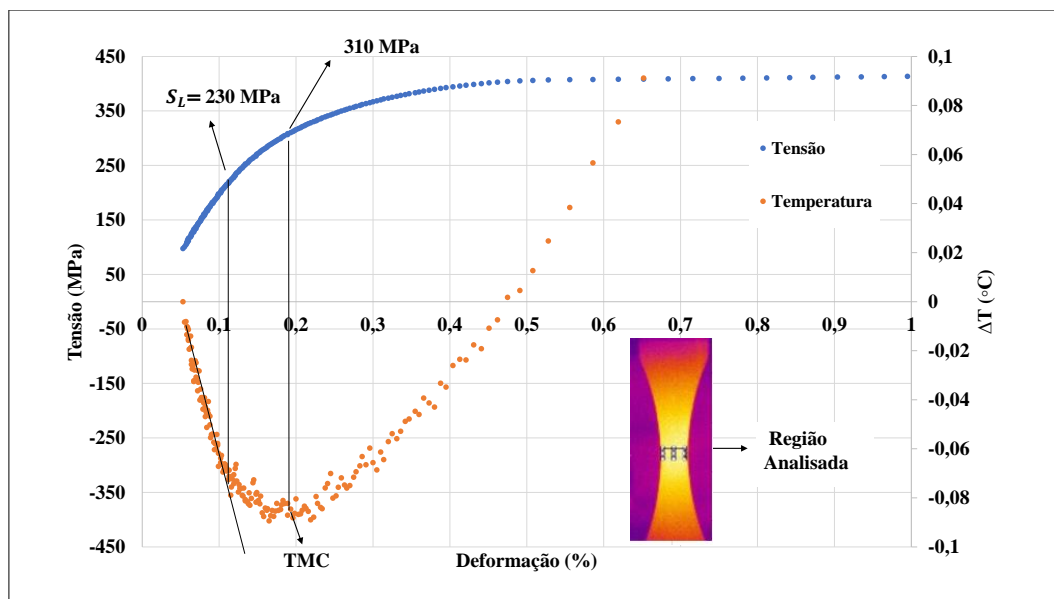


Figura 3.7: Gráfico da tensão em função da deformação, acrescentado da variação da temperatura em função da deformação. Corpo de prova 7, primeira série. Limite de fadiga 230 MPa e Tensão da TMC de 310 MPa.

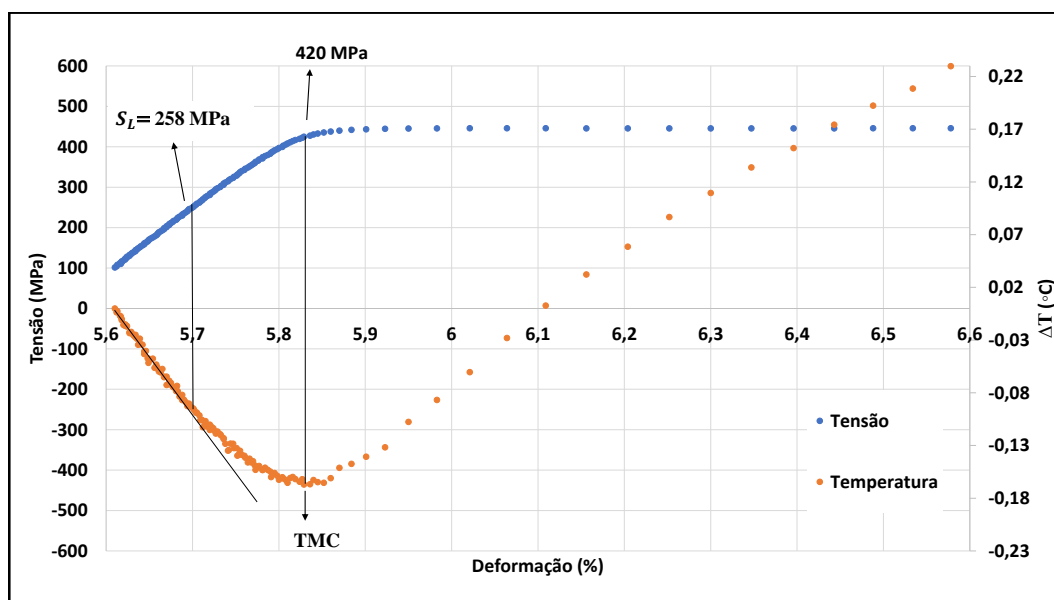


Figura 3.8: Gráfico da tensão em função da deformação, acrescentado da variação da temperatura em função da deformação. Corpo de prova 7, quinta série. Limite de fadiga 258 MPa e Tensão na TMC de 420 MPa.

3.3

Ensaaios com estado de tensão biaxial

Todos os espécimes tubulares correspondentes aos ensaios biaxiais, foram pintados na parte da mosca com uma camada de tinta preta opaca para aumentar sua emissividade térmica. Durante cada teste, a temperatura superficial foi medida em tempo real por meio da câmera FLIR A655sc utilizada neste trabalho, cujos dados foram interpretados via software ResearchIR, tal como mencionado na Seção 3.2. Pontos brancos foram pintados nas superfícies do espécime de duto para permitir a aplicação da técnica DIC, Figura 3.9, (Paiva, 2020).



Figura 3.9: a) Parte do duto 6 pintado de preto para análise termográfica e com pequenos pontos brancos para permitir a análise via DIC. b) Execução da calibração. (Paiva, 2020).

Os espécimes biaxiais foram carregados hidrostáticamente e as medições de deformação usando DIC foram realizadas durante a primeira metade (aumento de pressão) dos três ciclos iniciais de carregamento usando os softwares Vic-Snap e Vic 3-D Stereo. A pressão interna variou de 0 a um máximo de 6 MPa. O acréscimo de pressão foi de 0,2 MPa/s enquanto as medições de DIC eram feitas. Na Figura 3.10, observa-se a configuração deste ensaio. As medições de temperatura foram feitas em condições de teste semelhantes e em outro momento, Paiva (2020).

Através do ensaio DIC foram obtidos os valores das deformações principais ε_1 , ε_2 e a deformação equivalente de von Mises (ε_{Mises}).

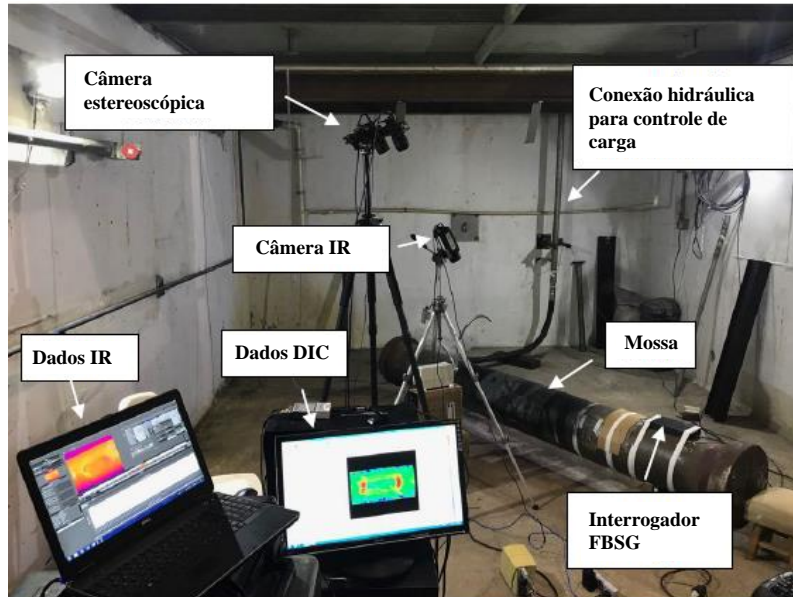


Figura 3.10: Configuração do ensaio nos dutos. (Adaptado de Paiva, 2020).

Com os valores das deformações principais ε_1 e ε_2 enquanto os pontos dos espécimes estavam carregados na sua região elástica, foi possível determinar as tensões principais

$$\sigma_1 = \frac{E}{(1 - \mu^2)}(\varepsilon_1 + \mu\varepsilon_2), \quad (3.1)$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{(1 - \mu^2)}(\varepsilon_2 + \mu\varepsilon_1) \text{ e} \quad (3.2)$$

$$\sigma_3 = 0, \quad (3.3)$$

onde E é o módulo de elasticidade de 182 GPa, ε_1 e ε_2 são as deformações principais e μ é o coeficiente de Poisson, considerado 0,3.

A tensão de von Mises é calculada através de

$$\sigma_{Mises} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]}. \quad (3.4)$$

Para cada ponto crítico dos espécimes, foram plotados os gráficos da pressão em função da deformação de von Mises. Para diminuição do erro, foi realizada uma regressão linear para cada gráfico e o coeficiente angular foi usado para determinar o valor da deformação equivalente de von Mises. Na Figura 3.11 é possível observar o gráfico da pressão em função de deformação de von Mises para o espécime 6, ponto E.

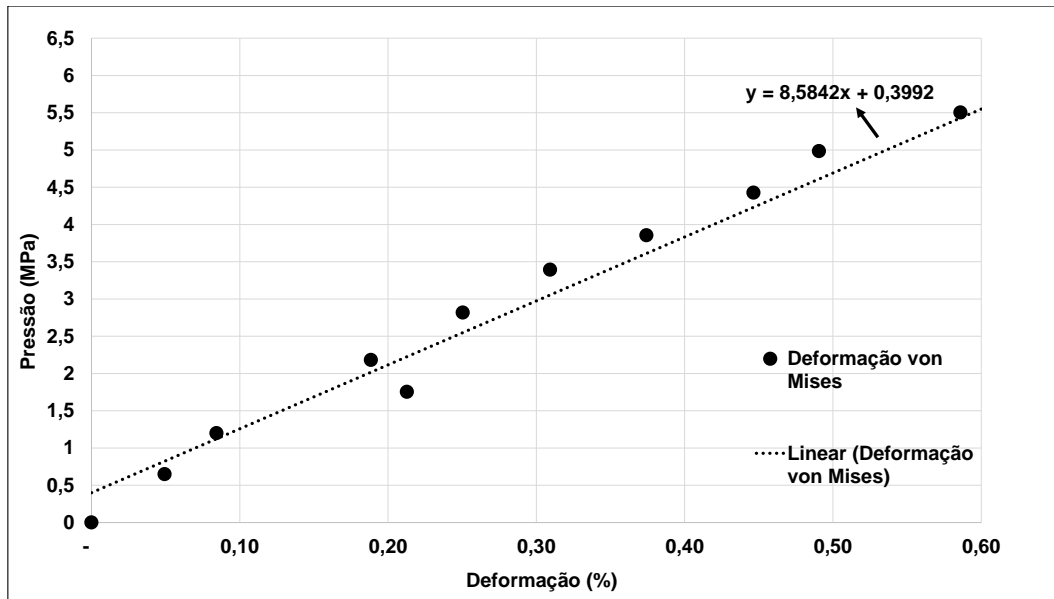


Figura 3.11: Gráfico da pressão x deformação do espécime 6, ponto E.

Posteriormente foram plotados os gráficos da pressão em função das tensões para cada ponto, porém o gráfico foi limitado até a pressão de 4 MPa e até a tensão de 500 MPa, pois a tensão superior a 450 MPa está acima do limite de escoamento do material. Este resultado foi encontrado no ensaio uniaxial e será descrito na Seção 4.1. Para melhor didática, tal gráfico do espécime 6 ponto E, é mostrado na Figura 3.12. O coeficiente angular da melhor reta dos pontos da tensão equivalente de von Mises foi utilizado para determinar tal tensão, e assim diminuir o erro.

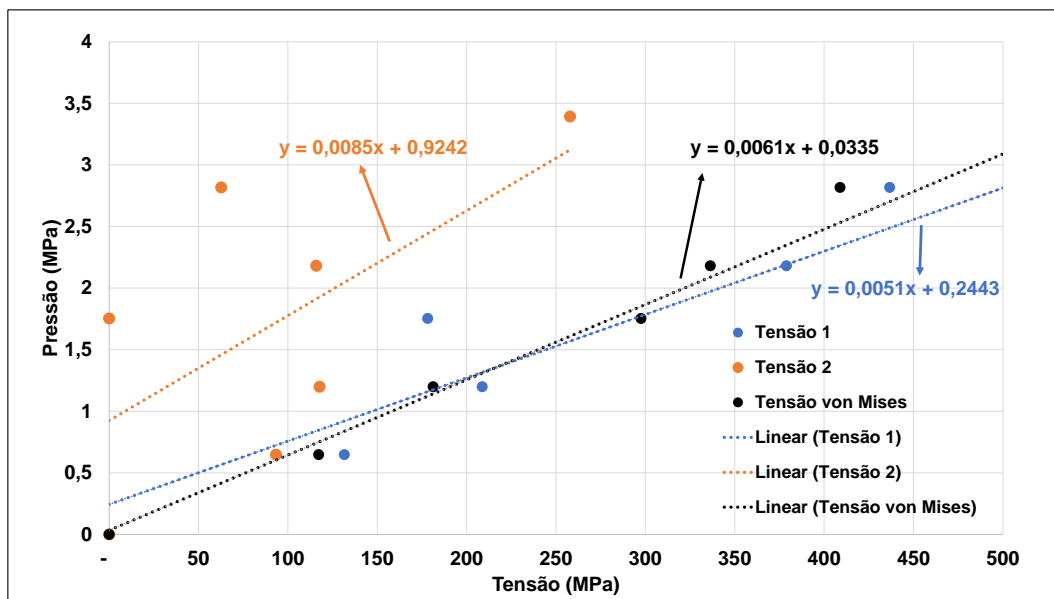


Figura 3.12: Gráfico da pressão x tensão do espécime 6, ponto E.

Para cada ponto analisado, foi determinada a razão de biaxialidade,

$(\frac{Tens\tilde{a}o2}{Tens\tilde{a}o1})$. A Tabela 3.3 mostra os valores da biaxialidade encontrada nos pontos estudados.

Tabela 3.3: Razão da biaxialidade dos pontos analisados.

Pontos	Razão de biaxialidade (Tensão 2/Tensão 1)
1-E	0,4
1-F	0,3
2-A	0,1
4-A	0,5
5-E	0,5
5-F	0,4
6-E	0,6
6-F	0,3
7-E	0,3
7-F	0,3
8-E	0,3
8-F	0,3
9-E	0,4
9-F	0,7

3.4

Definição do ponto da Temperatura Mínima Característica (TMC)

Nesta parte do trabalho são apresentados e descritos os três métodos desenvolvidos e aplicados para determinar o ponto de temperatura mínima característica. Inicialmente o autor procurou definir um polinômio de segundo grau, que representasse de forma satisfatória os dados obtidos da temperatura nos casos biaxiais. Porém a aproximação foi ruim, devido a variabilidades dos dados.

O primeiro método se baseia no gráfico da pressão e temperatura em função do tempo, plotados através dos dados obtidos no ensaio da TIV. Traçam-se as duas melhores retas em torno dos pontos de temperatura. Uma reta com a temperatura descendente e a outra ascendente. A interseção entre as duas retas é o ponto da TMC. Observe o método aplicado na Figura 3.13 no espécime 4, ponto A.

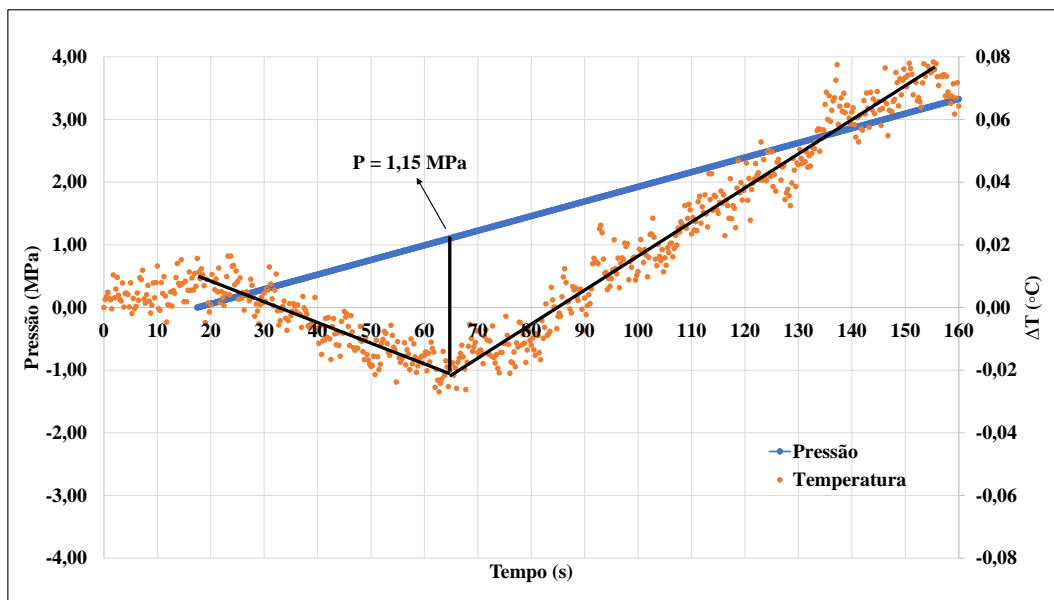


Figura 3.13: Gráfico da Pressão e Temperatura em função do Tempo em detalhes. Espécime 4, ponto A. Primeiro método aplicado para determinar o ponto da temperatura mínima característica.

O segundo método tem os mesmos procedimentos do anterior para encontrar o ponto de temperatura crítica, porém é baseado no gráfico da pressão e temperatura em função da deformação equivalente de von Mises. A Figura 3.14 mostra a aplicação deste método também para o espécime 4, ponto A.

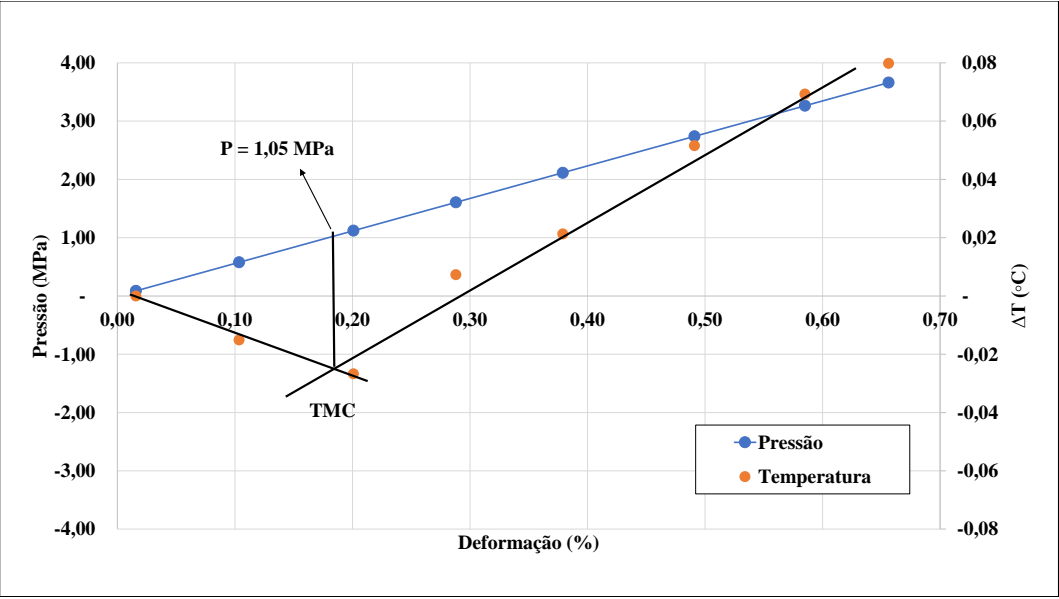


Figura 3.14: Gráfico da Pressão e Temperatura em função do Tempo. Espécime 4, ponto A. Segundo método aplicado para determinar o ponto da temperatura mínima característica.

Já o terceiro método é diferente dos demais, pois ocorre menos interferência do autor, pois ele divide os dados de temperatura em duas partes, uma descendente e a outra ascendente, mas a melhor reta é determinada através da regressão linear. O encontro entre as duas retas será o ponto da TMC. Veja na Figura 3.15 o método aplicado para o espécime 4, ponto A.

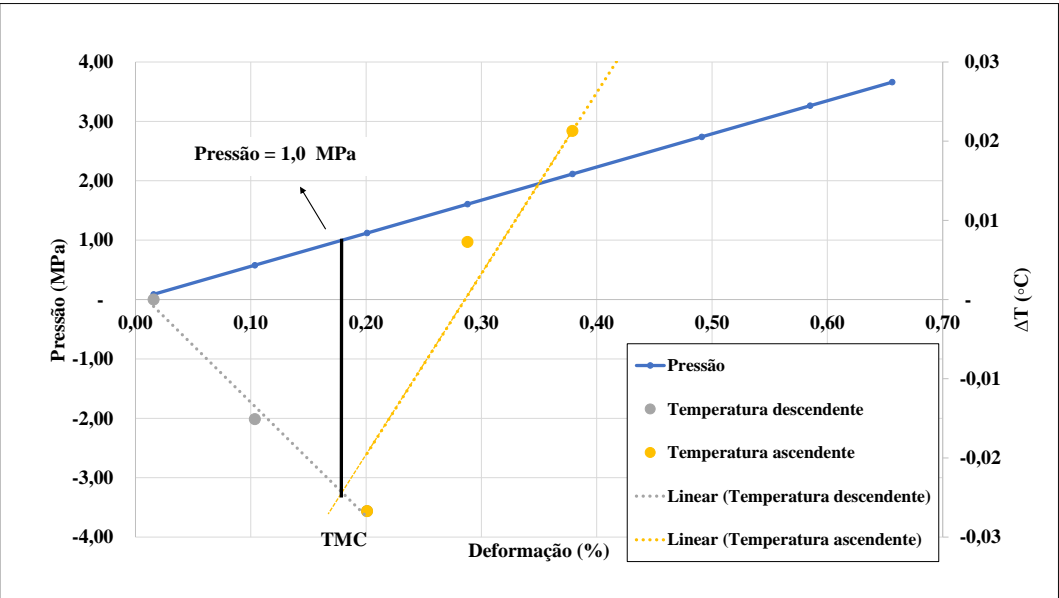


Figura 3.15: Gráfico da Pressão e Temperatura em função do Tempo. Espécime 4, ponto A. Terceiro método aplicado para determinar o ponto da TMC.

A Figura 3.16 mostra o gráfico da temperatura e deformação em função do tempo, referente ao segundo método e sobreposto a nuvem de temperatura do espécime 7, ponto F.

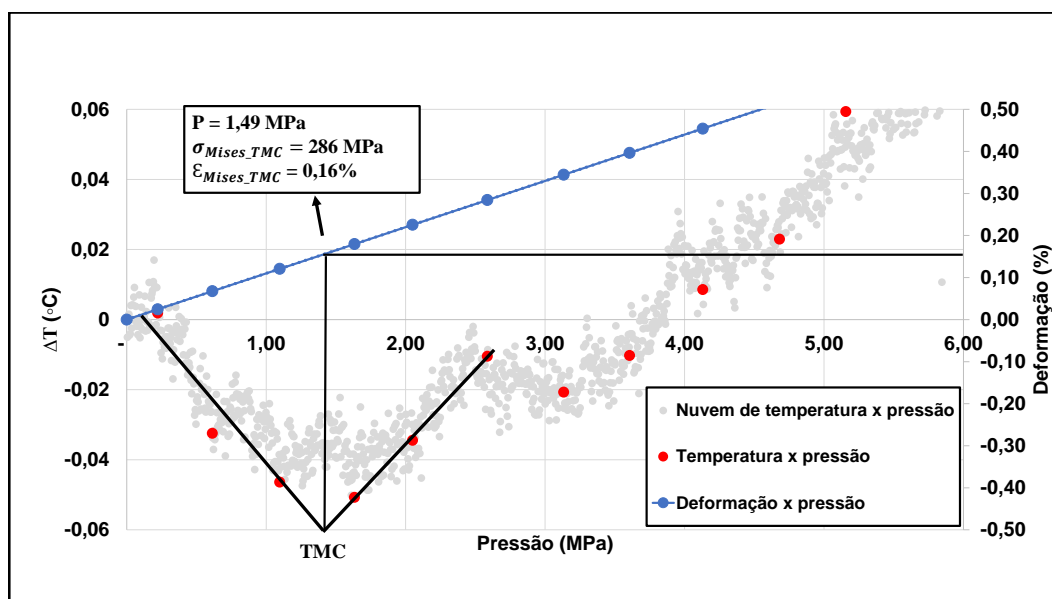


Figura 3.16: Gráfico da temperatura e deformação em função da pressão. Espécime 7, ponto F. Segundo método sobreposto a nuvem de temperatura.

3.5

Definição da Zona da Temperatura Mínima Característica (ZTMC)

A transição do comportamento elástico para o plástico é gradual; ocorre uma curvatura no início da deformação plástica, que aumenta mais rapidamente com o aumento da tensão (Callister Jr & Rethwisch, 2016). Na curva da temperatura nos ensaios biaxiais é determinada uma Zona de Temperatura Mínima Característica (ZTMC), onde ocorre essa transição do comportamento elástico para o plástico.

O método para determinar a ZTMC se baseia no gráfico da pressão e temperatura em função do tempo, plotados através dos dados obtidos no ensaio da TIV. Traçam-se as duas melhores retas em torno dos pontos da temperatura. Uma reta com a temperatura descendente e a outra ascendente, até atingirem as extremidades do retângulo criado. Este é formado abrangendo a região da nuvem de temperatura horizontal. Após a visualização da Figura 3.17, ficará mais fácil a compreensão.

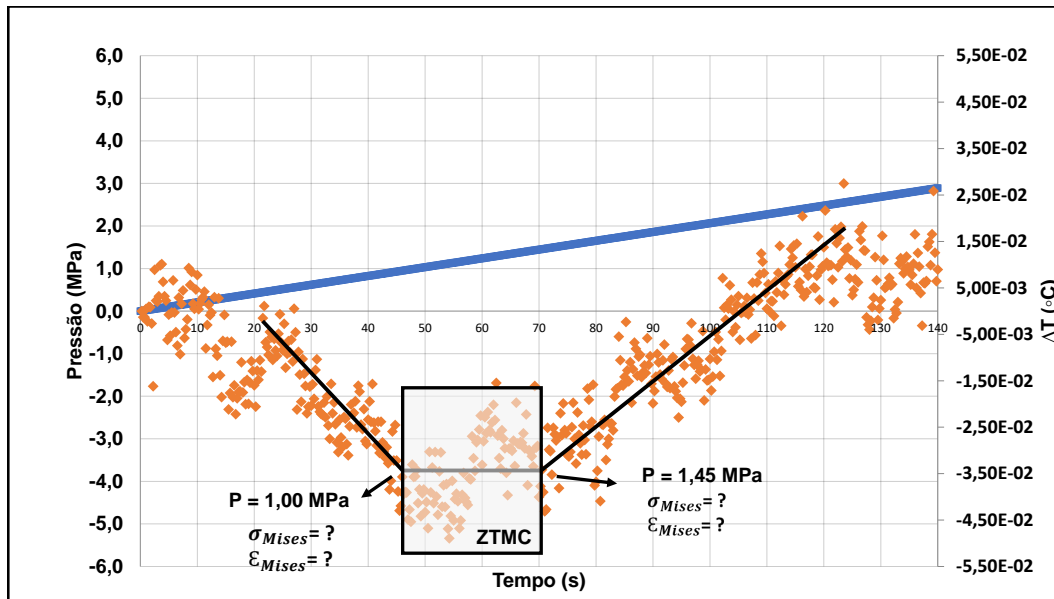


Figura 3.17: Gráfico da pressão e temperatura em função do Tempo. Espécime 1, ponto E. Determinação da ZTMC.

3.6

Questionamentos

Com o valor da pressão de carregamento é possível encontrar a deformação total (elástica + plástica) equivalente de von Mises, e no caso do regime elástico a tensão equivalente de von Mises. Mas para qual pressão de carregamento? Esta pergunta é respondida pelo ensaio de termografia realizado nos componentes estruturais. Este trabalho buscou saber a deformação e a tensão equivalente de von Mises no ponto da temperatura mínima característica, como definido Seção 3.4, pois o ensaio uniaxial mostrou que neste ponto o material está na iminência de escoar. Este resultado será detalhado na Seção 4.1.

A metodologia desenvolvida e descrita permitirá responder aos seguintes questionamentos:

1. Quais são as tensões e deformações equivalente de von Mises no ponto mínimo da curva de temperatura nos ensaios uniaxiais e biaxiais?
2. As deformações nesses pontos, em ambos os ensaios, sugerem o escoamento do material?
3. Quais os valores das σ_{Mises} e ε_{Mises} na extremidade da esquerda da ZTMC?
4. Na extremidade direita da ZTMC, não é possível determinar as tensões, pois não estamos no caso elástico. Mas é possível determinar as ε_{Mises} ; quais são seus valores?

Este trabalho também irá comparar (Seção 4.1.6) o valor do limite de fadiga encontrado por Paiva *et al.* (2020) com o valor encontrado através do ensaio realizado em um único corpo de prova, onde mais recentemente também foi aplicado o método quase-estático, Paiva *et al.* (2021).

O autor utilizou dos mesmos pontos determinados por Paiva (2020), que através do MEF mensurou o limite de fadiga (S_L) do aço API 5L Grau B nos ensaios biaxiais², para determinar o S_L por meio das informações dos resultados encontrados nos ensaios DIC³. Os valores serão comparados e analisados na Seção 4.2.1.

²Os dados dos ensaios da TIV foram fornecidos pelo doutor Vitor Eboli Lopes Paiva (PUC-Rio). Eles estão contidos no relatório do projeto.

³Os dados dos ensaios DIC foram fornecidos pelo doutor Giancarlo Luis Gómez Gonzáles (PUC-Rio). Eles estão contidos no relatório do projeto.

4

Resultados e discussões

Nessa Seção serão apresentados dois conjuntos de resultados. O primeiro referente aos ensaios de tração em espécimes "dog bone", sob condição de carregamento estático. Em seguida serão apresentados os resultados encontrados para os ensaios biaxiais, ou seja, nos dutos com mossas.

4.1

Resultados do ensaio com estado de tensão uniaxial

Cabe lembrar a sequência do procedimento do ensaio uniaxial, que consistiu em carregar e descarregar os espécimes "dog bone" três vezes consecutivas até atingir 1% da deformação permanente, depois mais um ciclo completo até atingir 3% e um último ciclo completo até atingir 5% (Paiva *et al.*, 2020). Os resultados são apresentados nessa sequência. Os ensaios foram iniciados com uma pré-carga de 100MPa para evitar qualquer tipo de folga na fixação do corpo de prova, e assim eliminar os ruídos iniciais dos dados devido as folgas. A pergunta 1 feita na metodologia é respondida nesta Seção, referente ao caso uniaxial.

4.1.1

Primeira Série (Primeiro 1%)

O gráfico de tensão x deformação, acrescido da temperatura para a primeira série do corpo de prova 7 "dog bone", é observado na Figura 4.1. O valor do limite de fadiga, determinado através do método quase-estático para $R = -1$, é de 230 MPa. Destaca-se também o valor da tensão para o ponto da TMC, valor de 310 MPa. Já o valor de 400 MPa é o limite de escoamento encontrado determinado pelo método da pré-deformação permanente de 0,002 ou 0,2%, como definido na Seção A.2, doravante limite de escoamento (MYS). Foi determinado também o módulo de elasticidade do material, $E = 200$ GPa. Estes valores também podem ser observados no gráfico da temperatura e deformação em função da tensão na Figura 4.2.

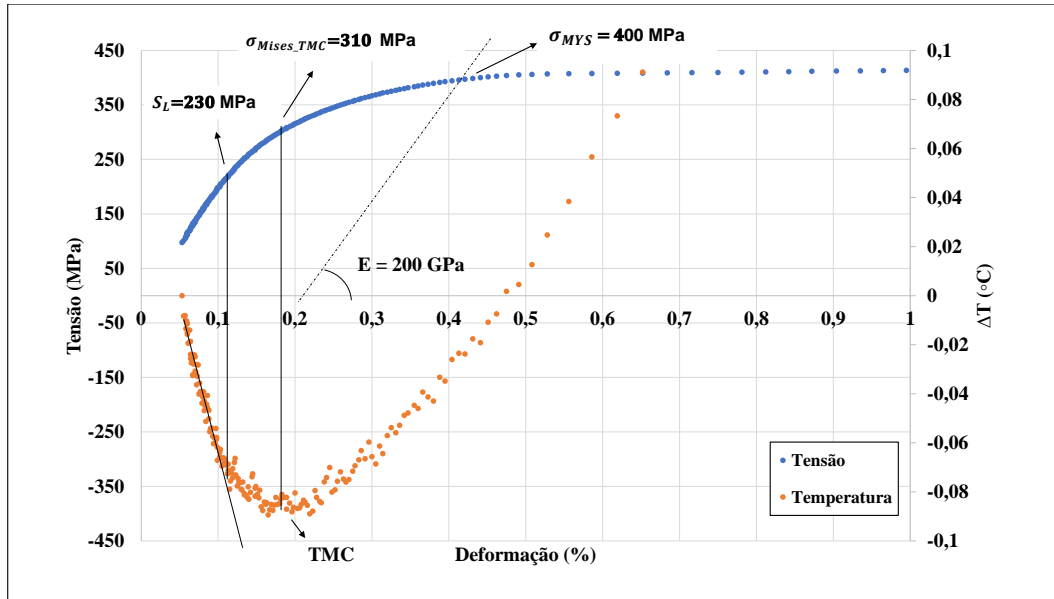


Figura 4.1: Gráfico da tensão em função de deformação, acrescido da temperatura. Corpo de prova 7, primeira série. $S_L = 230$ MPa, $E = 200$ GPa, $\sigma_{Mises} = 310$ MPa no ponto da TMC e $\sigma_{MYS} = 400$ MPa.

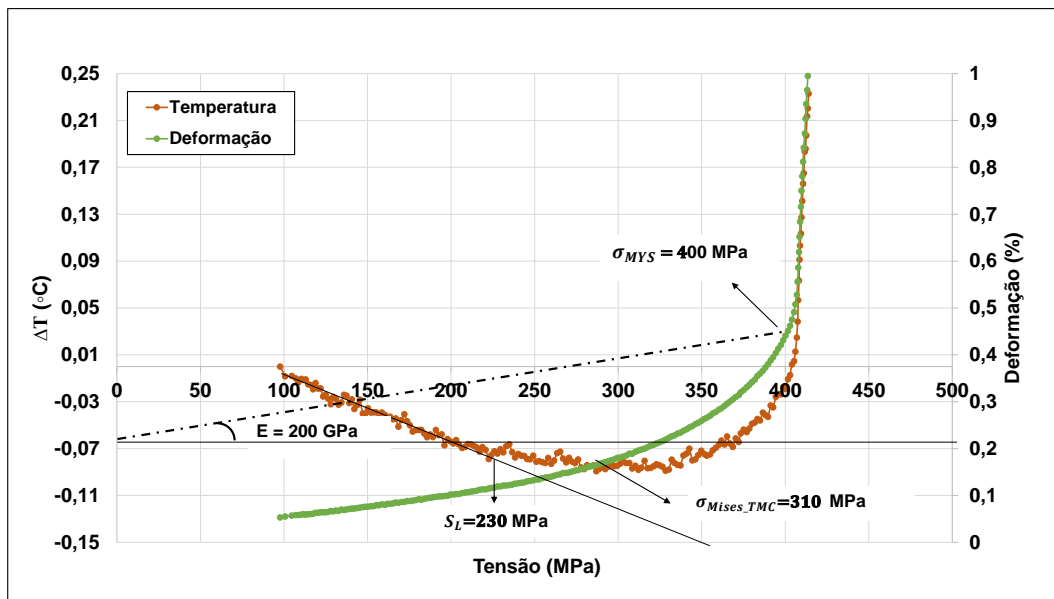


Figura 4.2: Gráfico da temperatura e deformação em função da tensão. Corpo de prova 7, primeira série. $S_L = 230$ MPa, $E = 200$ GPa, $\sigma_{Mises} = 310$ MPa no ponto da TMC e $\sigma_{MYS} = 400$ MPa.

4.1.2

Segunda Série (Segundo 1%)

Foram determinados as tensões para o limite de fadiga, para o ponto da TMC e do limite de escoamento, tal como observado no gráfico de tensão e deformação acrescido da curva de temperatura na Figura 4.3, nela é destacado também o

valor encontrado do módulo de elasticidade. Esses valores estão destacados novamente no gráfico da temperatura e deformação em função da tensão, Figura 4.4.

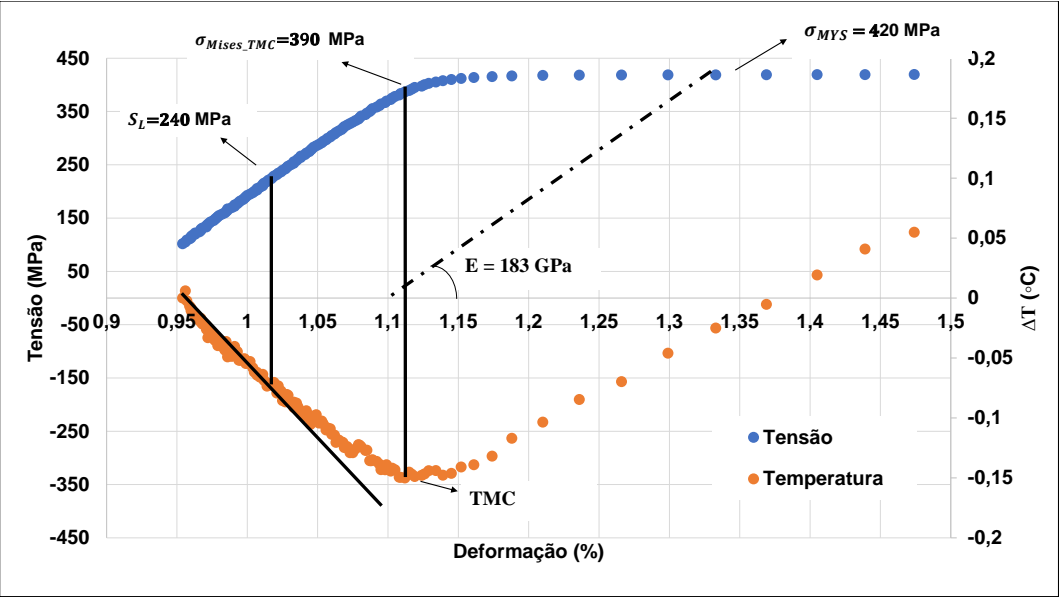


Figura 4.3: Gráfico da temperatura e deformação em função da tensão. Corpo de prova 7, segunda série. $S_L = 240$ MPa, $E = 183$ GPa, $\sigma_{Mises} = 390$ MPa no ponto da TMC e $\sigma_{MYS} = 420$ MPa.

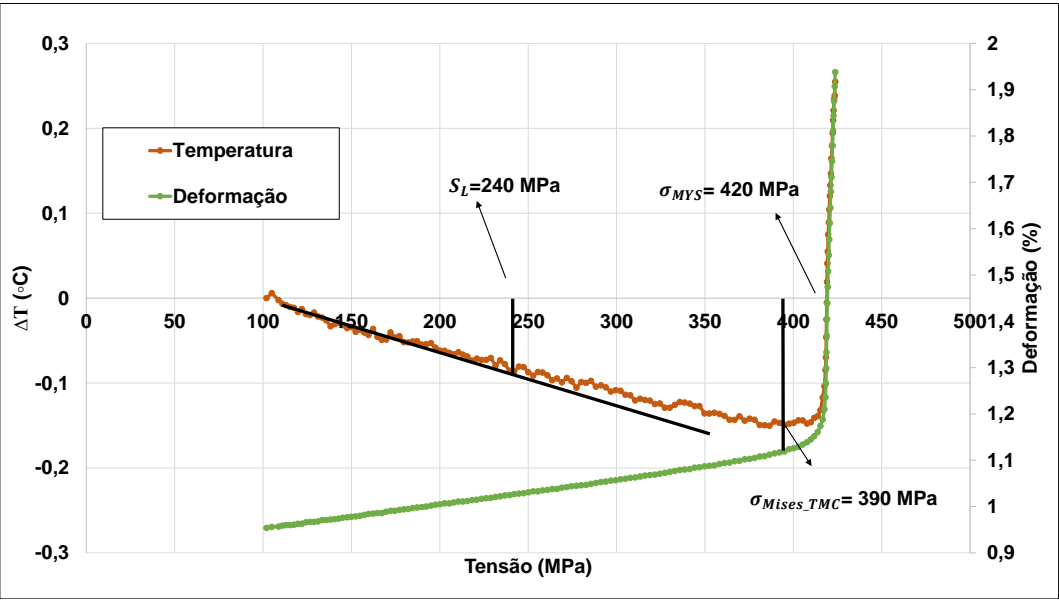


Figura 4.4: Gráfico da temperatura e deformação em função da tensão. Corpo de prova 7, segunda série. $S_L = 240$ MPa, $\sigma_{Mises} = 390$ MPa no ponto da TMC e $\sigma_{MYS} = 420$ MPa.

É possível observar o efeito do encruamento já na segunda série. A Figura 4.5 mostra a primeira e a segunda séries juntas no diagrama tensão-deformação acrescido da temperatura. Observe que o limite de escoamento aumenta, de 400 MPa na primeira série para 420 MPa na segunda série. Este aumento aconteceu também para a tensão referente ao ponto da TMC, $\sigma_{Mises_TMC} = 310$ MPa na primeira e $\sigma_{Mises_TMC} = 390$ MPa na segunda série. Os dois gráficos são sobrepostos na Figura 4.6. Nela, pode ser constatada a diferença entre as duas curvas. Na primeira série, a curva é mais suave - comportamento já esperado, pois esta foi a primeira vez em que o corpo de prova foi ensaiado e encruado. O corpo de prova não foi retirado da máquina, apenas a tensão reduzida até o valor de 100 MPa.

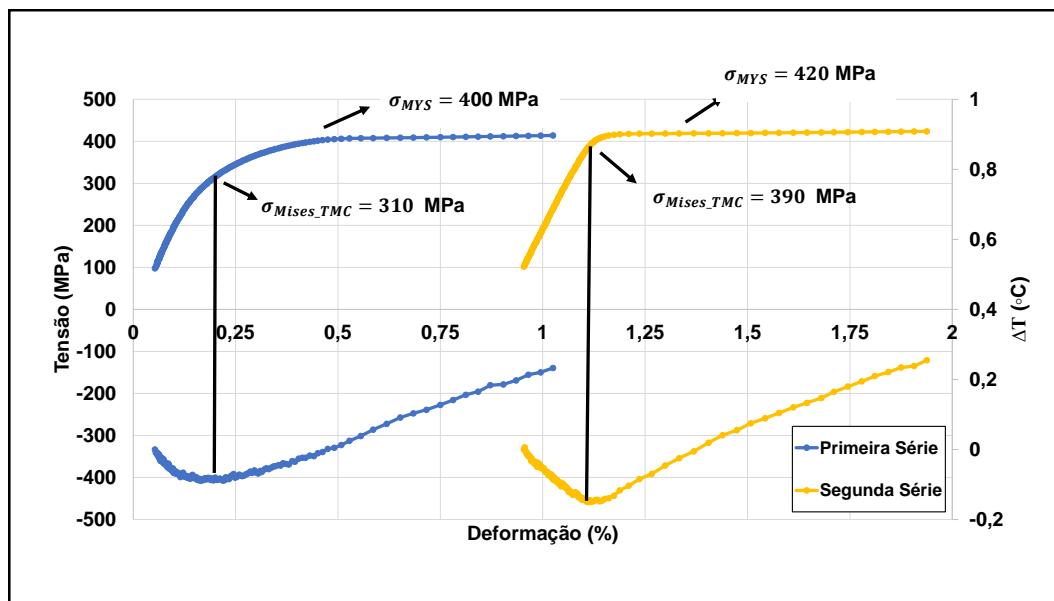


Figura 4.5: Gráfico da tensão e temperatura em função da deformação. Corpo de prova 7, primeira e segunda séries juntas.

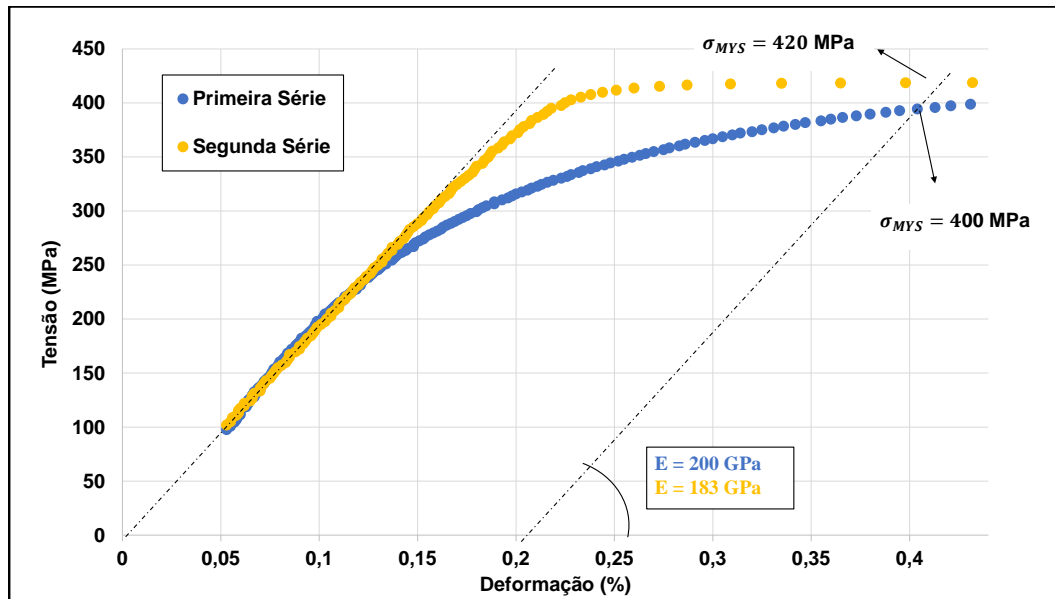


Figura 4.6: Representa o diagrama tensão-deformação para as duas séries sobrepostas. $E = 200$ GPa referente a primeira série e $E = 183$ GPa para segunda.

4.1.3

Terceira Série (Terceiro 1%)

São apresentados na Figura 4.7 os valores do limite de fadiga, do limite de escoamento e da tensão para o “cotovelo” da curva da temperatura em função da deformação para a terceira série do corpo de prova 7.

Na Figura 4.8 a temperatura e a deformação estão em função da tensão. Nela são destacados os valores do limite de fadiga, tensão equivalente de von Mises no ponto da TMC e do limite de escoamento, 250 MPa, 400 MPa e 430 MPa respectivamente.

Todas as séries até agora mostradas podem ser observadas juntas na Figura 4.9, gráfico da tensão e temperatura em função da deformação.

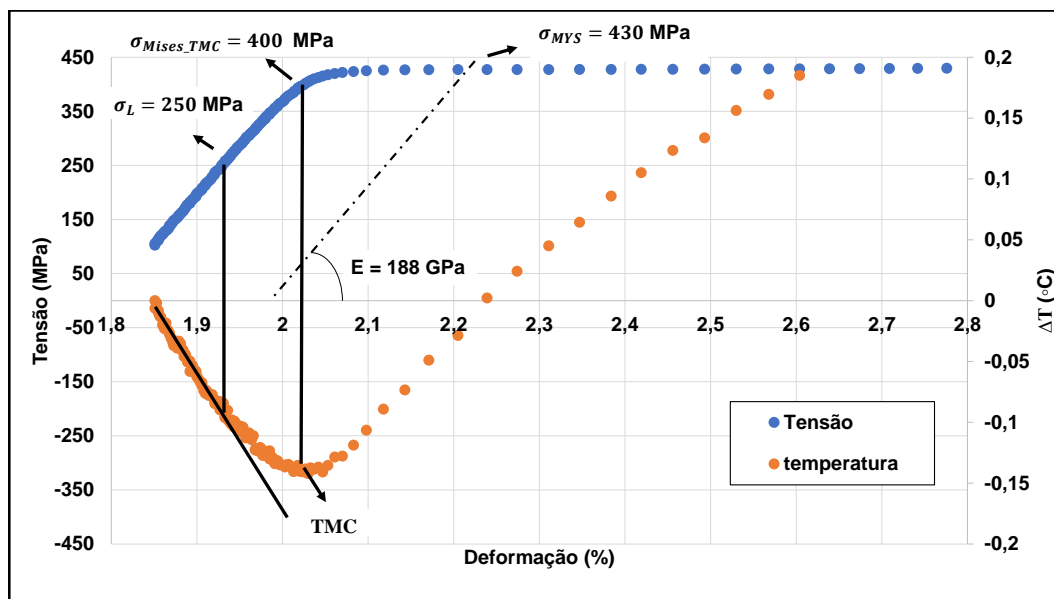


Figura 4.7: Gráfico da tensão em função de deformação, acrescido da temperatura. Corpo de prova 7, terceira série. Limite de fadiga 250 MPa, tensão no “cotovelo” da curva de temperatura 400 MPa e limite de escoamento no valor de 430 MPa.

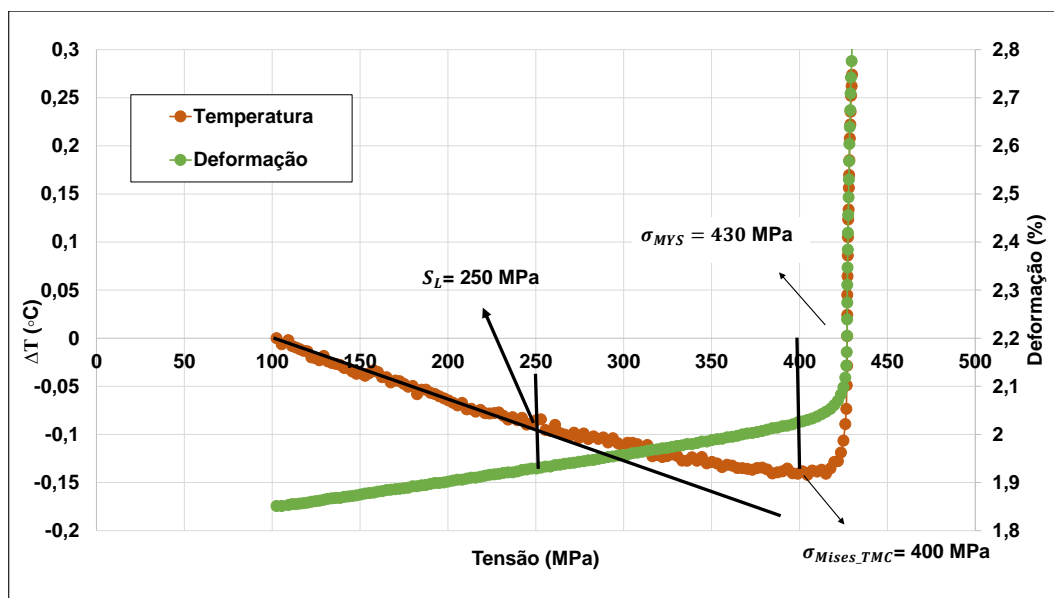


Figura 4.8: Gráfico da temperatura e deformação em função da tensão. Corpo de prova 7, terceira série. Limite de fadiga 250 MPa, tensão no ponto da TMC 400 MPa e Limite de escoamento 430 MPa.

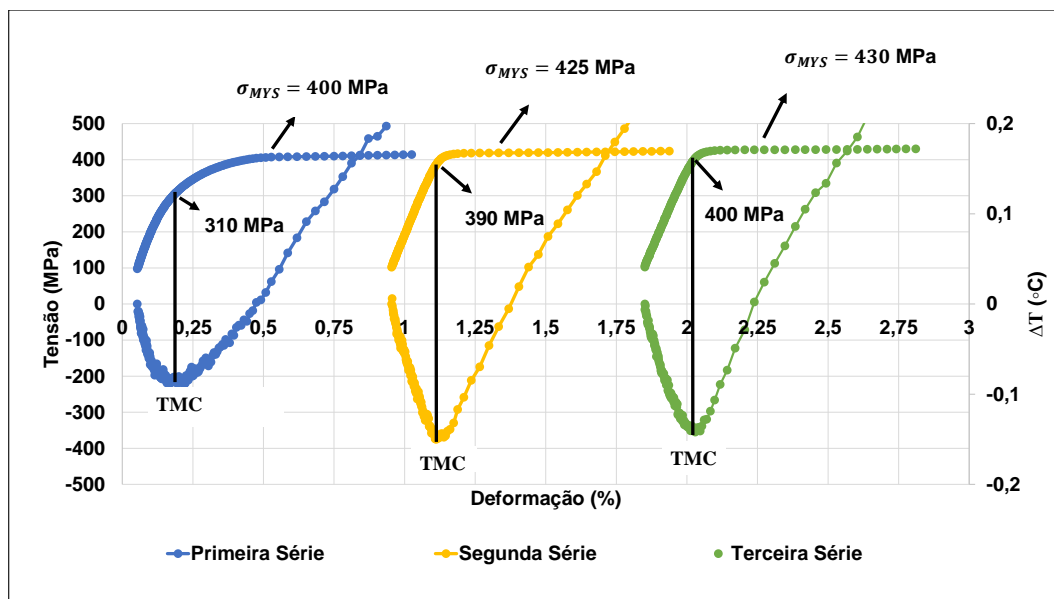


Figura 4.9: Gráfico da tensão e temperatura em função da deformação. Corpo de prova 7. Primeira, segunda e terceira séries juntas.

4.1.4

Quarta Série (3%)

O gráfico da tensão e temperatura em função da deformação referente a quarta série, é observado na Figura 4.10. Destacam-se os valores do limite de fadiga de 245 MPa, da tensão no ponto da TMC de 410 MPa e do limite de escoamento de 433 MPa.

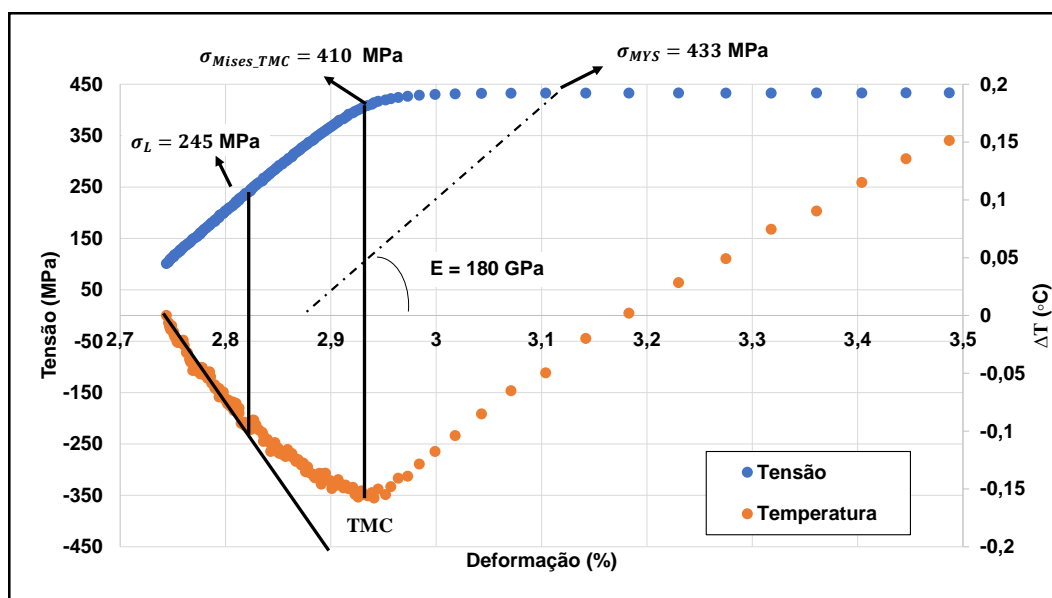


Figura 4.10: Gráfico da tensão e temperatura em função da deformação. Corpo de prova 7, quarta série. Limite de fadiga de 245 MPa, tensão no ponto da TMC de 410 MPa e limite de escoamento de 433 MPa.

O gráfico da temperatura e deformação em função da tensão está na Figura 4.11. Os valores destacados de 245 MPa, 410 MPa e 433 MPa são respectivamente limite de fadiga, tensão para o ponto da TMC e limite de escoamento.

Todas as séries juntas até agora apresentadas são vistas em um único gráfico na Figura 4.12.

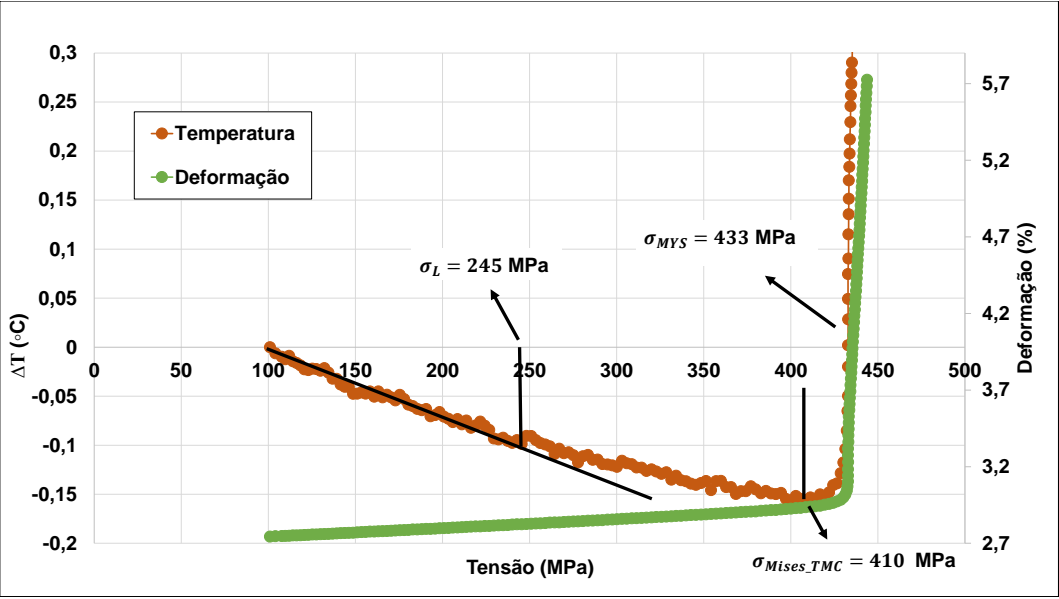


Figura 4.11: Gráfico da temperatura e deformação em função da tensão. Corpo de prova 7, quarta série. Limite de fadiga 245 MPa, tensão no ponto da TMC 410 MPa e Limite de escoamento 433 MPa.

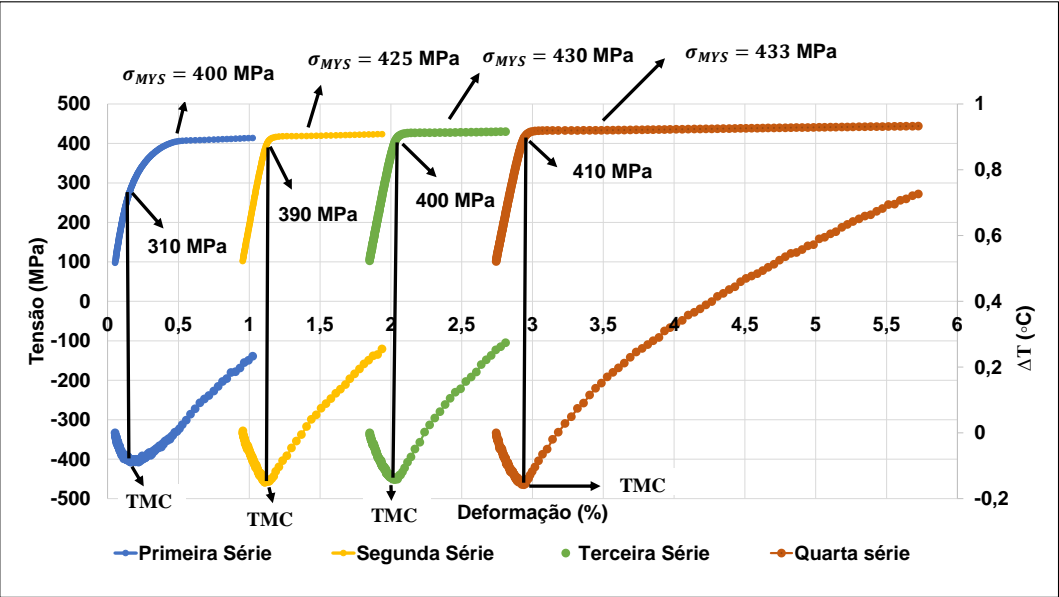


Figura 4.12: Gráfico da tensão e temperatura em função da deformação. Corpo de prova 7. Primeira, segunda, terceira e quarta séries juntas.

4.1.5

Quinta Série (5%)

Última série do ensaio uniaxial. Veja na Figura 4.13 o gráfico da tensão e temperatura em função da deformação. Em destaques estão os valores do limite de fadiga de 258 MPa, da tensão no ponto da TMC de 420 MPa e do limite de escoamento de 450 MPa.

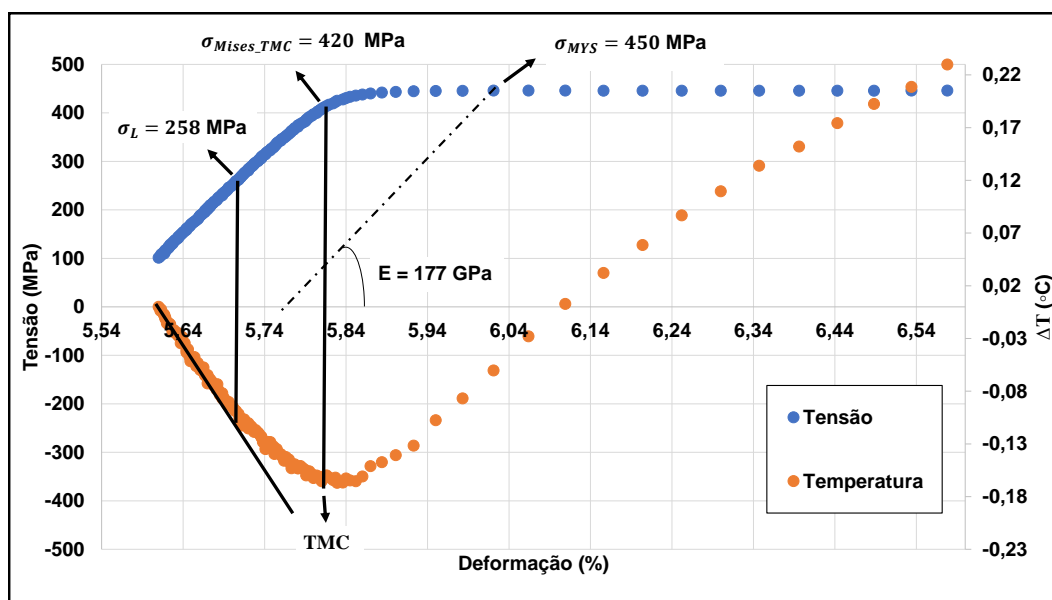


Figura 4.13: Gráfico da tensão e temperatura em função da deformação. Corpo de prova 7, quinta série. Limite de fadiga de 258 MPa, tensão no ponto da TMC de 420 MPa e limite de escoamento de 450 MPa.

Na Figura 4.14 está o gráfico da temperatura e deformação em função da tensão. Os valores de 258 MPa, 420 MPa e 450 MPa em destaques são referentes ao limite de fadiga, da tensão no ponto da TMC e do limite de escoamento, respectivamente.

Observe na Figura 4.15 todas as séries realizadas juntas em um mesmo diagrama tensão-deformação acrescido da temperatura de uma forma global, pois na Figura 4.16, o mesmo diagrama é apresentado com outra escala e destacados os valores da tensão no ponto da TMC e do limite de escoamento. Note que estas tensões aumentam em cada acréscimo de série, isto será discutido na próxima Seção (4.1.6).

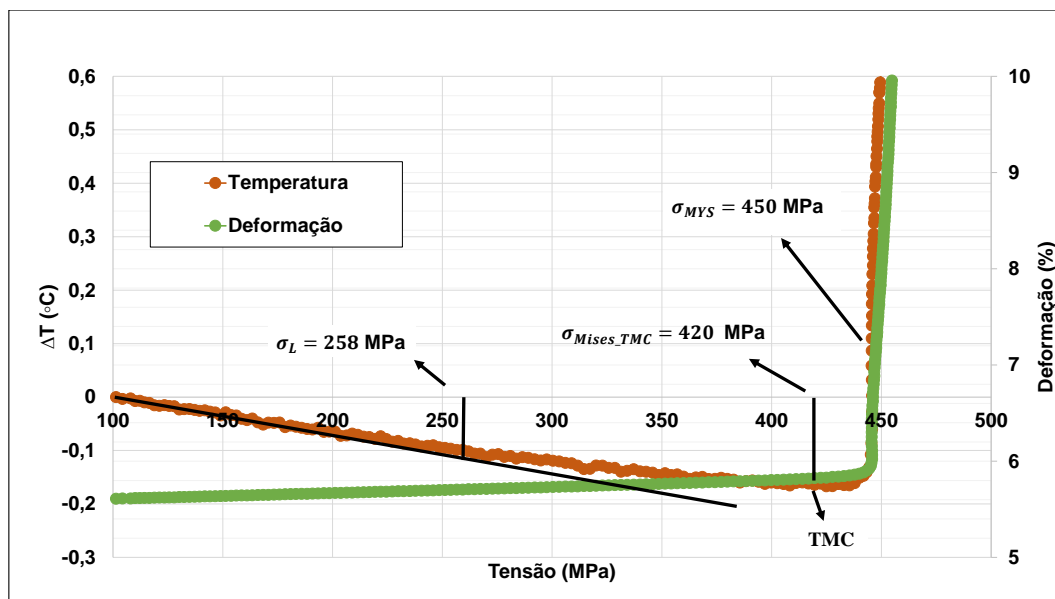


Figura 4.14: Gráfico da temperatura e deformação em função da tensão. Corpo de prova 7, quinta série. Limite de fadiga 258 MPa e Limite de escoamento 450 MPa.

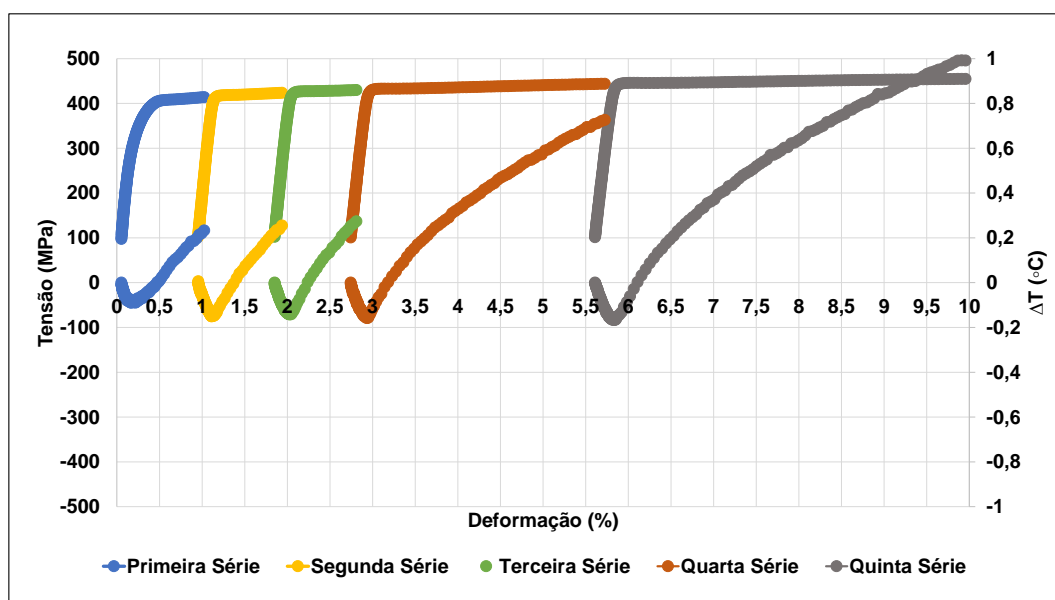


Figura 4.15: Gráfico da tensão e temperatura em função da deformação. Corpo de prova 7. Todas as séries juntas.

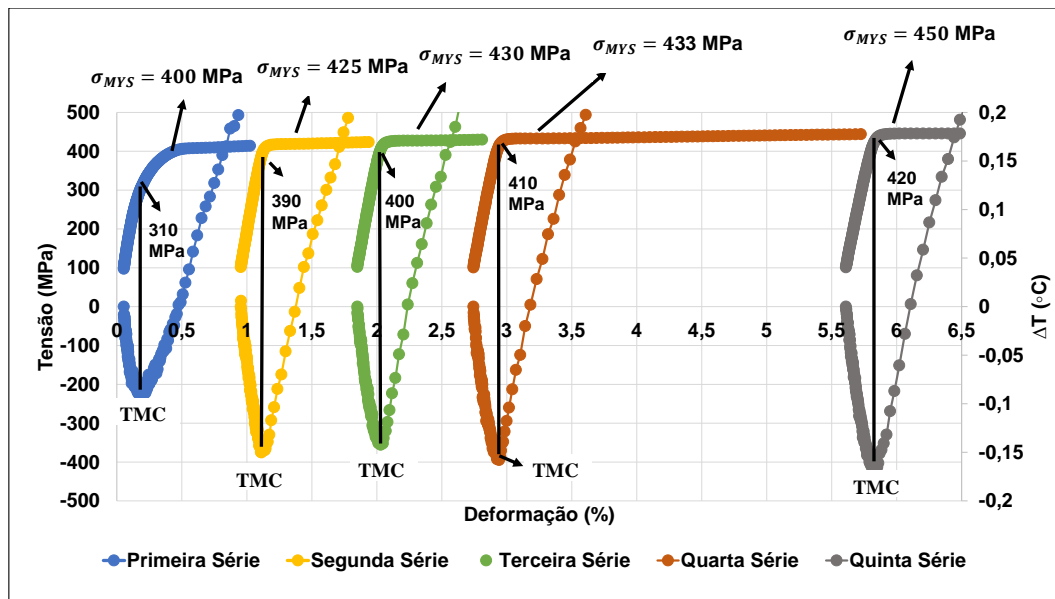


Figura 4.16: Gráfico da tensão e temperatura em função da deformação. Corpo de prova 7. Todas as séries juntas.

4.1.6

Discussões do ensaio com estado de tensão uniaxial

Para cada série realizada neste ensaio, foi determinado através do método quase-estático o limite de fadiga do material para $R = -1$. Veja na Tabela 4.1 os valores encontrados.

Tabela 4.1: Valores do Limite de Fadiga encontrados através do método quase-estático. Corpo de prova 7. Ensaio uniaxial.

CP-7	S_L (MPa)
Primeira Série	230
Segunda Série	240
Terceira Série	250
Quarta Série	245
Quinta Série	258
Média	245
Desvio Padrão	9,4

A média do limite de fadiga foi de 245 MPa com desvio padrão de 9,4 MPa, com desvio de 2,2% do valor convencional, estimado como a metade da resistência a tração do material de 250 MPa. O valor encontrado foi igual ao determinado por Paiva *et al.* (2020) nos CPs de 1 a 6, de 245 MPa com desvio de 24 MPa.

Outro resultado importante observado no ensaio uniaxial foi o aumento não só do limite de escoamento do material, mas também do valor da tensão para o ponto referente ao “cotovelo” da curva de temperatura, ou seja, no ponto da TMC. Na primeira série o limite de escoamento para deformação permanente de 0,2% ocorreu em 400 MPa de tensão, tendo seu início observado no ponto do “cotovelo” da curva de temperatura, valor referente apenas 310 MPa. Já na última série o valor da tensão no ponto do “cotovelo” foi de 420 MPa e de limite de escoamento 0,2% de 450 MPa. Como visto da Seção A.3, o aumento do limite de escoamento era esperado.

A média do módulo de elasticidade (E) calculada foi de 185 GPa, um desvio padrão de 8 GPa e desvio de 1,6% em relação ao valor informado na Tabela 3.1, com os dados do material, Aço API 5L Grau B.

O ponto referente ao “cotovelo” da curva de temperatura nos ensaios uniaxiais foi denominado ponto de temperatura mínima característica (TMC)

na Seção 3.2, pois neste ponto o material contrabalança os efeitos das temperaturas relativas às deformações elásticas e plásticas existentes. Daí em diante as deformações plásticas aumentam até a ruptura.

Determinou-se a deformação total (ε) para todas a séries do ensaio, referentes aos pontos da TMC. Os valores encontrados estão na Tabela 4.2. Observe que a menor deformação ocorre na primeira série e a maior na última, com valores de 0,19% e 0,27% respectivamente.

Tabela 4.2: Valores da tensão e variação da deformação nos pontos da TMC.

Corpo de prova 7. Ponto da TMC.		
Séries	σ_{Mises_TMC} (MPa)	ε (%)
Primeira	310	0,19
Segunda	390	0,21
Terceira	400	0,23
Quarta	410	0,24
Quinta	420	0,27

4.2

Resultados do ensaio com estado de tensão biaxial

Os resultados dos ensaios biaxiais estão divididos em três partes. Uma referente ao limite de fadiga encontrado através do DIC nos mesmos pontos determinados por Paiva (2020), que usou análise por MEF. A segunda referentes aos valores encontrados nos pontos das TMCs e por último para as ZTMC.

4.2.1

Limite de Fadiga encontrados nos ensaios biaxiais

A partir do ponto de desvio da inclinação da curva de temperatura determinados por Paiva (2020), foi calculado o limite de fadiga por meio de dados de deformação medidos nos ensaios DIC para a mesma pressão usada no MEF. A Tabela 4.3 contém os valores encontrados pelo trabalho mencionado, enquanto a Tabela 4.4 os valores determinados através das deformações medidas pelo ensaio DIC.

Tabela 4.3: Limite de fadiga para $R = -1$, determinados através do MEF por Paiva (2020).

S_L (MPa) - MEF						
Espécimes	Ponto A		Ponto E		Ponto F	
	Pressão (MPa)	S_L (MPa)	Pressão (MPa)	S_L (MPa)	Pressão (MPa)	S_L (MPa)
1	-	-	1,12	235	1,18	189
2	1,43	238	-	-	-	-
4	0,80	309	-	-	-	-
5	-	-	1,32	242	0,99	196
6	-	-	1,26	236	1,55	288
7	-	-	1,23	220	1,14	218
8	-	-	1,08	197	1,23	204
9	-	-	1,15	243	1,11	221
Média S_L (MPa)			216			
Desvio Padrão S_L (MPa)			68			

Tal como mostrado nas Tabelas 4.3 e 4.4, para os mesmos pontos determinados por Paiva (2020), os valores do limite de fadiga encontrados através do MEF por Paiva (2020) e com o DIC, nesta dissertação, são próximos. Média de 216 MPa por MEF e de 225 MPa com o DIC. Ambos são próximos do valor convencional estimado como a metade da resistência a tração do material de 250 MPa, e do valor do ensaio uniaxial de 245 MPa (cf. Seção 4.1.6).

O desvio do valor encontrado neste trabalho em relação ao valor convencional é de 10%, já em relação ao resultado do ensaio uniaxial é de 8%. Estes desvios são justificados pelas incertezas inerentes ao próprio método. Verificam-se nestes ensaios ruídos elevados nos dados da temperatura nos instantes iniciais, provavelmente por conta de uma estabilização do comportamento das deformações dos componetes nas regiões de interesse, além do modo como o ensaio foi realizado, e o fato do ensaio da termografia e do DIC não terem sido realizados simultaneamente. Cabe ressaltar que os valores encontrados estão dentro do esperado, pois foi aplicado a um estado de tensão biaxial em espécimes tubulares no campo, que é bem diferente do estado uniaxial realizado em

corpos de provas no laboratório, onde há um controle melhor das condições envolvendo o ensaio.

Tabela 4.4: Valores do limite de fadiga determinados através da deformações medidas pelo ensaio DIC, nos pontos determinados por (Paiva, 2020).

	S_L (MPa)- DIC		
Espécimes	Ponto A	Ponto E	Ponto F
1	-	232	228
2	233	-	-
4	291	-	-
5	-	237	182
6	-	260	334
7	-	227	219
8	-	217	260
9	-	233	218
Média	225		
Desvio Padrão	71,5		

4.2.2

Valores encontrados no ponto da TMC nos ensaios biaxiais

Serão apresentados os gráficos estudados na Seção 3.4, referentes ao espécime 4, ponto A. Neles estarão o valor da tensão equivalente de von Mises nos pontos da TMC. A pergunta 1 feita na metodologia é respondida nesta Seção, referente ao caso biaxial.

Na Figura 4.17, o resultado encontrado aplicando o primeiro método para determinação do ponto da TMC. Este ponto está relacionado com uma pressão de 1,12 MPa, cuja $\sigma_{Mises_TMC} = 408$ MPa e $\varepsilon_{Mises_TMC} = 0,2\%$.

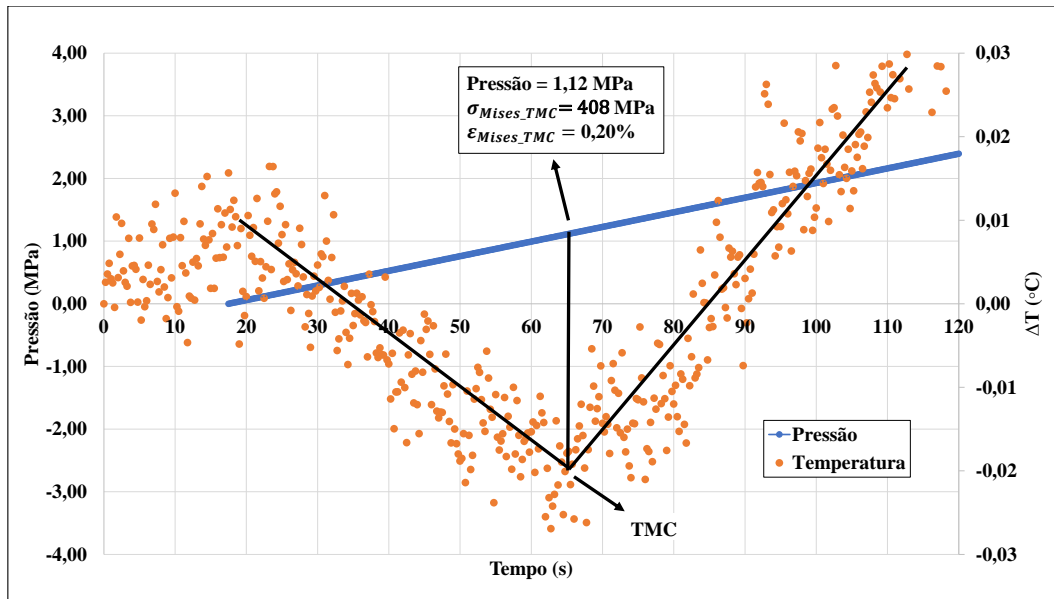


Figura 4.17: Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Espécime 4, ponto A. O ponto da TMC está relacionado com uma pressão de 1,12 MPa, cuja $\sigma_{Mises_TMC} = 408$ MPa e $\varepsilon_{Mises_TMC} = 0,2\%$.

O valor da tensão equivalente de von Mises, determinado a partir da aplicação do segundo método, é apresentado na Figura 4.18. O ponto da TMC está relacionado com uma pressão de 1,05 MPa, cuja $\sigma_{Mises_TMC} = 382$ MPa.

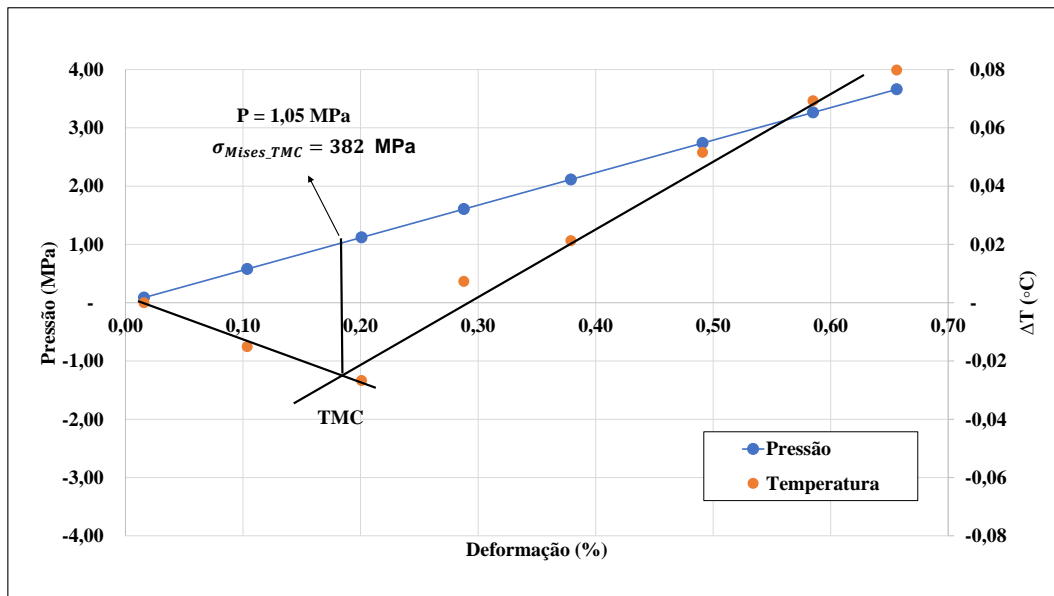


Figura 4.18: Gráfico da pressão e temperatura em função da deformação. Espécime 4, ponto A. O ponto da TMC está relacionado com uma pressão de 1,05 MPa, cuja $\sigma_{Mises_TMC} = 382$ MPa.

Após a aplicação do terceiro método para determinar o ponto da TMC, encontrou-se uma pressão de 1,0 MPa que nos retorna uma $\sigma_{Mises_TMC} = 364$ MPa, como é constatado na Figura 4.19.

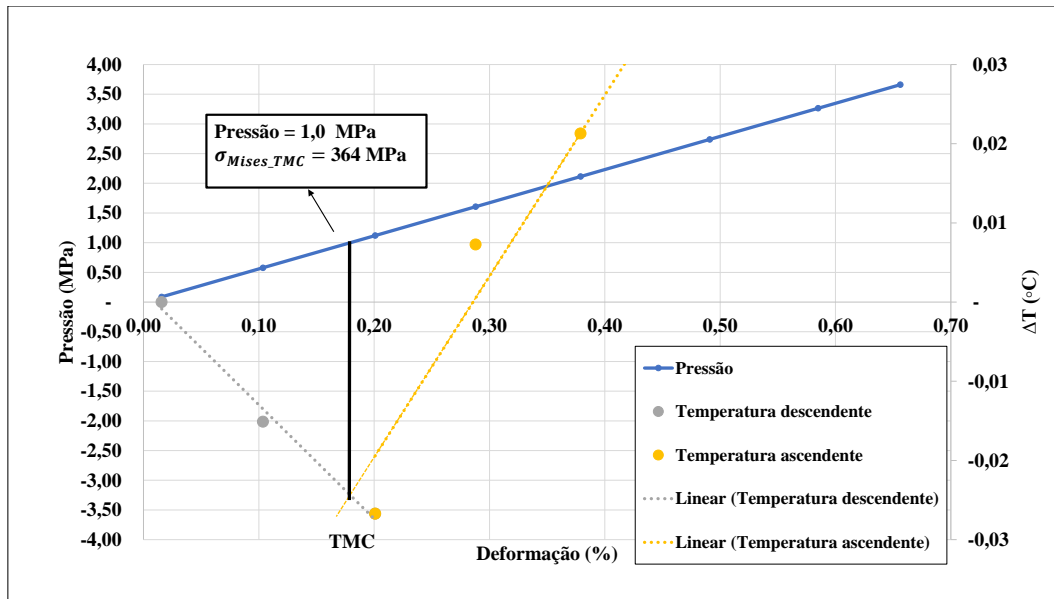


Figura 4.19: Gráfico da pressão e temperatura em função da deformação. Espécime 4, ponto A. O ponto da TMC está relacionado com uma pressão de 1,00 MPa, cuja $\sigma_{Mises_TMC} = 364$ MPa.

Dois pontos merecem serem destacados nos resultados apresentados. Primeiramente o menor valor da tensão equivalente de von Mises encontrado de 364 MPa já está acima do valor encontrado no ensaio uniaxial na primeira série do corpo de prova 7, referente ao ponto da TMC. O segundo ponto de destaque se refere ao valor da deformação, na ordem de 0,18%, compatível com os valores encontrados nos pontos da TMCs dos ensaios uniaxiais, em especial da primeira série do corpo de prova 7, aproximadamente 0,19% (cf. Seção 4.1.1, Figura 4.2).

Após o resultado mostrado graficamente do espécime 4 com todos os métodos, os demais resultados serão apresentados separados pelo método aplicado, primeiro, segundo e terceiro respectivamente.

4.2.2.1

Resultados do primeiro método aplicado para determinar o ponto da TMC

Os resultados serão apresentados através de tabelas. Veja na Tabela 4.5, os valores referentes ao ponto A dos espécimes 2 e 4, na Tabela 4.6 os valores no ponto E dos espécimes 1, 5, 7, 8 e 9, e na Tabela 4.7 os valores no ponto F dos espécimes 1, 5, 7, 8 e 9. Os referidos pontos foram destacados na Figura 3.4, na Seção 3.1.

Tabela 4.5: Valores das pressões, das σ_{Mises} e das ε_{Mises} determinadas através do primeiro método para determinar o ponto da TMC. Ponto *A* dos espécimes 2 e 4.

Primeiro Método. Ponto A.				
Espécimes		Pressão (MPa)	σ_{Mises} (MPa)	ε_{Mises}
2		2,27	377	0,23%
4		1,12	408	0,20%
Média		-	392	0,22%
Desvio Pa- drão		-	22	0,02%

Como observado na Tabela 4.5, a média do valor tensão foi de 392 MPa e da deformação foi de 0,22% para o ponto *A*. Valores acima dos encontrados no ponto da TMC do ensaio uniaxial, da primeira série do corpo de prova 7 (cf. Seção 4.1.1, Figura 4.2). Note que a tensão 392 MPa só foi atingida na segunda série do ensaio uniaxial, referente ao ponto da TMC, 390 MPa. Não se sabe o histórico completo de carregamento do material, mas com os resultados apresentados, verifica-ser que ele já sofreu um certo encruamento, como apresentado teoricamente na Seção A.3. Assim como no ensaio uniaxial, o ponto da TMC se mostra confiável em indicar escoamento do material também nos casos biaxiais.

O primeiro método aplicado nos pontos *E* e *F* retornou uma média de tensão equivalente de von Mises de 243 MPa e uma média da deformação equivalente de von Mises de 0,14%. Estes valores estão na Tabela 4.8. Embora ambos estejam abaixo do valor encontrado para o ponto da TMC do ensaio uniaxial, da primeira série do corpo de prova 7 (cf. Seção 4.1.1), de 310 MPa, o valor máximo da σ_{Mises} foi de 288 MPa e $\varepsilon_{Mises} = 0,16\%$. Percebe-se que o primeiro método para determinação do ponto de TMC sinalizou uma região onde ocorre transição da zona de deformação elástica para plástica. Esta última muito intensificada.

O espécime 6 foi o único em que não foi possível determinar as σ_{Mises} nos pontos da TMCs, pois os valores encontrados para as deformações são elevados, não podendo ser aplicada a Lei de Hooke, eq. A.3 para esta deformação, o material já tendo escoado, como mostrado na cf. Seção 4.1. Veja os valores encontrados e suas localizações na Figura 4.20 para o ponto *E*, e na Figura 4.21 para o ponto *F*.

Tabela 4.6: Valores das pressões, das σ_{Mises} e das ε_{Mises} determinadas através do primeiro método para determinar o ponto da TMC. Ponto *E* dos espécimes 1, 5, 7, 8 e 9.

Primeiro Método. Ponto E.				
Espécimes		Pressão (MPa)	σ_{Mises} (MPa)	ε_{Mises}
1		1,2	221	0,13%
5		1,49	269	0,17%
7		1,50	277	0,16%
8		1,15	241	0,14%
9		1,13	229	0,13%
Média		-	247	0,14%
Desvio	Pa-	-	25	0,02%
drão				

Tabela 4.7: Valores das pressões, das σ_{Mises} e das ε_{Mises} determinadas através do primeiro método para determinar o ponto da TMC. Ponto *F* dos espécimes 1, 5, 7, 8 e 9.

Primeiro Método. Ponto F.				
Espécimes		Pressão (MPa)	σ_{Mises} (MPa)	ε_{Mises}
1		1,28	228	0,13%
5		1,17	214	0,12%
7		1,50	288	0,16%
8		1,20	228	0,11%
9		1,20	236	0,15%
Média		-	239	0,13%
Desvio	Pa-	-	29	0,02%
drão				

Tabela 4.8: Apresenta as médias das σ_{Mises} e das ε_{Mises} determinadas pelo primeiro método para determinar o ponto da TMC. Pontos E e F .

Primeiro método. Pontos E e F		
	σ_{Mises} (MPa)	ε_{Mises}
Média	243	0,14%
Desvio Padrão	25,6	0,02%

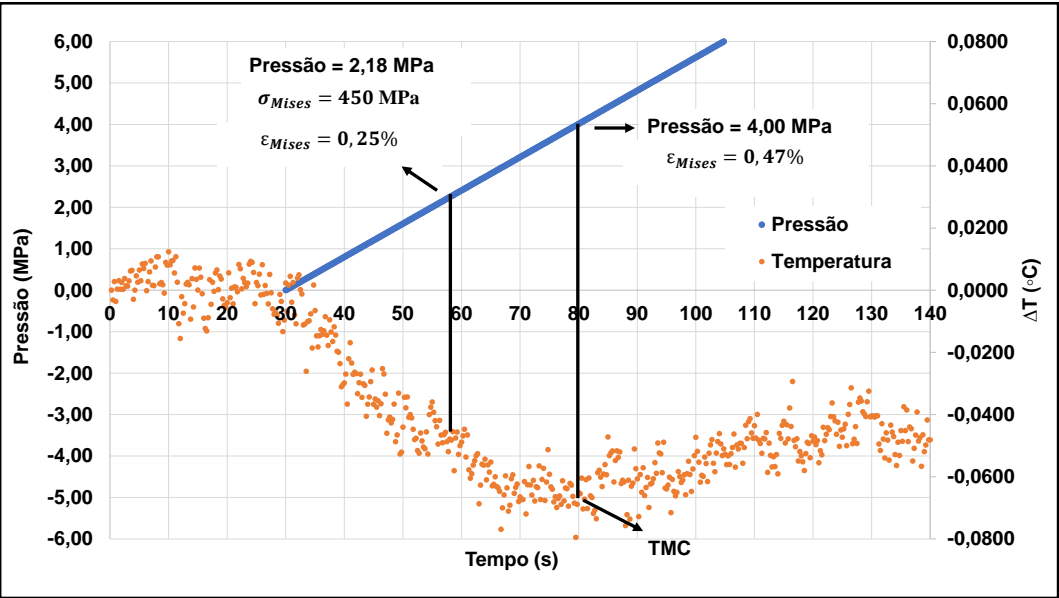


Figura 4.20: Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Espécime 6, ponto E . O ponto da TMC está relacionado com uma pressão de 4,0 MPa, cuja $\varepsilon_{Mises} = 0,47\%$. Para a $\sigma_{MYS} = 450$ MPa encontrada no ensaio uniaxial, a $\varepsilon_{Mises} = 0,25\%$.

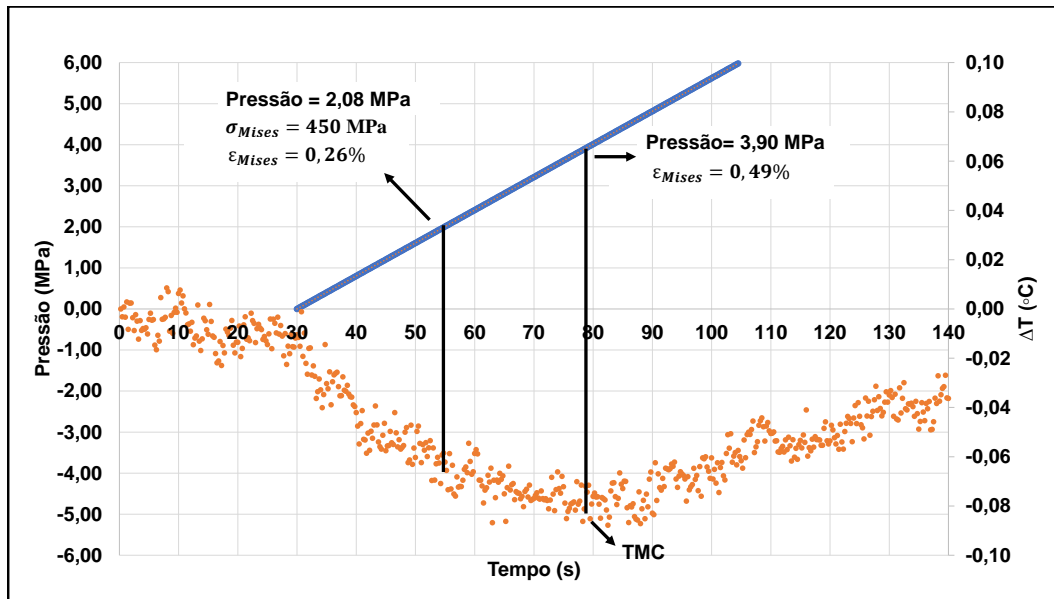


Figura 4.21: Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Espécime 6, ponto *F*. O ponto da TMC está relacionado com uma pressão de 3,90 MPa, cuja $\varepsilon_{Mises} = 0,49\%$. Para a $\sigma_{MYS} = 450$ MPa encontrado no ensaio uniaxial, a $\varepsilon_{Mises} = 0,26\%$.

4.2.2.2

Resultados do segundo método aplicado para determinar o ponto da TMC

Na Tabela 4.9, os valores referentes ao ponto *A* dos espécimes 2 e 4 são apresentados. Já os resultados encontrados nos pontos *E* e *F* dos espécimes 1, 5, 7, 8 e 9 são observáveis nas Tabelas 4.10 e 4.11 respectivamente.

Analisando o resultado do segundo método aplicado no ponto *A*, Tabela 4.9, nota-se uma média da $\varepsilon_{Mises} = 0,20\%$ e da $\sigma_{Mises} = 357$ MPa. Valores elevados, que na segunda série do ensaio uniaxial indicou início do escoamento (cf. Seção 4.1.2, Figura 4.4). Bem como para o ensaio uniaxial, o ponto da TMC se mostra confiável em indicar escoamento do material nos casos biaxiais.

Como é possível observar na Tabela 4.12 a deformação média de von Mises encontrada foi de 0,15%, enquanto que a tensão foi de 253 MPa, valores próximos dos encontrado na Seção 4.1.1, porém no espécime 7 foi maior. Contudo, nota-se que a o ponto de TMC determinado pelo segundo método está dentro da região onde as deformações plásticas estão evidenciadas.

4.2.2.3

Resultados do terceiro método aplicado para determinar o ponto da TMC

Na Tabela 4.13, os valores referentes ao ponto *A* dos espécimes 2 e 4 são apresentados. Já os resultados encontrados nos pontos *E* e *F* dos espécimes 1, 5, 7, 8 e 9 são vistos nas Tabelas 4.14 e 4.15 respectivamente.

Tabela 4.9: Valores das pressões, das σ_{Mises} e das ε_{Mises} determinadas através do segundo método para determinar o ponto da TMC, no ponto *A* dos espécimes 2 e 4.

Segundo Método. Ponto A.			
Espécimes Biaxiais	Pressão (MPa)	σ_{Mises} (MPa)	ε_{Mises}
2	2,00	332	0,21%
4	1,05	382	0,19%
Média	-	357	0,20%
Desvio Padrão	-	35	0,01%

Tabela 4.10: Valores das pressões, das σ_{Mises} e das ε_{Mises} determinadas através do segundo método para determinar o ponto da TMC, no ponto *E* dos espécimes 1, 5, 7, 8 e 9.

Segundo Método. Ponto E.			
Espécimes Biaxiais	Pressão (MPa)	σ_{Mises} (MPa)	ε_{Mises}
1	1,50	276	0,16%
5	1,51	272	0,17%
7	1,55	287	0,17%
8	1,05	211	0,12%
9	1,17	237	0,13%
Média	-	257	0,15%
Desvio Padrão	-	31	0,02%

Tabela 4.11: Valores das pressões, das σ_{Mises} e das ε_{Mises} determinadas através do segundo método para determinar o ponto da TMC. Ponto F dos espécimes 1, 5, 7, 8 e 9.

Segundo Método. Ponto F.			
Espécimes Biaxiais	Pressão (MPa)	σ_{Mises} (MPa)	ε_{Mises}
1	1,54	274	0,16%
5	1,41	277	0,15%
7	1,49	286	0,16%
8	1,00	211	0,10%
9	1,20	236	0,15%
Média	-	257	0,14%
Desvio Padrão	-	32	0,02%

Tabela 4.12: Apresenta as médias das σ_{Mises} e das ε_{Mises} determinadas pelo segundo método para determinar o ponto da TMC. Pontos E e F .

Segundo método. Pontos E e F		
-	σ_{Mises} (MPa)	ε_{Mises}
Média	253	0,15%
Desvio Padrão	29,5	0,02%

Pela Tabela 4.13 observa-se a média do valor tensão de von Mises foi de 363 MPa e da deformação foi de 0,20% para o ponto A . Novamente, valores a cima dos encontrados no ponto da TMC do ensaio uniaxial, da primeira série do corpo de prova 7, Seção 4.1.1. Isso pode ser explicado por um possível encruamento ocorrido antes da realização do ensaio. Destaca-se que o ponto da TMC mais umas vez se mostra eficaz para indicar escoamento do material.

A Tabela 4.16 contém as médias das ε_{Mises} e das σ_{Mises} para a aplicação do terceiro método: 0,14% e 252 MPa respectivamente. Assim como os dois métodos anteriores, em alguns espécimes o valor encontrado foi maior e outros bem aproximados com os resultados da Seção 4.1.1. O terceiro método foi capaz de sinalizar que o ponto da TMC está localizado numa zona de transição, com deformações elásticas e plásticas, com esta intensificadas.

Tabela 4.13: Valores das pressões, das σ_{Mises} e das ε_{Mises} determinadas através do terceiro método para determinar o ponto da TMC, no ponto *A* dos espécimes 2 e 4.

Terceiro Método. Ponto A.			
Espécimes Biaxiais	Pressão (MPa)	σ_{Mises} (MPa)	ε_{Mises}
2	2,18	362	0,22%
4	1,00	364	0,18%
Média	-	363	0,20%
Desvio Padrão	-	1,4	0,03%

Tabela 4.14: Valores das pressões, das σ_{Mises} e das ε_{Mises} determinadas através do terceiro método para determinar o ponto da TMC, no ponto *E* dos espécimes 1, 5, 7, 8 e 9.

Terceiro Método. Ponto E.			
Espécimes Biaxiais	Pressão (MPa)	σ_{Mises} (MPa)	ε_{Mises}
1	1,50	276	0,16%
5	1,50	270	0,17%
7	1,50	277	0,16%
8	0,99	199	0,11%
9	1,00	203	0,11%
Média	-	245	0,14%
Desvio Padrão	-	40	0,03%

Tabela 4.15: Valores das pressões, das σ_{Mises} e das ε_{Mises} determinadas através do terceiro método para determinar o ponto da TMC, no ponto F dos espécimes 1, 5, 7, 8 e 9.

Terceiro Método. Ponto F.			
Espécimes Biaxiais	Pressão (MPa)	σ_{Mises} (MPa)	ε_{Mises}
1	1,52	280	0,17%
5	1,40	257	0,14%
7	1,54	296	0,17%
8	1,10	232	0,11%
9	1,15	226	0,14%
Média	-	258	0,14%
Desvio Padrão	-	30	0,02%

Tabela 4.16: Apresenta as médias das σ_{Mises} e das ε_{Mises} determinadas pelo terceiro método para definir o ponto da TMC. Pontos E e F .

Terceiro método. Pontos E e F		
	σ_{Mises} (MPa)	ε_{Mises}
Média	252	0,14%
Desvio Padrão	34	0,02%

4.2.2.4

Resultados da Zona da Temperatura Mínima Característica (ZTMC)

Os pontos da TMC determinados pelos três métodos indicam que o referido ponto está localizado numa região de transição da deformação elástica para deformação plástica. O objetivo da Zona da Temperatura Mínima Característica é delimitar a região onde ocorre essa transição. Consequentemente todos os pontos da TMC estão localizados dentro desta ZTMC. As perguntas 3 e 4 feitas na metodologia são respondidas nesta Seção.

A Figura 4.22 mostra os valores da pressão, σ_{mises} e da ε_{Mises} das extremidades esquerda da ZTMC do espécime 1 ponto E, o mesmo gráfico da Figura 3.17, onde foram feitas os questionamentos das σ_{mises} e ε_{Mises} . Na extremidade esquerda não é possível determinar a σ_{mises} , pois esta região não está na zona elástica.

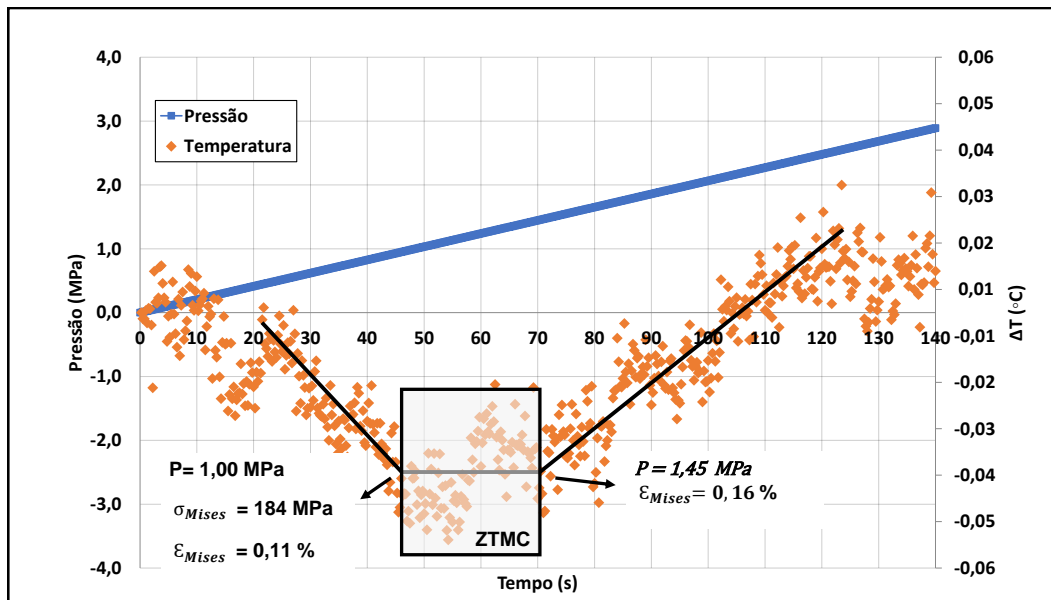


Figura 4.22: Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo do espécime 1 ponto E. Nota-se os valores das σ_{Mises} e ε_{Mises} nos lados esquerdo e direito da ZTMC.

Os valores encontrados das extremidade esquerda nos espécimes 2 e 4 estão na Tabela 4.17. Eles estão separados dos demais, pois possuem mossas com duas concavidades, enquanto os outros possuem mossas com apenas uma concavidade, vide Figura 3.4. Note que a média da $\sigma_{Mises} = 317$ MPa e da $\varepsilon_{Mises} = 0,17\%$, são coerentes com os apresentados nos ensaios uniaxiais (Seção 4.1). Para essa deformação o material já apresenta deformações plásticas.

Tabela 4.17: Valores das pressões, σ_{Mises} e ε_{Mises} . Espécimes 2 e 4, extremidade esquerda da ZTMC, ponto A.

Extremidade esquerda da ZTMC. Ponto A			
Espécimes	Pressão(MPa)	σ_{Mises} (MPa)	ε_{Mises}
2	1,64	272	0,17%
4	0,99	361	0,18%
Média		317	0,17%
Desvio Padrão		63	0,01%

A Tabela 4.18 contém os valores das pressões, σ_{Mises} e ε_{Mises} da extremidade esquerda da ZTMC, pontos *E* e *F*. Os valores em destaques em vermelho, espécime 6, não fizeram parte da média, pois o valor da σ_{Mises} no ponto *E* do espécime 6 foi superior ao limite de escoamento do material no ensaio uniaxial, cujo valor é de 450 MPa (cf. Seção 4.1.5). Portanto, não é admissível calcular de maneira elástica σ_{Mises} maiores que este valor ($\sigma_{Mises} \leq 450$ MPa). Temos na média que a ZTMC começa aproximadamente com uma deformação de 0,11%, cuja média da deformação de von Mises é 194 MPa. Observe que nos ensaios uniaxiais é possível notar deformações plásticas para o valor de $\varepsilon = 0,11\%$, conforme Seção 4.1.

Tabela 4.18: Valores das pressões, σ_{Mises} e ε_{Mises} . Extremidade esquerda da ZTMC. Pontos E e F . Os valores em destaque com asterisco (*), espécime 6, não fizeram parte da média. O valor da σ_{Mises} no ponto E do espécime 6 foi superior ao limite de escoamento do material no ensaio uniaxial, cujo o valor é de 450 MPa, cf. Seção 4.1.5.

Lado esquerdo da ZTMC.				
	Espécimes	Pressão (MPa)	σ_{Mises} (MPa)	ε_{Mises}
Ponto E	1	1,00	184	0,11%
	5	1,28	231	0,14%
	6	2,80*	-	0,32%*
	7	1,00	185	0,11%
	8	0,90	181	0,10%
	9	1,00	203	0,11%
Ponto F	1	1,13	201	0,12%
	5	1,02	187	0,10%
	6	2,41*	-	0,30%*
	7	1,08	208	0,12%
	8	0,80	169	0,08%
	9	0,96	189	0,12%
		Média	194	0,11%
		Desvio Padrão	18	0,02%

Os valores das pressões e ε_{Mises} da extremidade direita da ZTMC, para o ponto *A*, estão na Tabela 4.19, a média da $\varepsilon_{Mises} = 0,25\%$. Esta deformação é muito próxima ao valor encontrado na quinta série do ensaio uniaxial, $\varepsilon = 0,27\%$, cf. Seção 4.1.6, Tabela 4.2. Nesta extremidade direita, não é possível determinar o σ_{Mises} , pois não é uma região elástica.

Tabela 4.19: Valores das pressões, σ_{Mises} e ε_{Mises} . Espécimes 2 e 4, extremidade direita da ZTMC, ponto A.

ZTMC, extremidade direta. Ponto A.			
Espécimes	Pressão (MPa)	σ_{Mises} (MPa)	ε_{Mises}
2	2,67	-	0,28%
4	1,23	-	0,22%
	Média	-	0,25%
	Desvio Padrão	-	0,04%

Verifique na Tabela 4.20 os resultados das pressões e das ε_{Mises} da extremidade direita da ZTMC, para os pontos *E* e *F*. Novamente os valores destacados em vermelho, espécime 6, não fizeram parte da média, como explicado anteriormente. Temos na média que a ZTMC termina aproximadamente com uma deformação de 0,17%. Destaca-se que esta deformação é compatível com as deformações encontradas no ponto da TMC da primeira e segunda séries do ensaio uniaxial, $\varepsilon = 0,19\%$ e $\varepsilon = 0,21\%$, respectivamente (cf. Seção 4.1, Tabela 4.2. Novamente as σ_{Mises} não foram determinadas, pois essa extremidade direita não está na região elástica.

Destaca-se que neste trabalho foram definidos duas ZTMC, uma para cada tipo de mocha. Torna-se necessário suas avaliações de forma isoladas.

A ZTMC dos pontos *E* e *F* abrange uma área considerável, com início na extremidade esquerda apresentando uma deformação na média de 0,11% e direita com 0,17%. Esta zona não só contém os pontos da TMC, como engloba também, com exceção do espécime 6, todas as posição dos pontos *E* e *F* definidos por Paiva (2020), para determinar o limite de fadiga (Tabela 4.4 na cf. Seção 4.2.1).

Tabela 4.20: Valores das pressões e ε_{Mises} . Extremidade direita da ZTMC. Pontos E e F . Os valores destacados com asterisco (*), espécime 6, não fizeram parte da média, pois os valores da σ_{Mises} nos pontos E e F do espécime 6 foram superiores ao limite de escoamento do material no ensaio uniaxial, cujo valor é de 450 MPa (cf. Seção 4.1.5).

Extremidade direita da ZTMC.				
	Espécimes	Pressão (MPa)	σ_{Mises} (MPa)	ε_{Mises}
Ponto E	1	1,45	-	0,16%
	5	1,63	-	0,18%
	6	5,20*	-	0,61%*
	7	1,80	-	0,19%
	8	1,30	-	0,15%
	9	1,30	-	0,15%
Ponto F	1	1,65	-	0,17%
	5	1,60	-	0,16%
	6	5,2*	-	0,65%*
	7	1,9	-	0,21%
	8	1,29	-	0,13%
	9	1,45	-	0,18%
		Média	-	0,17%
		Desvio Padrão	-	0,02%

A ZTMC do ponto *A*, também abrange uma área considerável, com início na extremidade esquerda apresentando uma deformação na média de 0,17% e direita com 0,25%, valores mais elevados que na ZTMC dos pontos *E* e *F*, devido provavelmente ao processo de formação da massa. Os dados analisados sinalizam que no ponto *A* ocorreu encruamento anteriormente ao ensaio, apresentando valores mais elevados de deformação e tensão, pois esses valores aumentam quando ocorre encruamento, como detalhado na Seção A.3 e verificado experimentalmente na Seção 4.1. Todos os pontos da TMC ficaram contidos dentro de região definida pela ZTMC.

5

Conclusões

O método quase-estático aplicado ao estado de tensão uniaxial se mostrou uma ferramenta confiável para determinar o limite de fadiga. O ensaio realizado em apenas um corpo de prova retornou uma média $S_L = 245$ MPa, com desvio padrão de 9,4 MPa e desvio de 2,2%, frente ao valor convencional estimado como metade da resistência a tração do aço API 5L Grau B e vale 250 MPa.

Com relação aos métodos desenvolvidos e aplicados para determinar o ponto da TMC, pode-se dizer que para o ponto A, o segundo e o terceiro métodos se mostraram mais conservadores, ambos com média de deformação foi de 0,20%, enquanto o primeiro método a média da deformação de 0,22%. Já para os pontos E e F, o primeiro e o terceiro métodos foram mais conservadores, com deformação média de 0,14%, porém próximo da média da deformação do segundo método, 0,15%.

Um dos questionamentos feitos na introdução e na metodologia, pergunta 2, é abordado aqui. As deformações encontradas no ponto da TMC, tanto nos ensaios uniaxiais quanto nos ensaios biaxiais apresentaram deformações maiores que 0,14%, elas evidenciam que o material está escoando. Nos ensaios uniaxiais a deformação equivalente de von Mises variou entre 0,19% e 0,27%. Nos pontos E e F dos ensaios biaxiais, a referida deformação variou entre 0,14% e 0,17%, para o ponto A esta variação ficou entre 0,18% e 0,23%.

O método quase-estático desenvolvido Risitano *et al.* (2011) é explorado em diversos trabalhos, e.g. Clienti *et al.* (2010), para determinar o limite de resistência à fadiga do material. Em muitos casos devido à incerteza na variabilidade dos resultados, por conta da nuvem de pontos da temperatura, da estabilização inicial do sistema e até mesmo na maneira como o ensaio é realizado, a determinação do S_L de alguma forma é prejudicada, como exemplo o valor encontrado neste trabalho para os casos biaxiais, $S_L = 225$ MPa com desvio padrão de 72 MPa e desvio de 10% frente ao valor convencional de 250 MPa (Seção 4.2.1). Estes resultados são diferentes dos encontrados no ensaio uniaxial, citados no parágrafo anterior, cujo desvio foi de 2,2%. Além dos motivos citados, essa diferença pode estar relacionada ao fato das distribuições de tensões serem uniformes no ensaio uniaxial, enquanto no biaxial não.

Ainda mais que o carregamento quase estático contribuiu para um processo não adiabático, favorecendo erros nas medições das temperaturas nos pontos analisados.

Entretanto, tanto no ensaio uniaxial quanto no biaxial, foi extraído o ponto do “cotovelo” da curva da temperatura. Este ponto está relacionado a uma razoável deformação, da ordem de 0,1% até 0,23% contendo deformações elástica e plástica, de tal forma que é evidenciada a deformação plástica, já que a variação de temperatura deixa de ser negativa e passa a ser positiva, caso contrário não seria possível observar mudança na curva de temperatura, e a mesma continuaria a decrescer continuamente. Este local é denominado ponto de temperatura mínima característica (TMC) e está localizado dentro da zona de temperatura mínima característica (ZTMC), onde se encontra boa parte da região de transição da deformação elástica para plástica.

Este trabalho traz uma originalidade na definição e na determinação do ponto da TMC no ensaio uniaxial, através dos gráficos temperatura e deformação em função da tensão (como por exemplo o gráfico da Figura 4.4), e também para o ensaio biaxial, nos gráficos da temperatura e pressão em função da deformação, Figura 4.18.

Para tensões tratativas estudadas neste trabalho, as vantagens de determinar o ponto da TMC é poder inferir que:

1. Quando a variação da temperatura for negativa – antes do ponto da TMC – o ponto do material está com tensão menor que o limite escoamento.
2. Se essa variação for positiva – depois do ponto da TMC – ele está acima ou muito próximo do seu limite de escoamento.

Este ponto da TMC está dentro da ZTMC, que abrangeu deformações de 0,08% até 0,28%.

Como detalhado nesta dissertação, o ponto de TMC nos fornece informações importantes sobre a deformação e a tensão do material com relação ao escoamento. Como propostas para trabalhos futuros sobre observação deste ponto, proponho: (a) Aplicar os ensaios da TIV e do DIC juntos; (b) aumentar a frequência de aquisição dos dados de deformações (DIC); (c) estender a análise para outros tipos de componentes mecânicos e (d) estender a análise para outros materiais.

Referências Bibliográficas

- Alves, João V.C.G., Araújo, Felipe A.V., Honorato, Gabriel A., Rodrigues, Rosenberg F.N., & Queiroz, Hélio S. 2020. Termografia para Determinação do Limite de Fadiga em Aço de Médio Carbono. *Revista Processos Químicos*, 14(28), 94–107.
- Callister Jr, W.D., & Rethwisch, D.G. 2016. *Ciência e Engenharia de Materiais: uma Introdução*. Rio de Janeiro, RJ, LTC.
- Carvalho, T. *Seminário online Princípios de Termografia e suas aplicações*. url: https://dov9x7dfzo1bk.cloudfront.net/sites/www.voltimum.com.br/files/fields/attachment_file/voltimum_-_webinar_fluke_ti.pdf. Acessado em: Setembro, 2021.
- Clienti, C., Fargione, G., La Rosa, G., Risitano, A., & Risitano, G. 2010. A first approach to the analysis of fatigue parameters by thermal variations in static tests on plastics. *Engineering Fracture Mechanics*, 77(11), 2158–2167.
- Colombo, C., Vergani, L., & Burman, M. 2012. Static and fatigue characterisation of new basalt fibre reinforced composites. *Composite structures*, 94(3), 1165–1174.
- Crupi, V., Guglielmino, E., Risitano, G., & Tavilla, F. 2015. Experimental analyses of SFRP material under static and fatigue loading by means of thermographic and DIC techniques. *Composites Part B: Engineering*, 77, 268–277.
- Fargione, G., Geraci, A., La Rosa, G., & Risitano, A. 2002. Rapid determination of the fatigue curve by the thermographic method. *International journal of fatigue*, 24(1), 11–19.
- FLIR. *FLIR A655sc LWIR Cameras*. url: <https://www.altoo.dk/FLIR+A655sc+LWIR+Cameras.htm>. Acessado em: Setembro, 2021.
- FLIR. *FLIR SC7650*. url: <https://www.flir.com/support/products/sc7650/#0verview>. Acessado em: Setembro, 2021.

- FLIR, Teledyne. *Close-up IR lens, 5.8x (100 μ m) with case (T198060)*. url: https://www.flir.com/products/t198060_close-up-ir-lens/. Acessado em: Setembro, 2021.
- FLIR, Teledyne. *Câmera LWIR de Alta Resolução de Classe Científica FLIR A655sc*. url: <https://www.flir.com.br/products/a655sc/>. Acessado em: Setembro, 2021.
- Gregorio-Hetem, J., Jatenco-Pereira, V., & de Oliveira, C.M. *Fundamentos de Astronomia*. url: <http://www.astro.iag.usp.br/~jane/aga215/>. Acessado em: Setembro, 2021.
- Jadin, M.S., & Taib, S. 2012. Recent progress in diagnosing the reliability of electrical equipment by using infrared thermography. *Infrared Physics & Technology*, **55**(4), 236–245.
- La Rosa, G., & Risitano, A. 2000. Thermographic methodology for rapid determination of the fatigue limit of materials and mechanical components. *International journal of fatigue*, **22**(1), 65–73.
- Lemos, Gustavo ferreira. 2017. *Estudo da Fadiga em Aço SAE 1020 com o uso da Termografia*. Projeto de graduação, Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, BR.
- Luong, Minh Phong. 1998. Fatigue limit evaluation of metals using an infrared thermographic technique. *Mechanics of materials*, **28**(1-4), 155–163.
- Manhães, P.R.B. 2016. *Estudo da fadiga em Policarbonato com o uso da Termografia*. Projeto de graduação, Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, BR.
- Muniz, P.R., & Mendes, M.A.. 2019. *Termografia infravermelha: dos fundamentos ao diagnóstico*. Edifes.
- Oliveira de Assis, A.A. 2017. *Estudo da fadiga em Aço Carbono com uso da termografia*. Projeto de graduação, Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, BR.
- Paiva, V.E.L. 2020. *Modern Experimental Techniques with an Emphasis on Infrared Thermography to the Assessment of Fatigue Components with Dents*. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, BR.

- Paiva, V.E.L., Freire, J.L.F., Alarcón, M.V.G., Vieira, R.B.V., González, J.A.O., & Castro, J.T.P. 2017. FATIGUE ASSESSMENT OF A LOW CARBON STEEL USING DIXON%27S UP-AND-DOWN METHOD AND INFRARED THERMOGRAPHY 25-08.
- Paiva, V.E.L., Gonzáles, G.L.G., Diniz, J.L.C., Vieira, R.D., Freire, J.L.F., & d'Almeida, A.L.F.S. 2020. Infrared Thermography Applied to the Assessment of Fatigue Initiation. *Page 57 of: Thermomechanics & Infrared Imaging, Inverse Problem Methodologies and Mechanics of Additive & Advanced Manufactured Materials, Volume 7: Proceedings of the 2020 Annual Conference on Experimental and Applied Mechanics*, vol. 7. Springer Nature.
- Paiva, V.E.L, Gonzáles, G.L.G., Vieira, R.D., Freire, J.L.F., & Mendes, L.C. 2021. Assessment of Hot-spots in Structures Using the IR Quasi-Static Method. *In: 15th in a series of conferences organised by the British Society for Strain Measurement showcasing novel and innovative research in Experimental Mechanics*. Virtual.
- Paiva, Vitor Eboli L, Gonzáles, GLG, Vieira, RD, Maneschy, JE, Vieira, RB, & Freire, JLF. 2018. Fatigue monitoring of a dented piping specimen using infrared thermography. *Page V01AT01A034 of: Pressure Vessels and Piping Conference*, vol. 51586. American Society of Mechanical Engineers.
- Rego, Lucas Lira Lopez. 2017. *Fatigue characterization of metal alloys using thermography*. Projeto de graduação, Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, BR.
- Risitano, A., & Risitano, G. 2013. Determining fatigue limits with thermal analysis of static traction tests. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 36(7), 631–639.
- Risitano, A., Giacomo, R., & Clienti, C. 2010. Fatigue limit by thermal analysis of specimen surface in mono axial traction test. *Page 38010 of: EPJ web of conferences*, vol. 6. EDP Sciences.
- Risitano, G., Risitano, A., & Clienti, C. 2011. Determination of the fatigue limit by semi static tests. *Convegno Nazionale IGF XXI*, 322–330.
- Target, Equipe. *A conformidade da aplicação do método da termografia infravermelha*. url: <https://patisegnoticias.com.br/2021/07/22/a-conformidade-da-aplicacao-do-metodo-da-termografia-infravermelha/>. Acessado em: Setembro, 2021.

UFPR. *RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE*. url: <https://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/cap2/cap2-7.html>. Acessado em: Setembro, 2021.

Vieira, Renato Bichara. 2016. *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, BR.

A

Revisão teórica

Nesta parte da dissertação são abordados alguns pontos fundamentais do comportamento mecânico dos materiais, aplicados para o desenvolvimento desta pesquisa.

A.1

Relações entre tensões e deformações

Um dos ensaios mecânicos de tensão-deformação mais comuns é conduzido por tração e pode ser empregado para caracterizar várias propriedades mecânicas dos materiais que são importantes para projetos. No ensaio de tração uma amostra é deformada, correntemente até sua fratura, por uma carga de tração que é aumentada gradativamente e é aplicada uniaxialmente por toda a extensão útil do eixo de um corpo de prova. Comumente, a seção transversal é circular, mas também são utilizados CPs de seções retangulares, como neste trabalho, cuja geometria é mostrada na Figura 3.1 no Capítulo 3.

O resultado de um ensaio de tração desse tipo é registrado como carga ou força em função do alongamento. Características carga-deformação são dependentes do tamanho do corpo de prova. Para reduzir os fatores geométricos, a carga e o alongamento são normalizados, respectivamente, aos parâmetros de tensão e deformação de engenharia. A tensão de engenharia é definida pela relação

$$\sigma = \frac{F}{A_0}, \quad (\text{A.1})$$

na qual F é a carga instantânea aplicada em uma direção perpendicular à seção transversal do corpo de prova, A_0 é a área da seção transversal original antes da aplicação de qualquer carga. A Figura A.1 mostra a máquina usada nos ensaios de tração.



Figura A.1: Máquina para condução do ensaio de tração usada nesta dissertação. INSTRON 5500R do Laboratório de Ensaio Mecânicos da PUC-Rio, LEM.

A deformação de engenharia ε é definida de acordo com

$$\varepsilon = \frac{l_i - l_0}{l_0}, \quad (\text{A.2})$$

em que l_0 é o comprimento original antes de qualquer carga ser aplicada e l_i é o comprimento instantâneo. A deformação de engenharia é adimensional, porém “metros por metro” ou “polegadas por polegada” têm uso constante; o valor da deformação é, com efeito, independente do sistema de unidades. Por vezes a deformação também é expressa em porcentagem, tal como na Seção 4.1 onde os resultados dos ensaios realizados neste trabalho estão com as deformações expressas em porcentagem.

O comportamento elástico ocorre quando, após a retirada da força, o material retorna a sua condição inicial.

Para a maioria dos materiais que são submetidos a uma tensão de tração

em níveis relativamente baixos, a tensão e a deformação são proporcionais entre si (Hooke, 1678):

$$\sigma = E\varepsilon. \quad (\text{A.3})$$

Essa relação é conhecida como Lei de Hooke; e a constante de proporcionalidade E é o módulo de elasticidade, ou módulo de Young.

Para a maioria dos materiais metálicos, a deformação elástica sucede apenas até seu limite elástico. Conforme o material é deformado além desse ponto, a deformação não é mais proporcional à tensão aplicada e a Lei de Hooke, Equação A.3, deixa de ser válida. A partir desse ponto, passam a ocorrer deformações permanentes ou plásticas. A Figura A.2 mostra um gráfico esquemático do comportamento tensão-deformação em tração para um metal típico. A transição do comportamento elástico para o majoritariamente plástico é gradual para a maioria dos metais; ocorre uma curvatura no início da deformação plástica, que aumenta mais rapidamente com o aumento da tensão (Callister Jr & Rethwisch, 2016). Este conceito é aplicado no Capítulo 4.

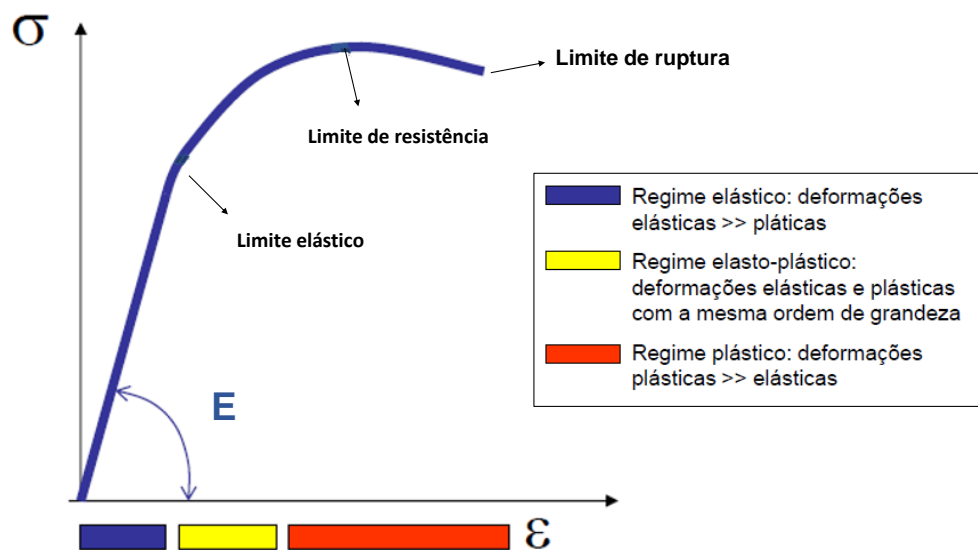


Figura A.2: Comportamento tensão-deformação típico de um metal.

A.2 Escoamento

Para metais que apresentam transição gradual de deformação elástica para deformação plástica, o ponto de escoamento pode ser determinado como aquele onde ocorre o afastamento inicial da linearidade na curva tensão-deformação; esse ponto é algumas vezes chamado de limite de proporcionalidade, e repre-

senta o início da deformação plástica ao nível microscópico. É difícil medir com precisão a posição desse ponto. Então, como consequência dessa dificuldade, foi estabelecida uma convenção em que uma linha reta é construída paralelamente à porção elástica da curva tensão-deformação em alguma pré-deformação especificada, que, geralmente, é de 0,2 %, Figura A.3 . A tensão correspondente à interseção dessa linha com a curva tensão-deformação conforme esta se inclina na região plástica é definida como o resistência ao escoamento σ_{MYS} . Este é o método aplicado para determinar o limite de escoamento nesta obra, conforme Capítulo 4. O limite de escoamento usado pela norma API 52 em metais utilizados em dutos, é definido um tensão que gera uma deformação total de 0,5% no corpo de prova.

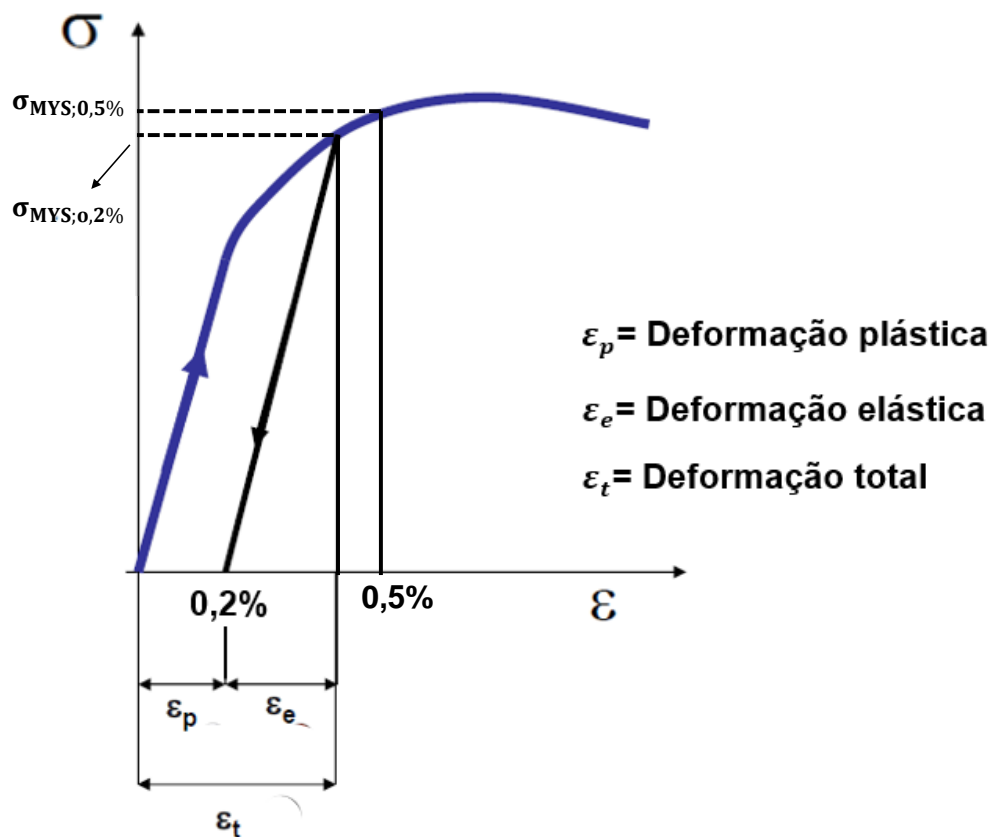


Figura A.3: Métodos aplicados para determinar os limites de escoamentos com deformação permanente de 0,2% ou 0,5%.

A.3

Encruamento

O encruamento é o fenômeno pelo qual um metal dúctil se torna mais duro e mais resistente à medida que sofre deformação plástica. Boa parte dos metais encruam à temperatura ambiente. É o caso neste trabalho, como será visto no Capítulo 4.

O encruamento é demonstrado na Figura A.4. No início o metal com uma resistência ao escoamento σ_{l_0} é deformado plasticamente até o ponto D . A tensão é liberada e, então, reaplicada, obtendo em uma outra resistência ao escoamento, σ_{l_i} . O metal ficou, dessa forma, mais resistente durante o processo, visto que σ_{l_i} é maior que σ_{l_0} .

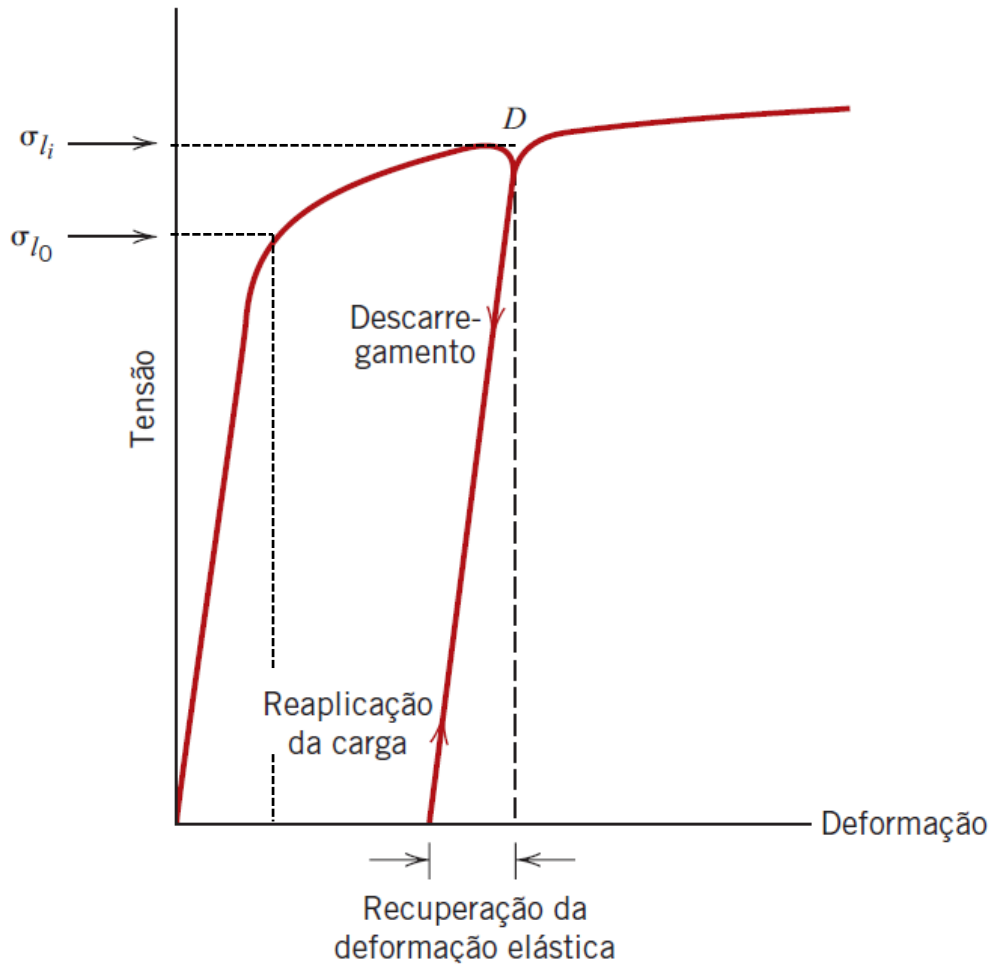


Figura A.4: Diagrama esquemático tensão-deformação em tração mostrando os fenômenos de recuperação da deformação elástica e de encruamento. (Adaptado de Callister Jr & Rethwisch, 2016).

Observa-se duas séries de carregamento no caso descrito, há necessidade de destacar essa parte para maior compreensão da metodologia, conforme Capítulo 3, onde são propostas cinco séries de carregamentos. Posteriormente na Seção 4.1.6 é apresentado o diagrama tensão-deformação com acréscimos de dados referentes às medições de temperatura para as cinco séries juntas.

As interações entre as discordâncias e os campos de deformação das mesmas são a base para explicar o encruamento. A densidade de discordâncias em um metal aumenta com o trabalho a frio, devido a formação de novas discordâncias, assim, a distância média de separação entre as discordâncias diminui. Na média, as interações discordâncias-deformações devidas às discordâncias são repulsivas. O resultado global é tal que o movimento de uma discordância é dificultado pela presença das outras. À medida que a densidade das discordâncias aumenta, essa resistência ao movimento das discordâncias causado pelas demais se torna mais pronunciada. Portanto, com o aumento do trabalho a frio ocorre também o aumento da tensão imposta necessária para deformar o metal (Callister Jr & Rethwisch, 2016).

B

Gráficos do ensaio biaxial. Espécime 1.

B.1

Determinações do ponto da TMC e da ZTMC. Espécime 1. Ponto E.

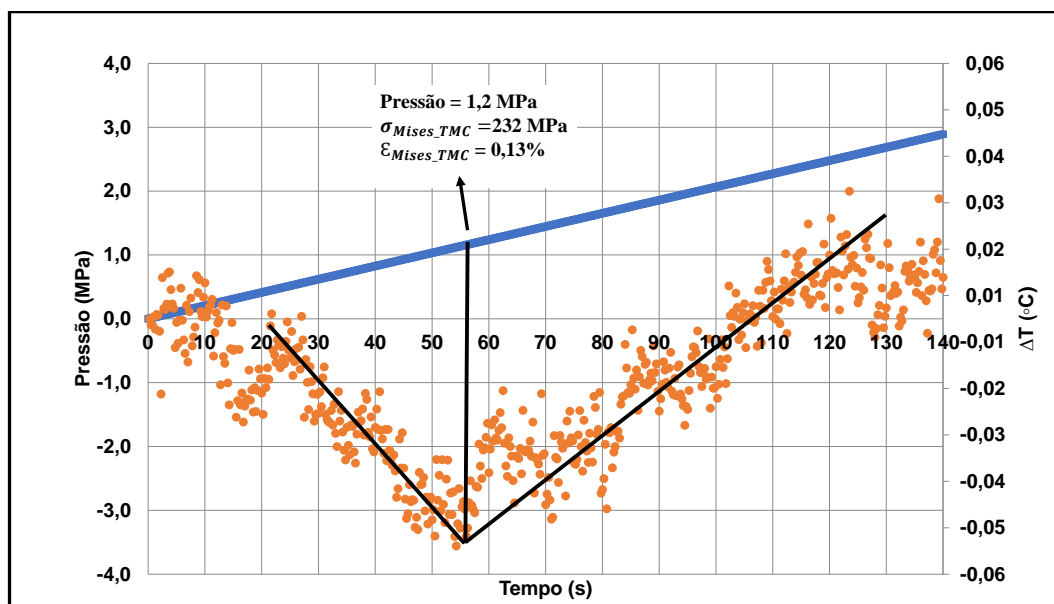


Figura B.1: Duto 1, ponto E. Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Primeiro método para determinar o ponto da TMC.

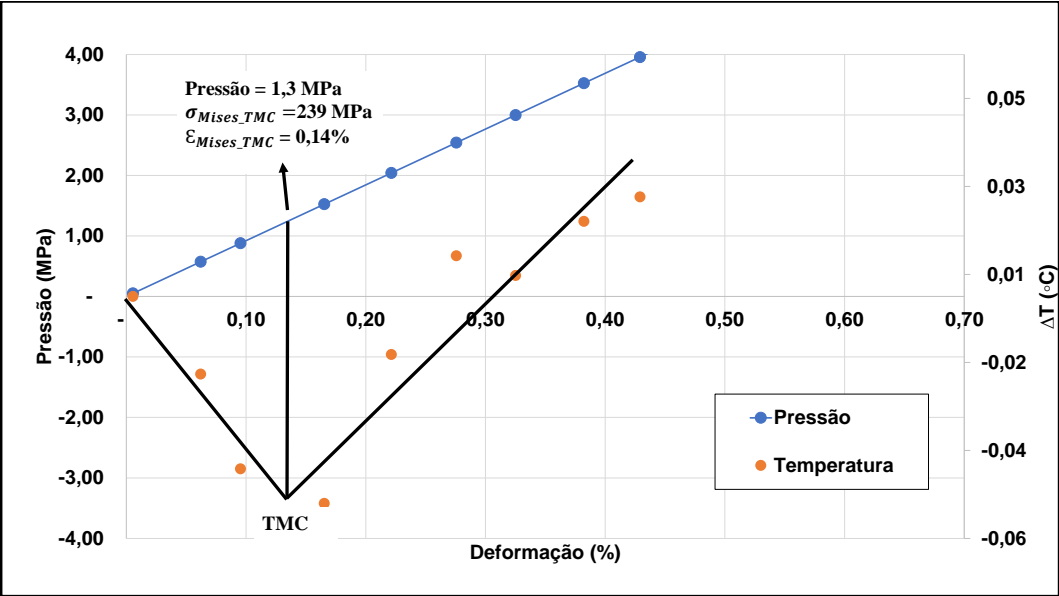


Figura B.2: Duto 1, ponto E. Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Segundo método para determinar o ponto da TMC.

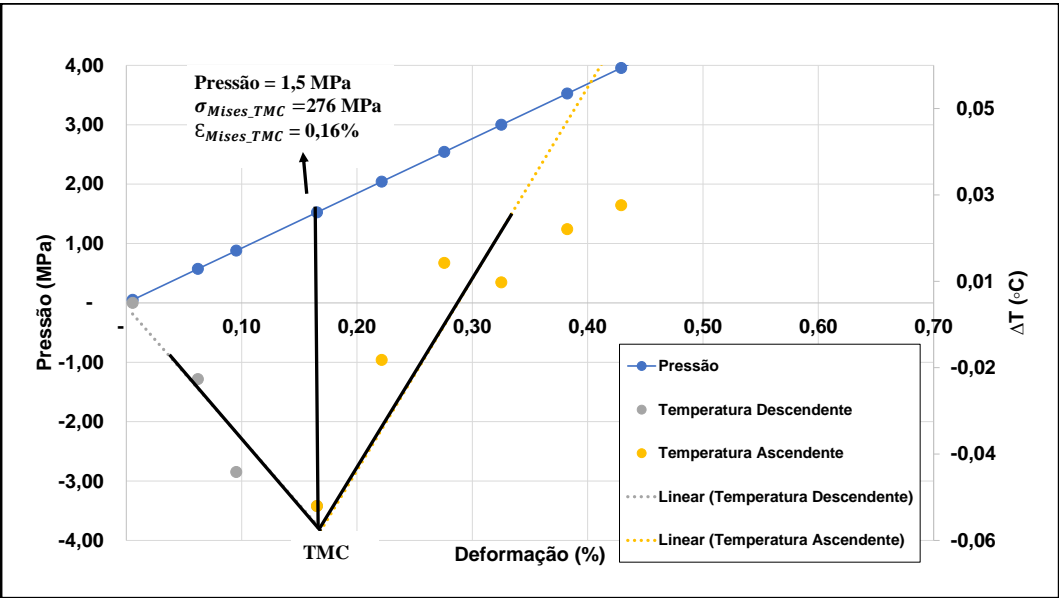


Figura B.3: Duto 1, ponto E. Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Terceiro método para determinar o ponto da TMC.

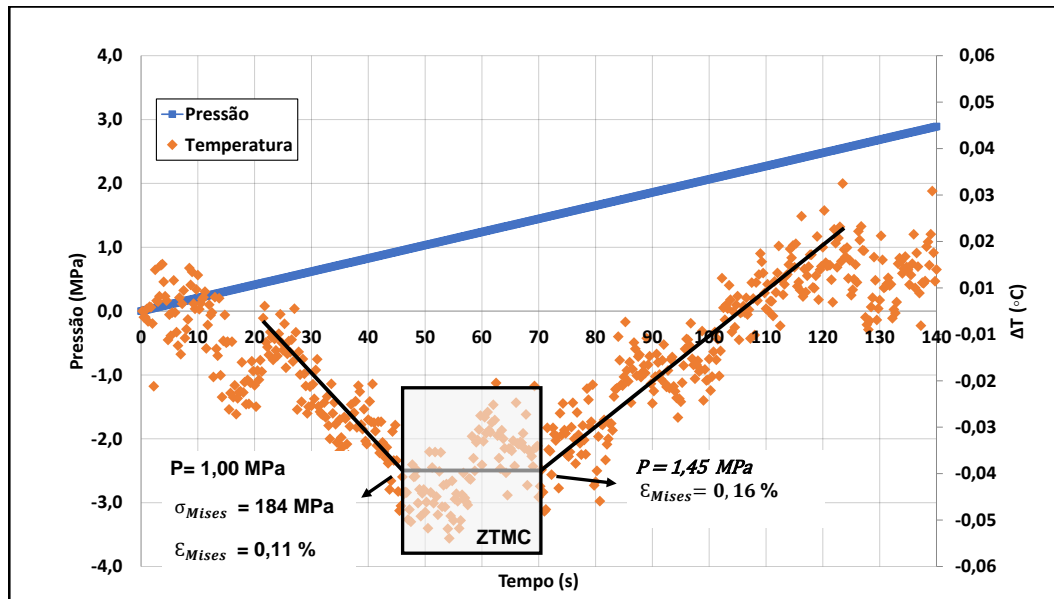


Figura B.4: Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo do espécime 1 ponto E. Determinação da ZTMC.

B.2

Gráfico das deformações em função da pressão. Espécime 1. Ponto E.

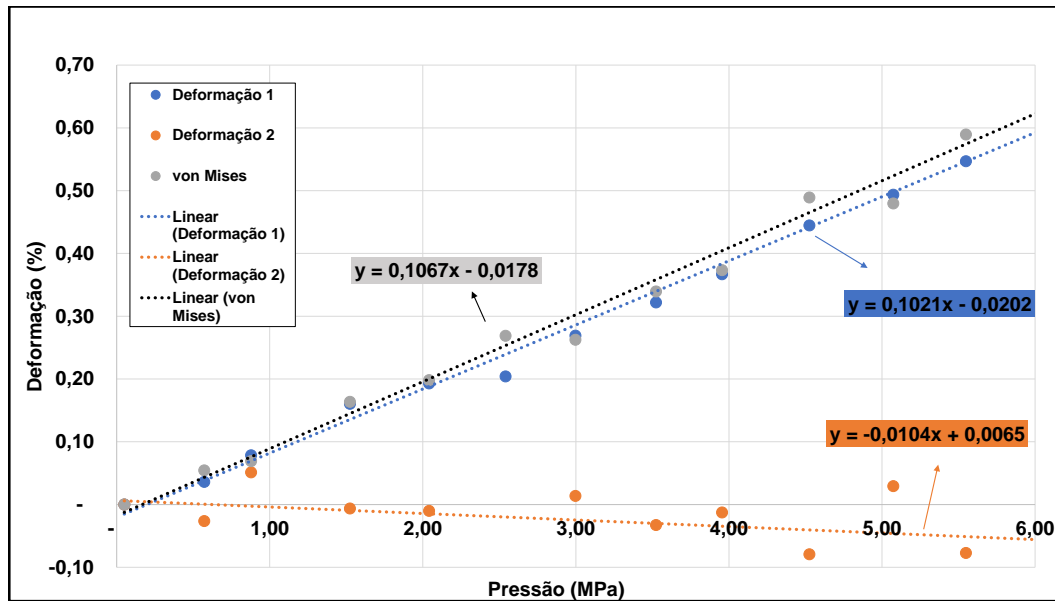


Figura B.5: Gráfico das deformações ε_1 , ε_2 e ε_{Mises} em função da pressão. Espécime 1 ponto E.

B.3

Determinações do ponto da TMC e da ZTMC. Espécime 1. Ponto F.

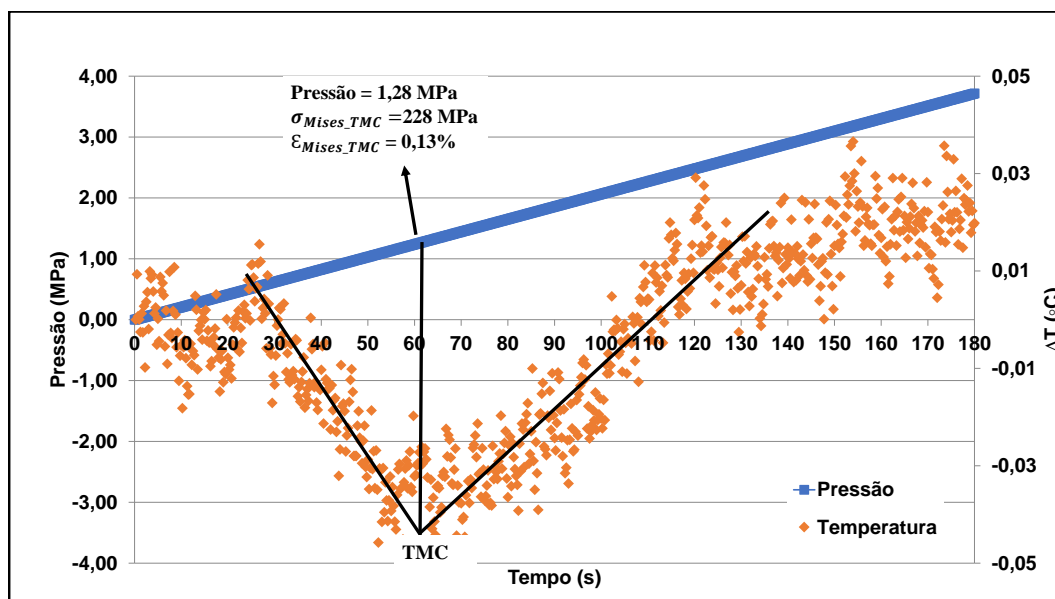


Figura B.6: Duto 1, ponto F. Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Primeiro método para determinar o ponto da TMC.

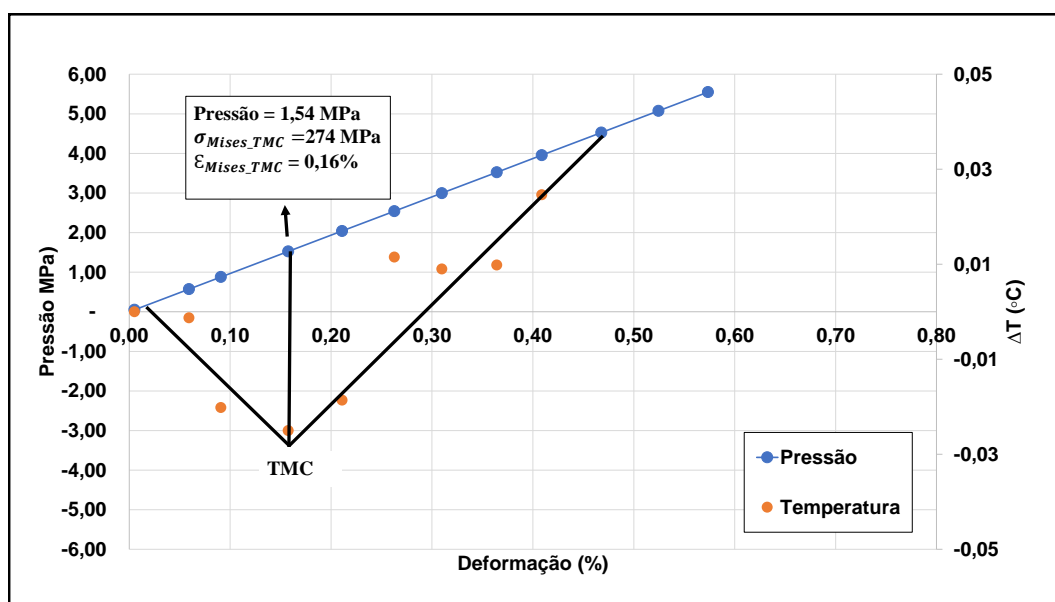


Figura B.7: Duto 1, ponto F. Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Segundo método para determinar o ponto da TMC.

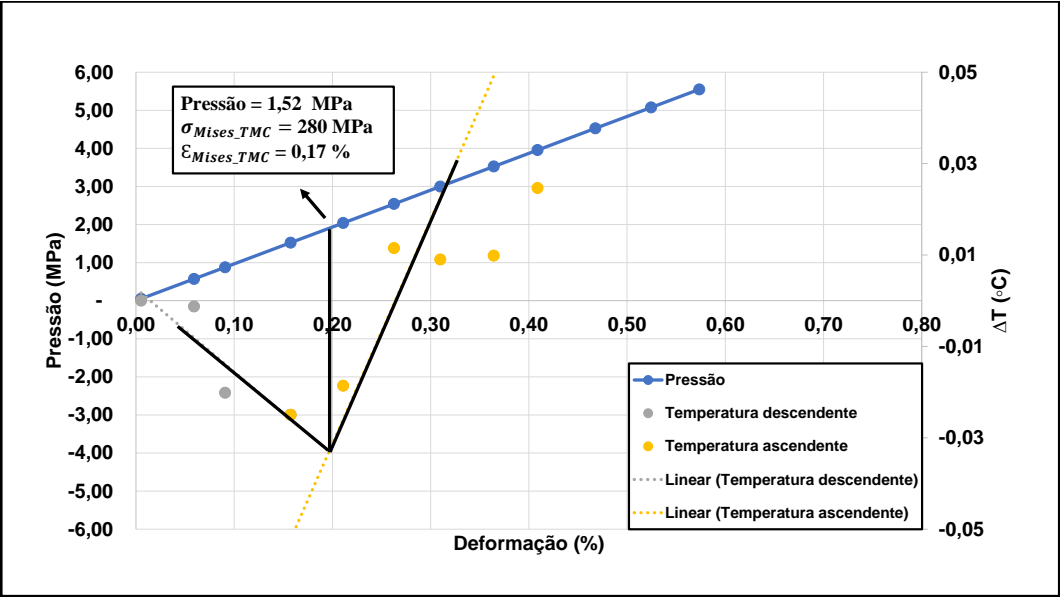


Figura B.8: Duto 1, ponto F. Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Terceiro método para determinar o ponto da TMC.

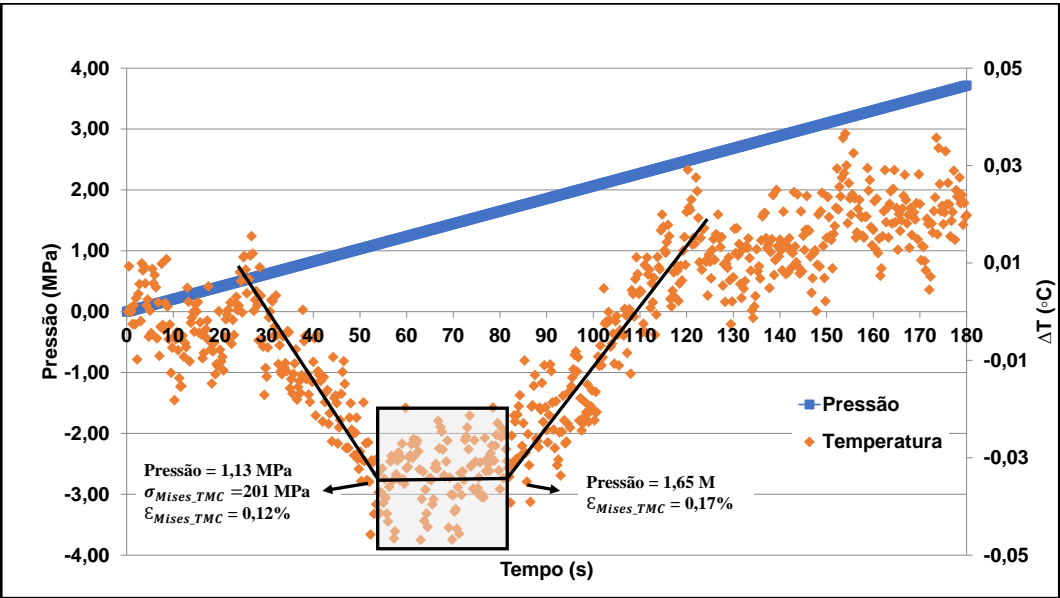


Figura B.9: Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo do espécime 1 ponto F. Determinação da ZTMC.

B.4

Gráfico das deformações em função da pressão. Espécime 1. Ponto F.

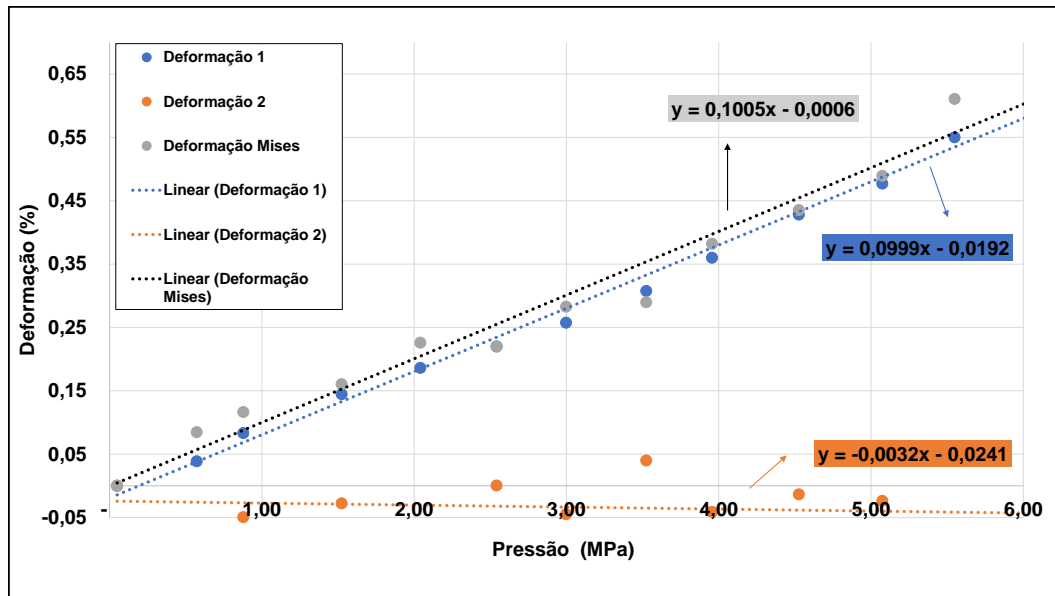


Figura B.10: Gráfico das deformações ε_1 , ε_2 e ε_{Mises} em função da pressão. Espécime 1 ponto F.

C

Gráficos do ensaio biaxial. Espécime 2.

C.1

Determinações do ponto da TMC e da ZTMC. Espécime 2. Ponto A.

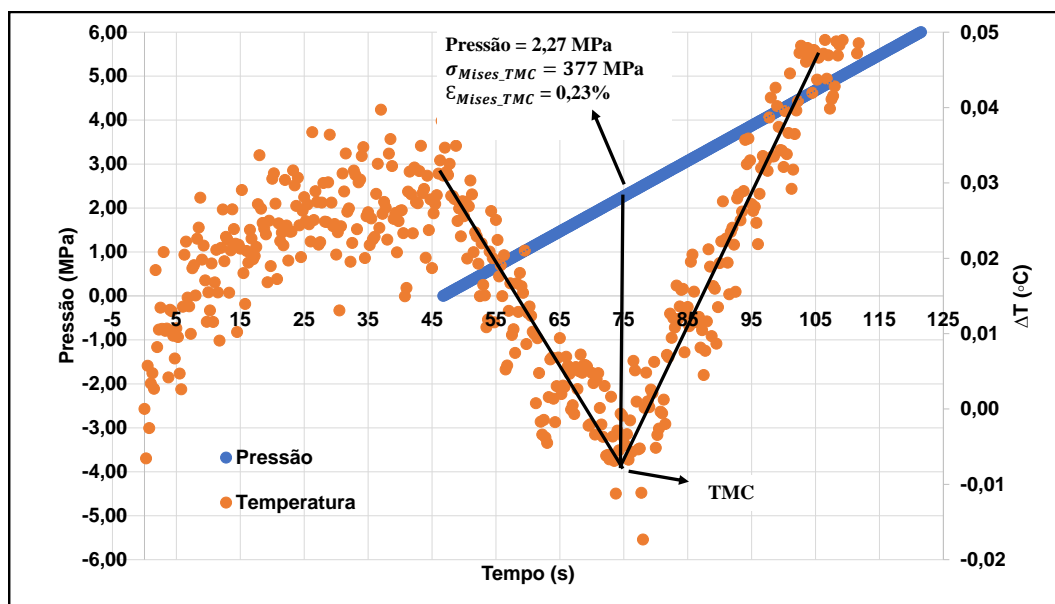


Figura C.1: Duto 2, ponto A. Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Primeiro método para determinar o ponto da TMC.

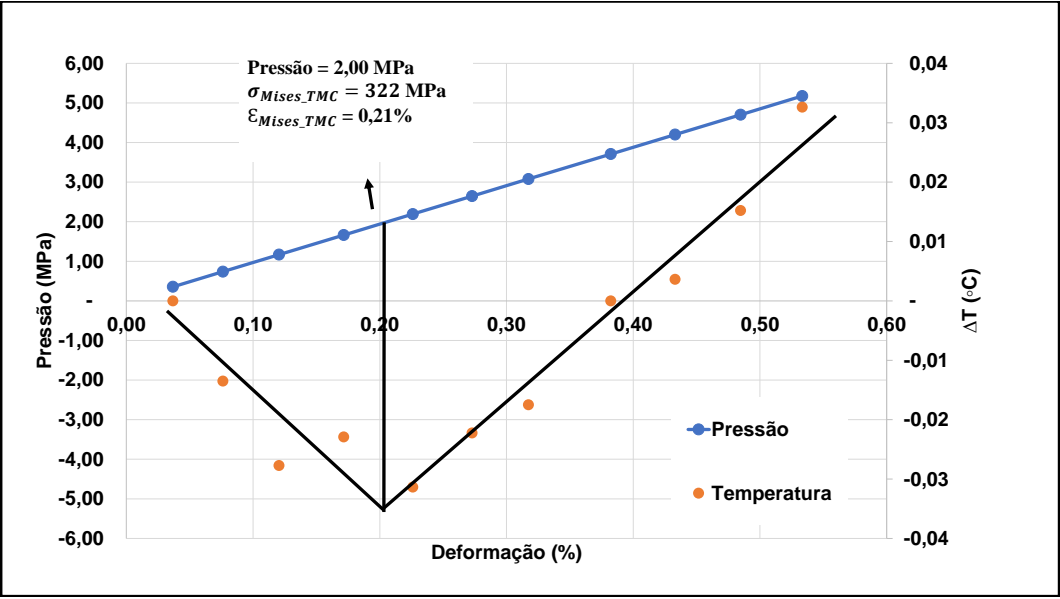


Figura C.2: Duto 2, ponto A. Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Segundo método para determinar o ponto da TMC.

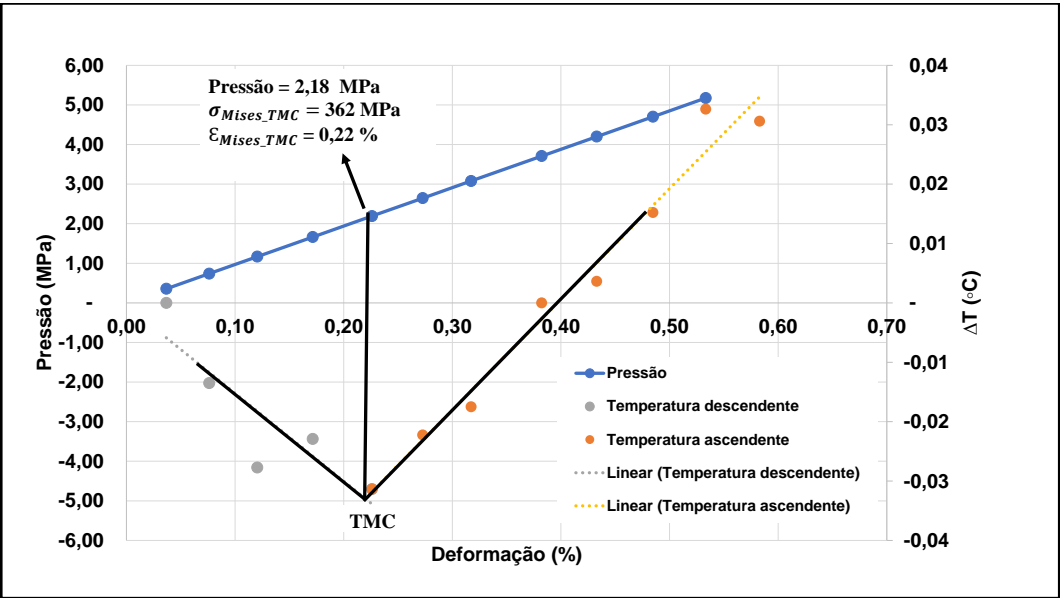


Figura C.3: Duto 2, ponto A. Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Terceiro método para determinar o ponto da TMC.

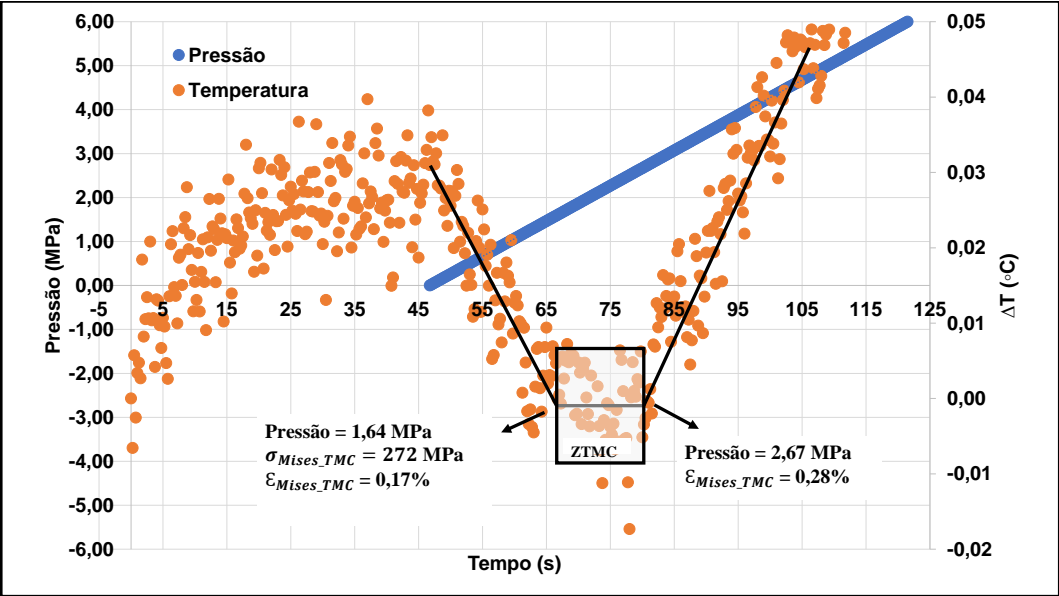


Figura C.4: Duto 2, ponto A. Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Determinação da ZTMC.

C.2

Gráfico das deformações em função da pressão. Espécime 2. Ponto A.

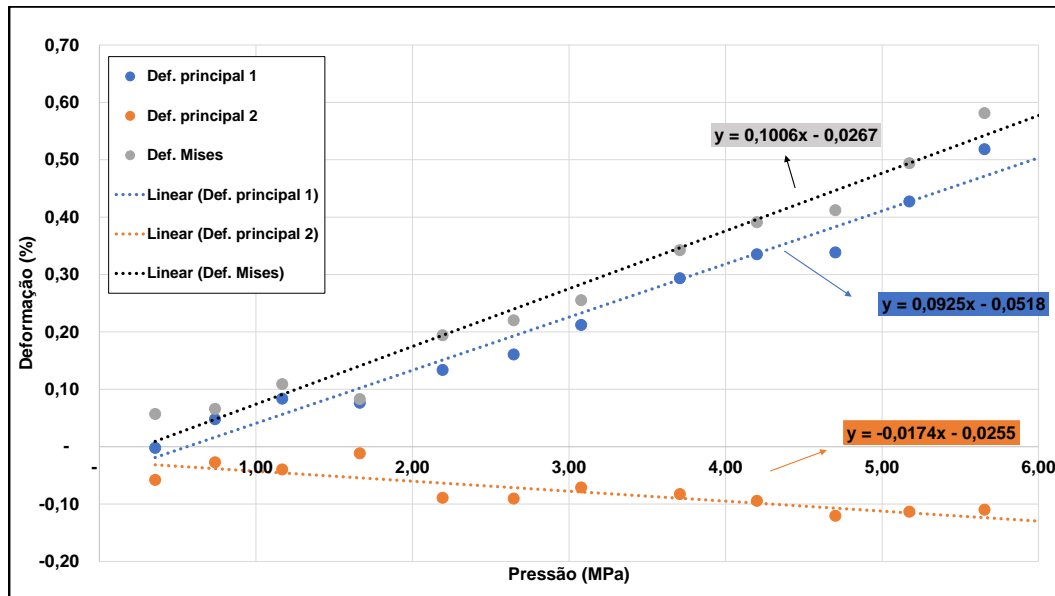


Figura C.5: Gráfico das deformações ε_1 , ε_2 e ε_{Mises} em função da pressão. Espécime 2 ponto A.

D

Gráficos do ensaio biaxial. Espécime 4.

D.1

Determinações do ponto da TMC e da ZTMC. Espécime 4. Ponto A.

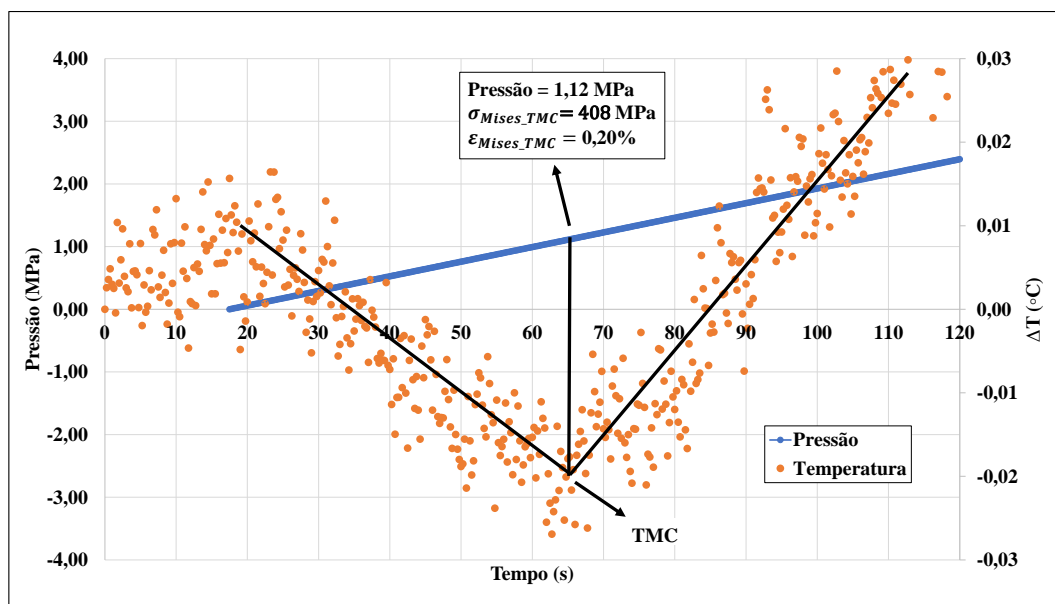


Figura D.1: Duto 4, ponto A. Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Primeiro método para determinar o ponto da TMC.

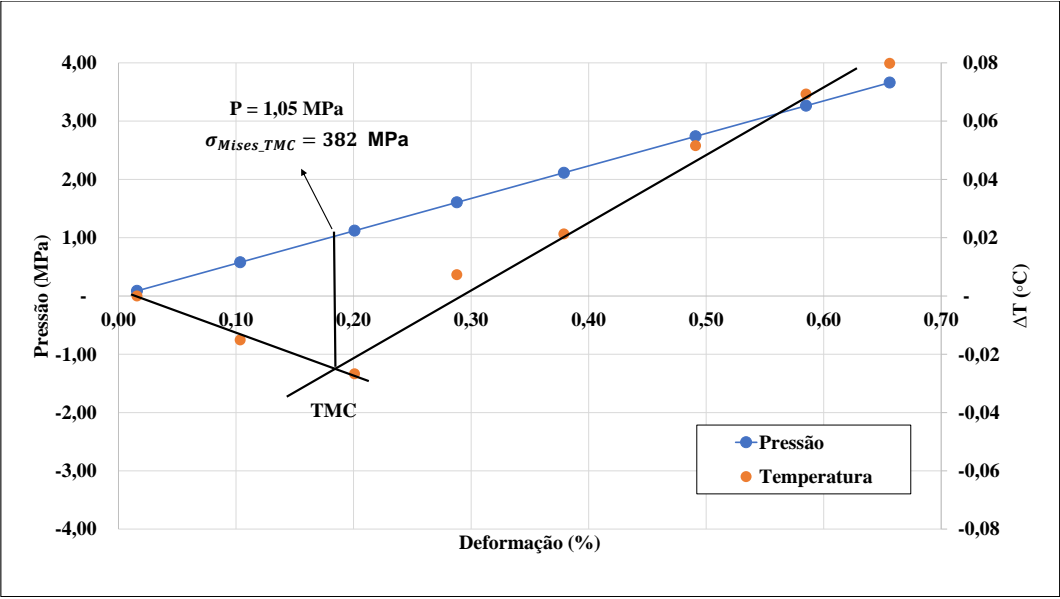


Figura D.2: Gráfico da pressão e temperatura em função da deformação. Espécime 4, ponto A. O ponto da TMC está relacionado com uma pressão de 1,05 MPa, cuja $\sigma_{Mises_TMC} = 382$ MPa.

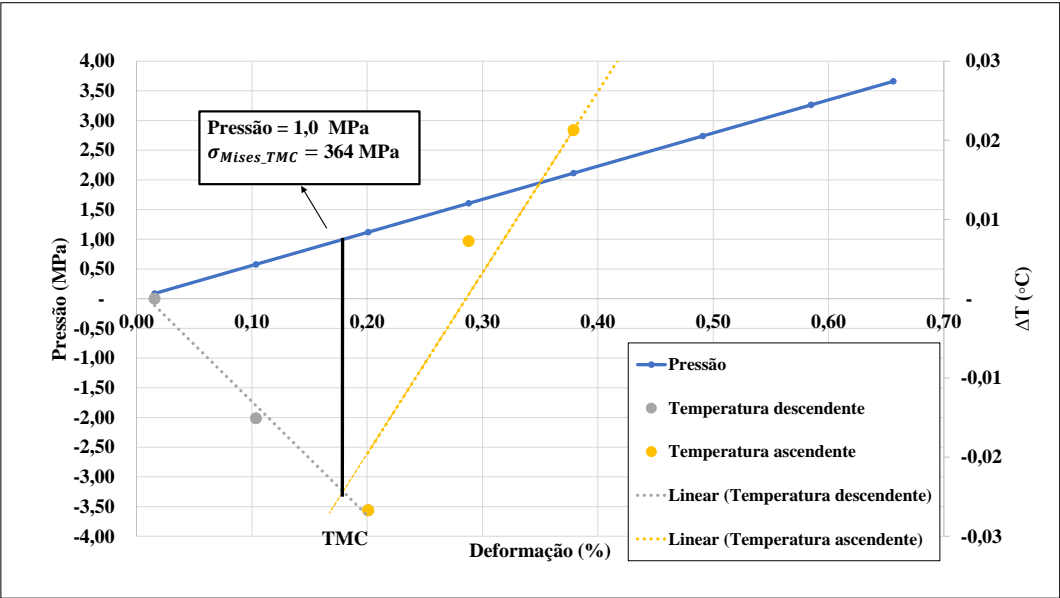


Figura D.3: Gráfico da pressão e temperatura em função da deformação. Espécime 4, ponto A. O ponto da TMC está relacionado com uma pressão de 1,00 MPa, cuja $\sigma_{Mises_TMC} = 364$ MPa.

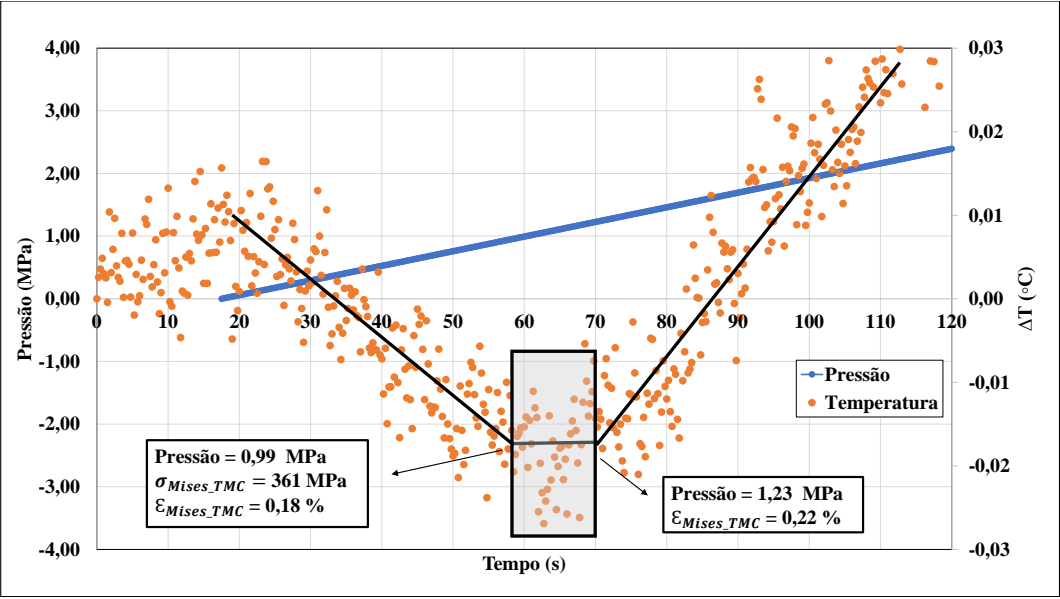


Figura D.4: Duto 4, ponto A. Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Determinação da ZTMC.

D.2

Gráfico das deformações em função da pressão. Espécime 4. Ponto A.

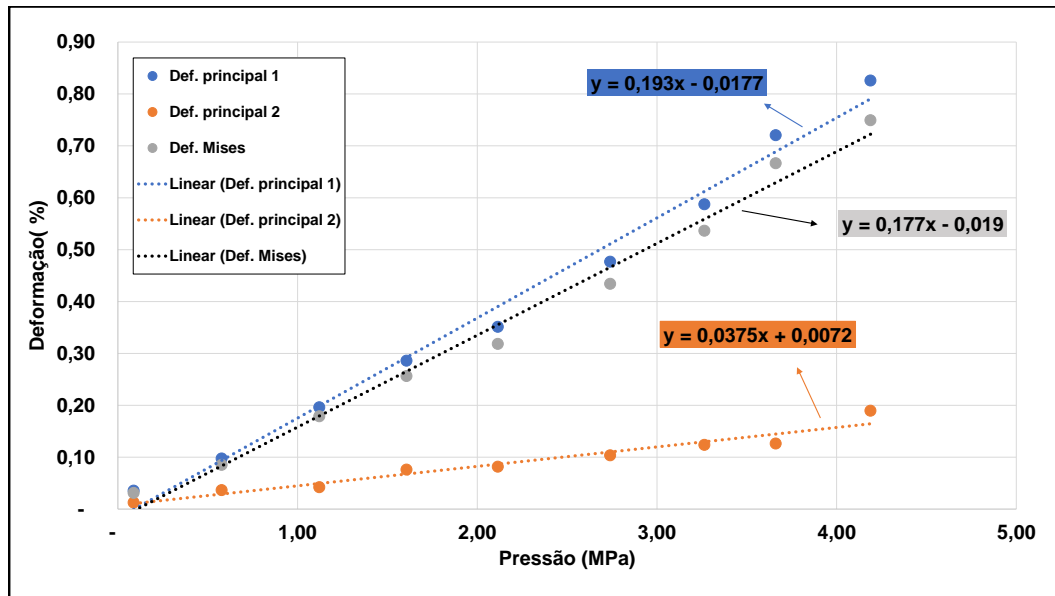


Figura D.5: Gráfico das deformações ε_1 , ε_2 e ε_{Mises} em função da pressão. Espécime 4 ponto A.

E

Gráficos do ensaio biaxial. Espécime 5.

E.1

Determinações do ponto da TMC e da ZTMC. Espécime 5. Ponto E.

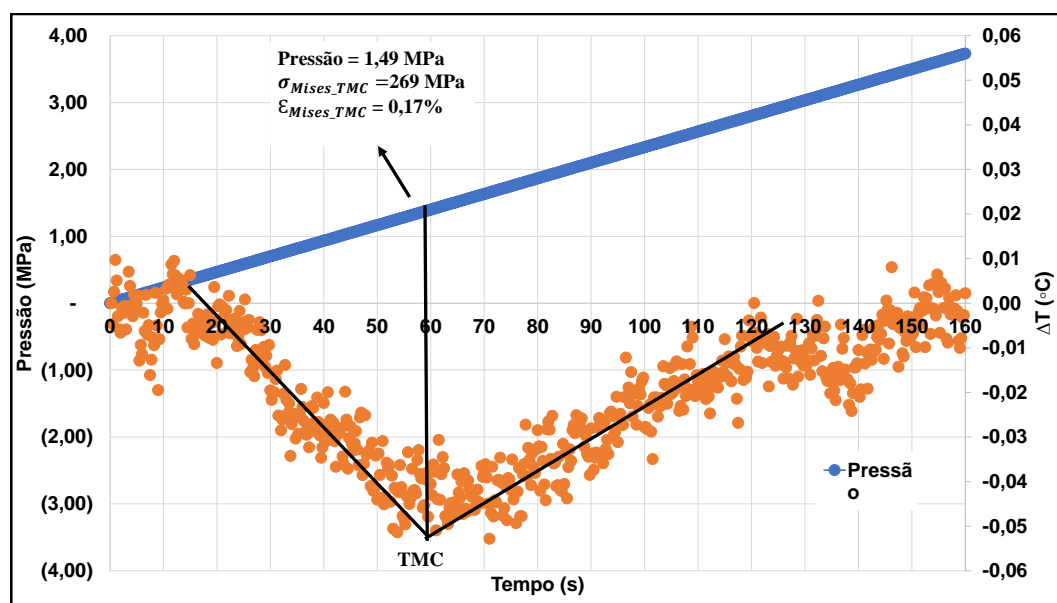


Figura E.1: Duto 5, ponto E. Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Primeiro método para determinar o ponto da TMC.

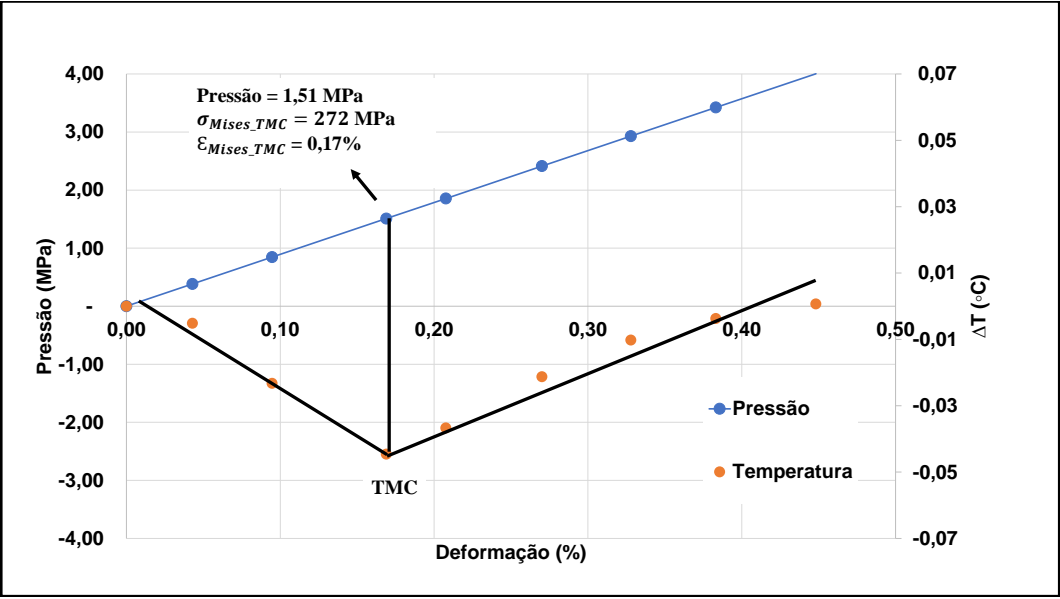


Figura E.2: Duto 5, ponto E. Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Segundo método para determinar o ponto da TMC.

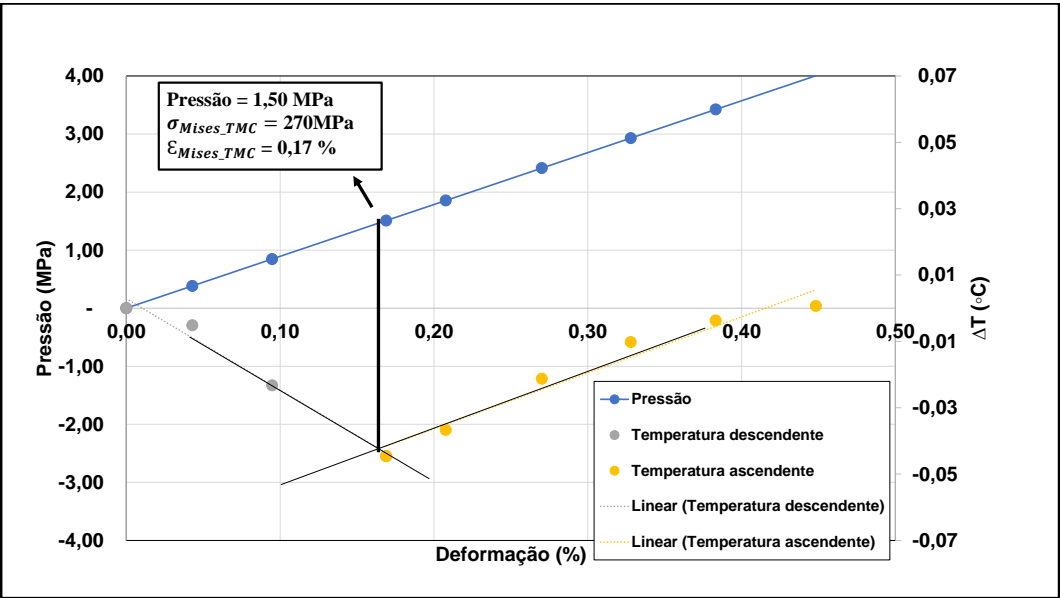


Figura E.3: Duto 5, ponto E. Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Terceiro método para determinar o ponto da TMC.

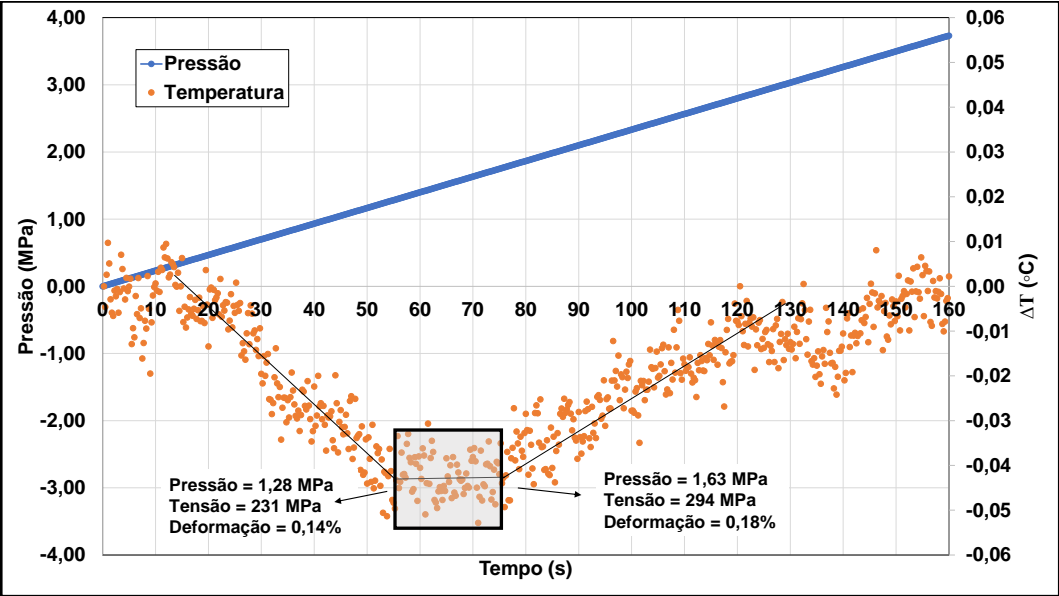


Figura E.4: Duto 5, ponto E. Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Terceiro método para determinar o ponto da TMC.

E.2
Gráfico das deformações em função da pressão. Espécime 5. Ponto E.

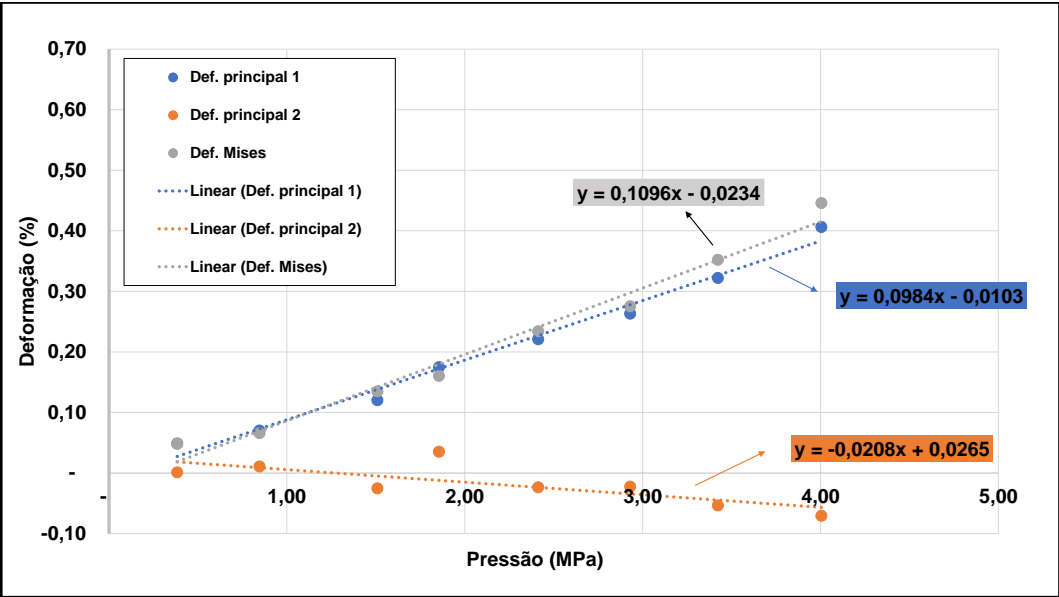


Figura E.5: Gráfico das deformações ε_1 , ε_2 e ε_{Mises} em função da pressão. Espécime 5, ponto E.

E.3
Determinações do ponto da TMC e da ZTMC. Espécime 5. Ponto F.

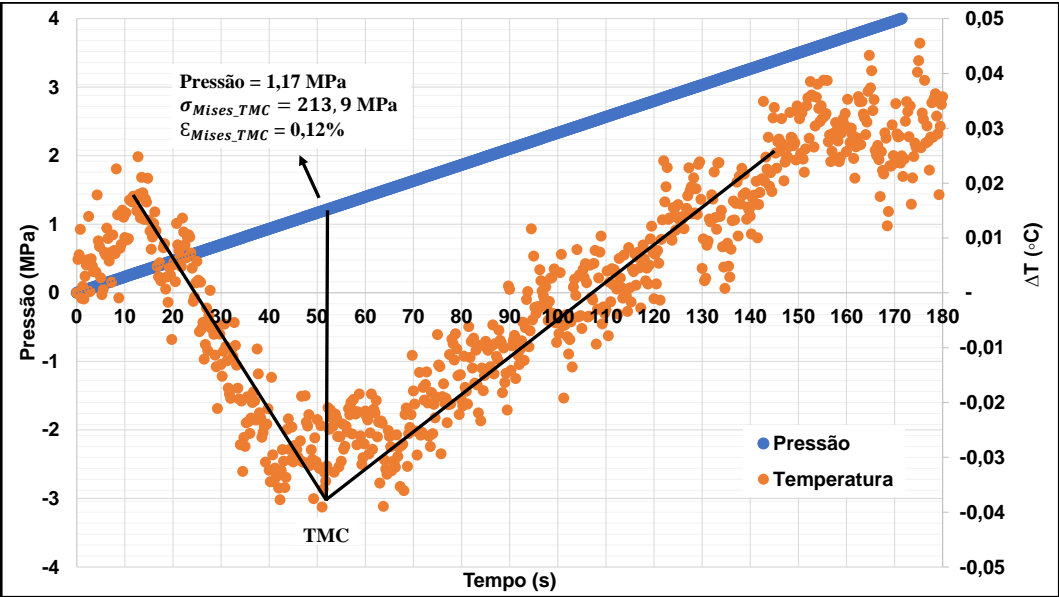


Figura E.6: Duto 5, ponto F. Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Primeiro método para determinar o ponto da TMC.

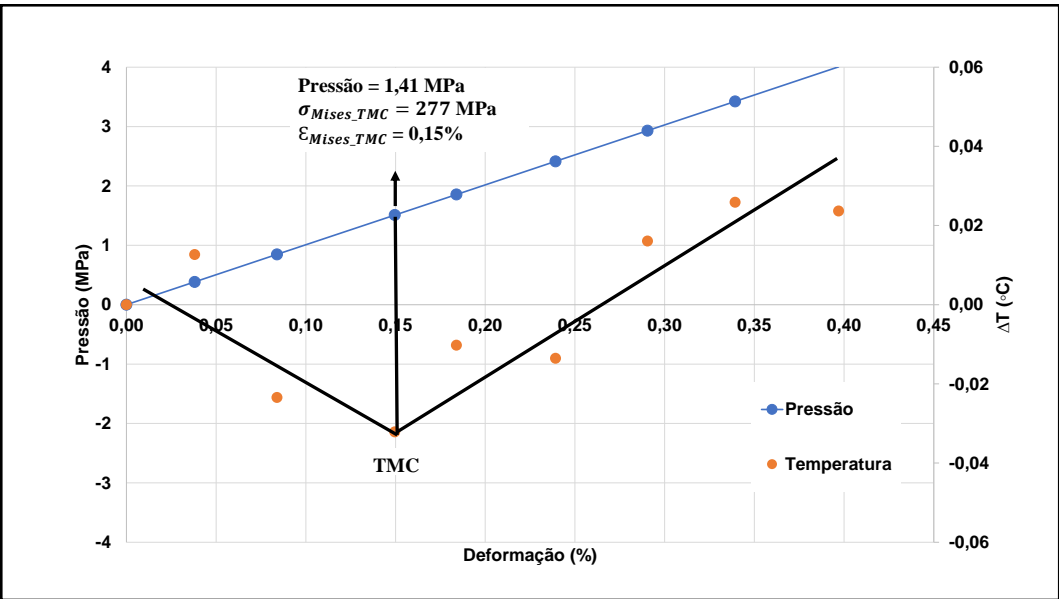


Figura E.7: Duto 5, ponto F. Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Segundo método para determinar o ponto da TMC.

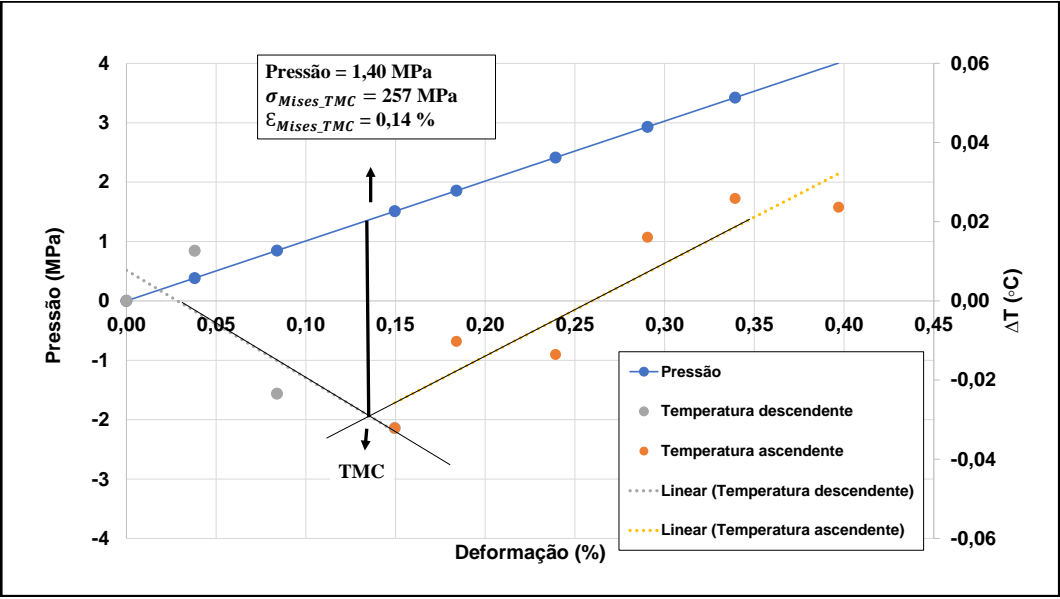


Figura E.8: Duto 5, ponto F. Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Terceiro método para determinar o ponto da TMC.

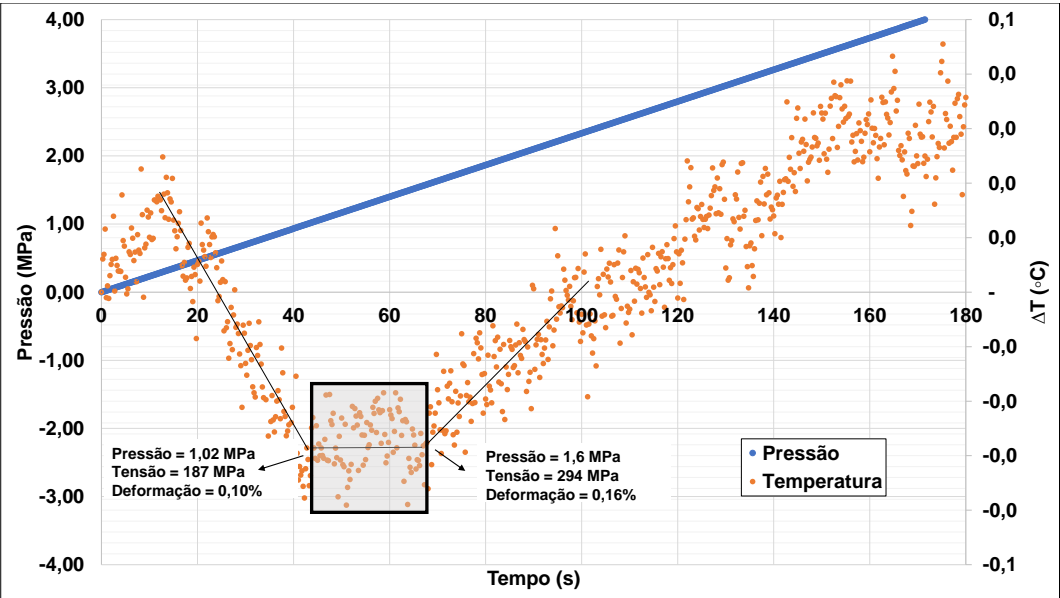


Figura E.9: Duto 5, ponto F. Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Determinação da ZTMC.

E.4

Gráfico das deformações em função da pressão. Espécime 5. Ponto F.

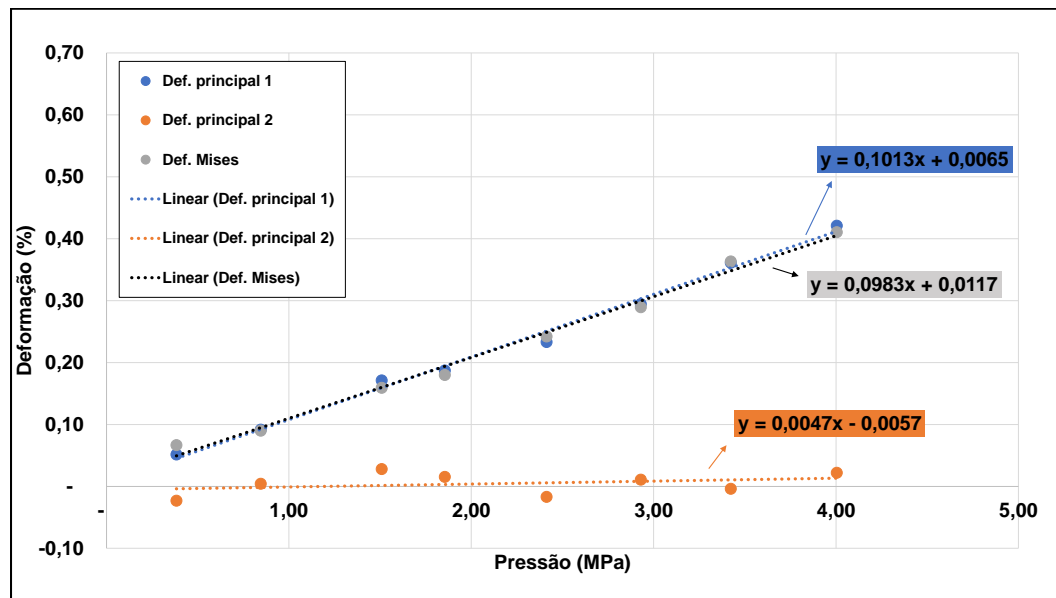


Figura E.10: Gráfico das deformações ε_1 , ε_2 e ε_{Mises} em função da pressão. Espécime 5, ponto F.

F

Gráficos do ensaio biaxial. Espécime 6.

F.1

Determinações do ponto da TMC e da ZTMC. Espécime 6. Ponto E.

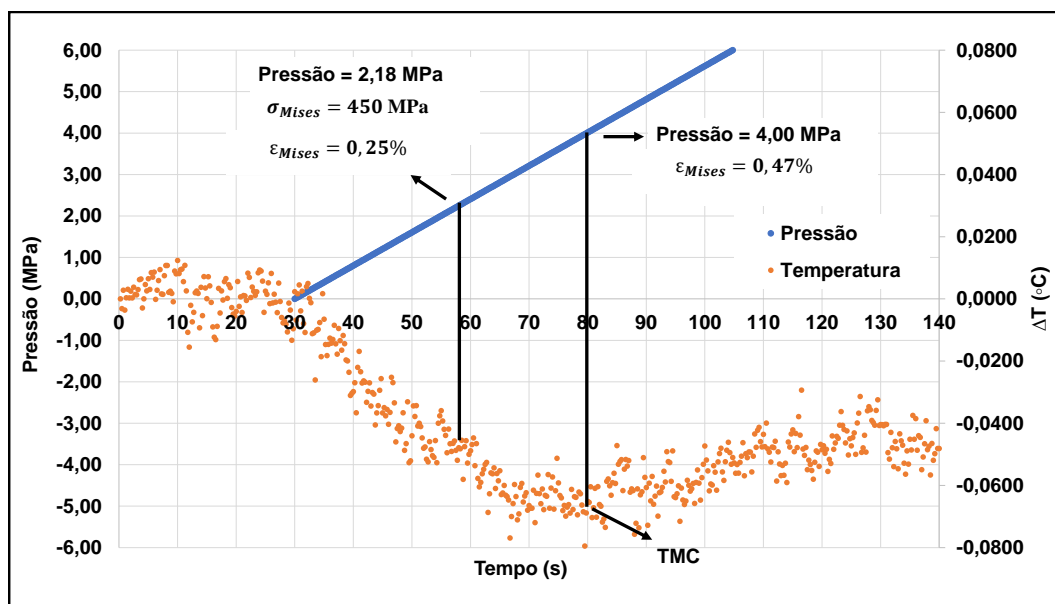


Figura F.1: Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Espécime 6, ponto E. Primeiro método para determinação do ponto da TMC.

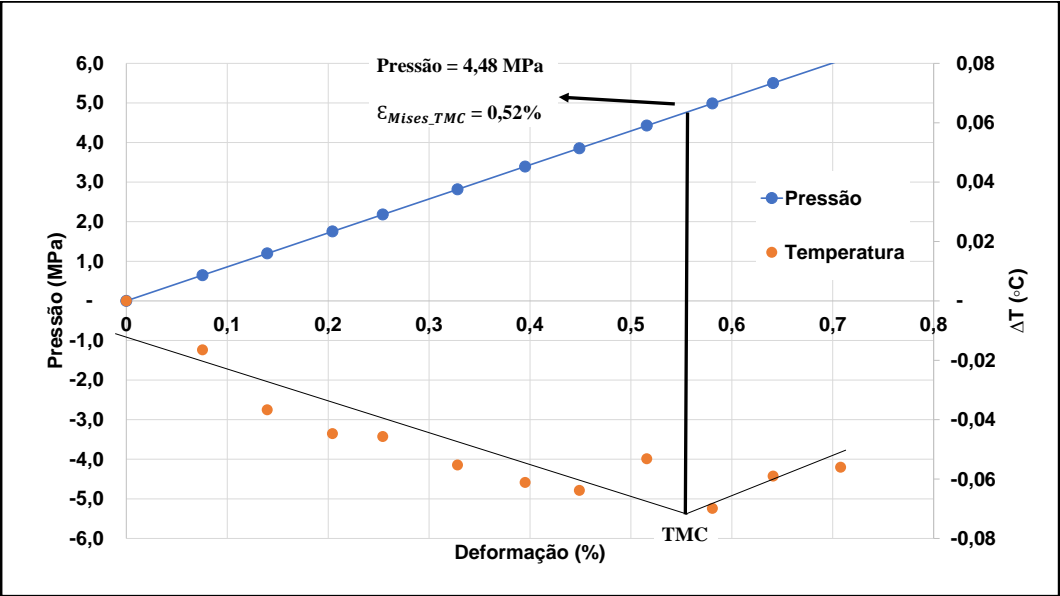


Figura F.2: Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Espécime 6, ponto E. Segundo método para determinação do ponto da TMC.

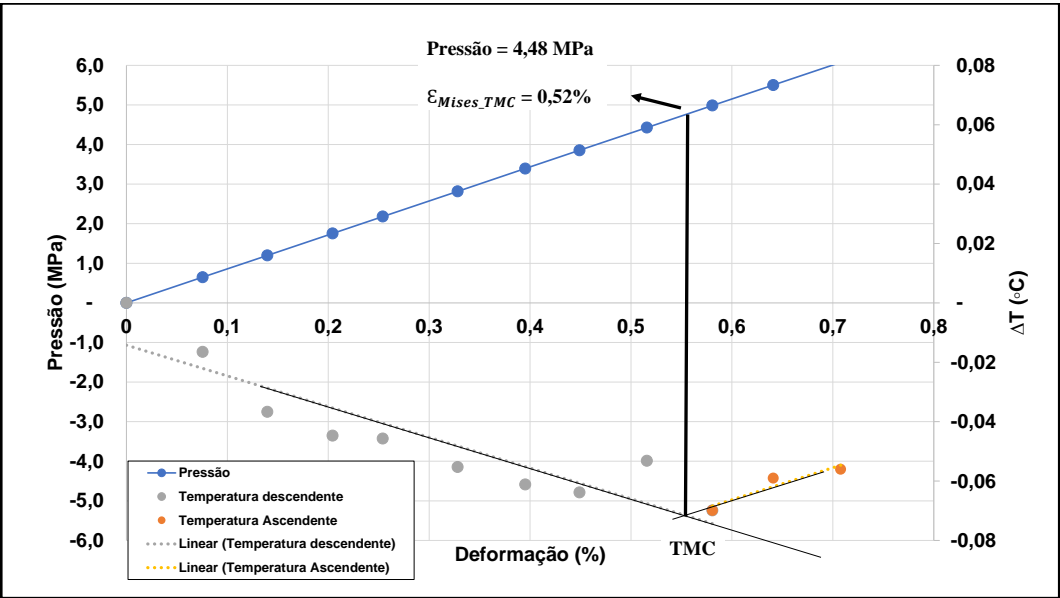


Figura F.3: Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Espécime 6, ponto E. Terceiro método para determinação do ponto da TMC.

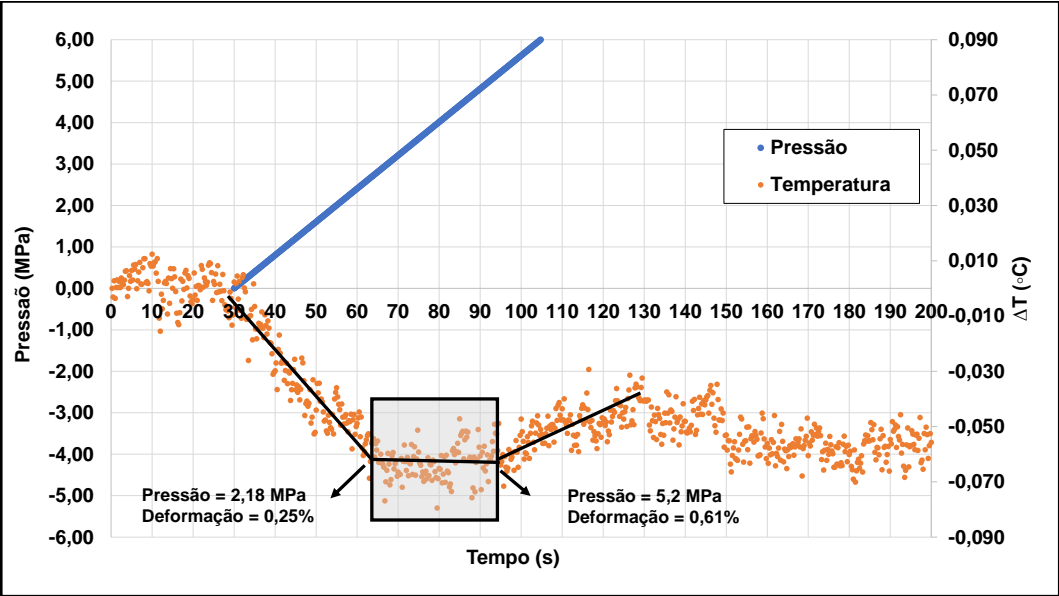


Figura F.4: Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Espécime 6, ponto E. Determinação da ZTMC

F.2

Gráfico das deformações em função da pressão. Espécime 6. Ponto E.

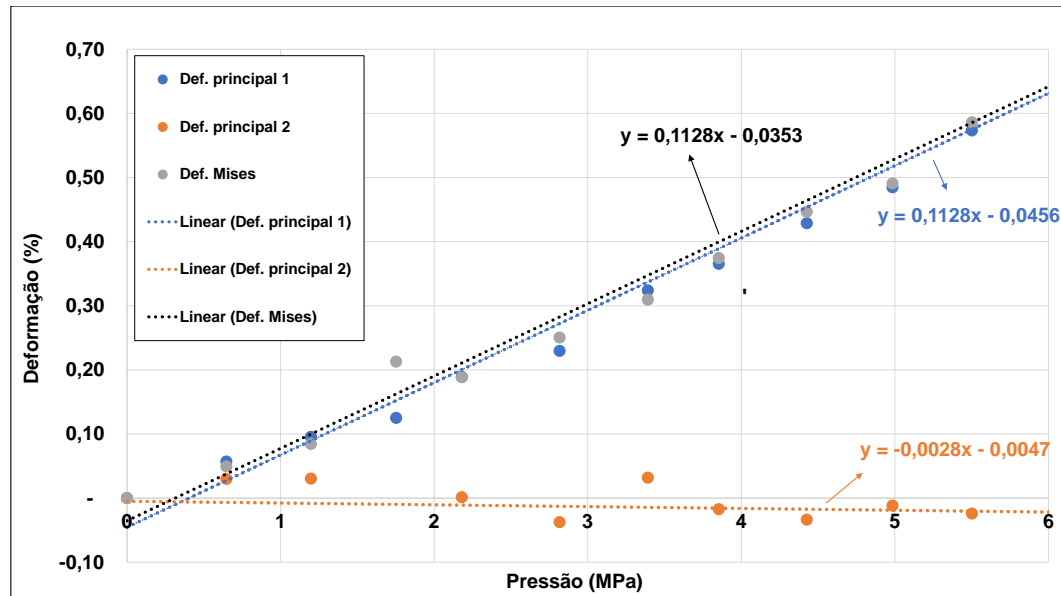


Figura F.5: Gráfico das deformações ε_1 , ε_2 e ε_{Mises} em função da pressão. Espécime 6, ponto E.

F.3
Determinações do ponto da TMC e da ZTMC. Espécime 6. Ponto F.

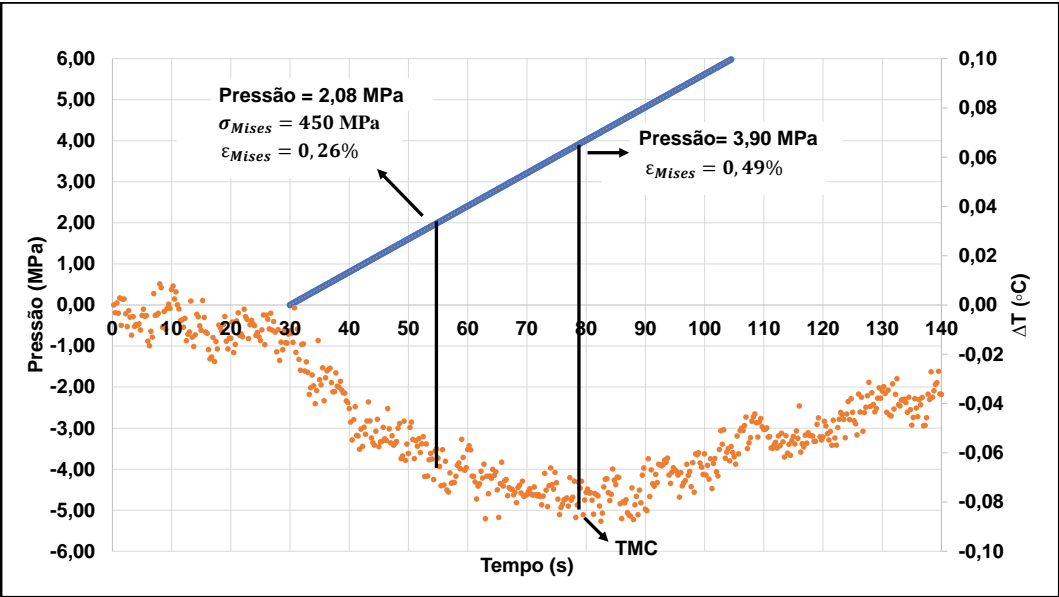


Figura F.6: Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Espécime 6, ponto F. Primeiro método para determinação do ponto da TMC.

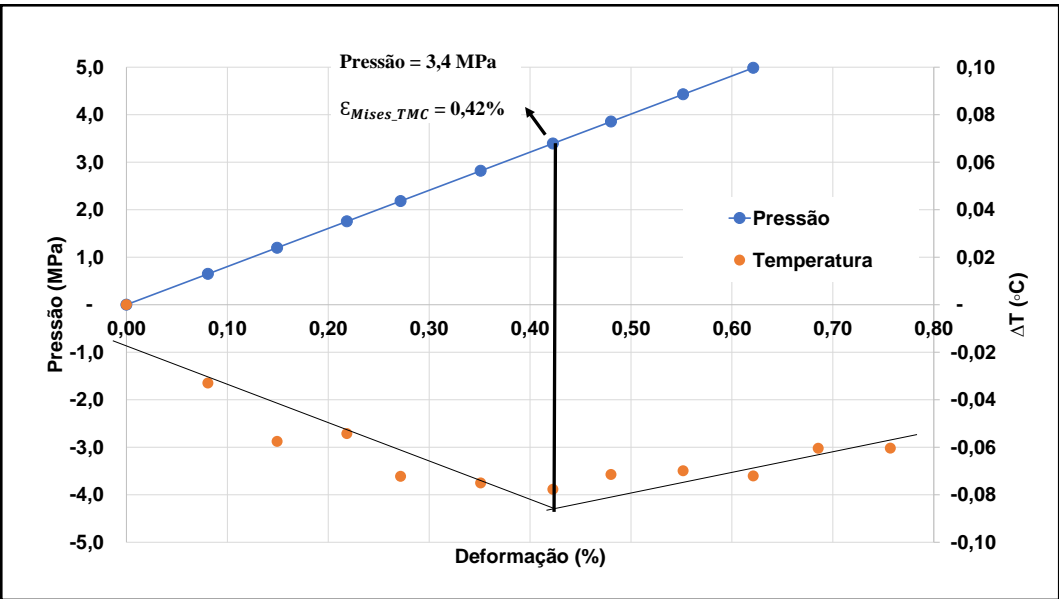


Figura F.7: Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Espécime 6, ponto F. Segundo método para determinação do ponto da TMC.

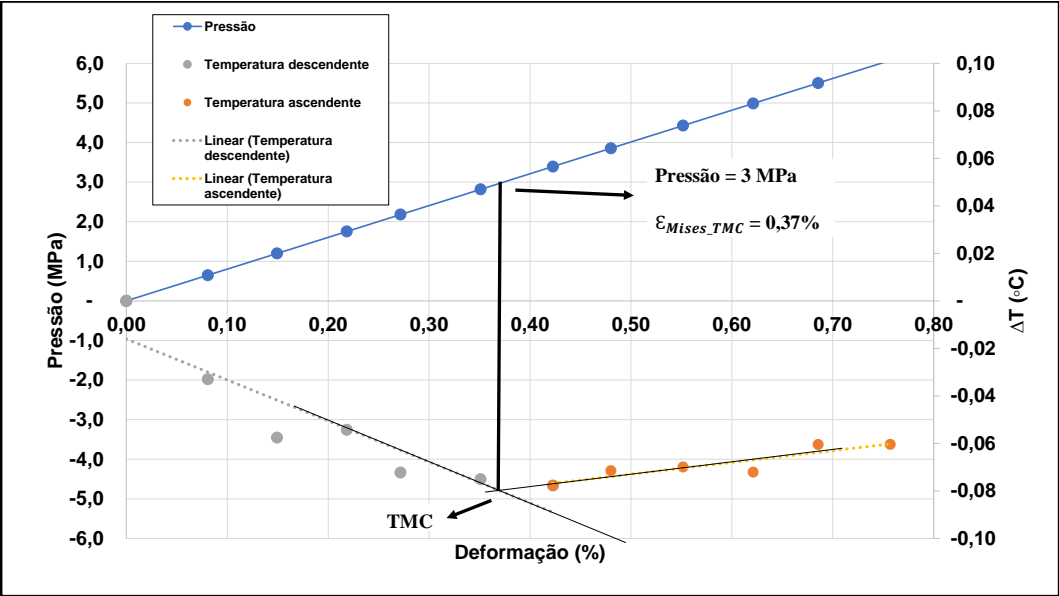


Figura F.8: Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Espécime 6, ponto F. Terceiro método para determinação do ponto da TMC.

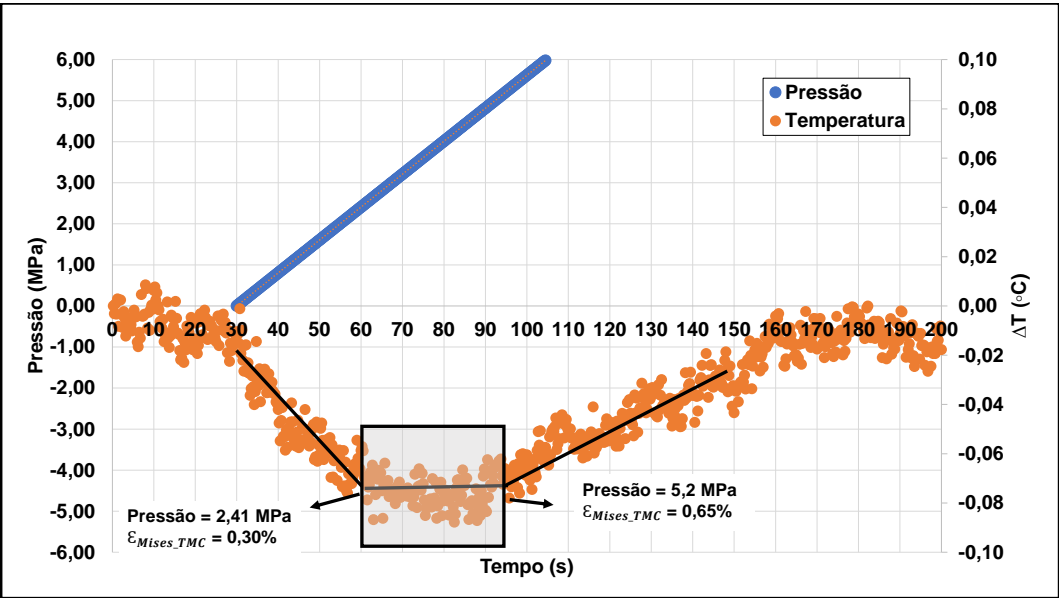


Figura F.9: Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Espécime 6, ponto F. Determinação da ZTMC.

F.4
Gráfico das deformações em função da pressão. Espécime 6. Ponto F.

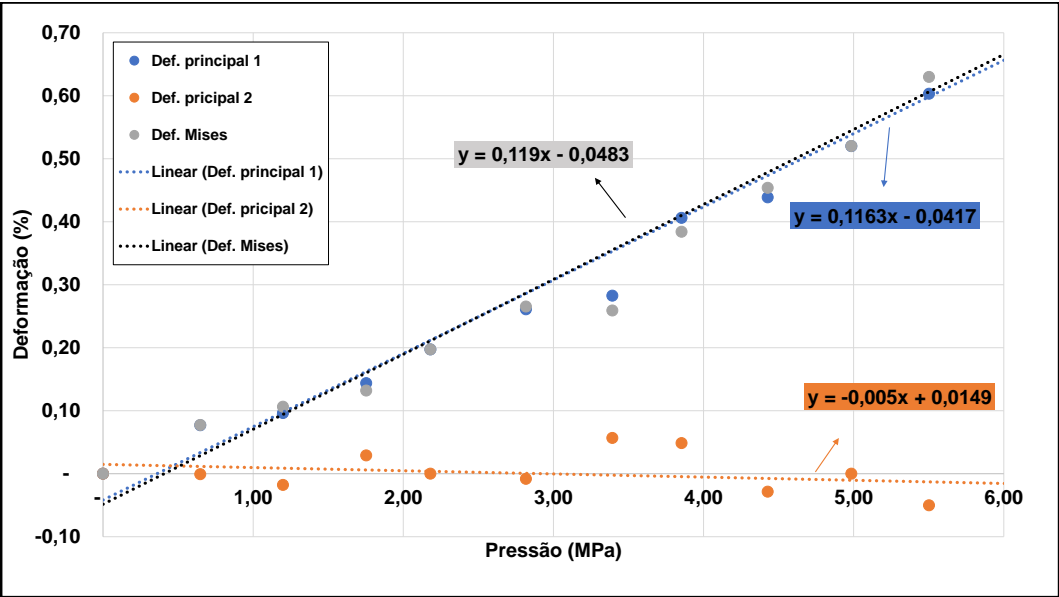


Figura F.10: Gráfico das deformações ε_1 , ε_2 e ε_{Mises} em função da pressão. Espécime 6, ponto F.

G

Gráficos do ensaio biaxial. Espécime 7.

G.1

Determinações do ponto da TMC e da ZTMC. Espécime 7. Ponto E.

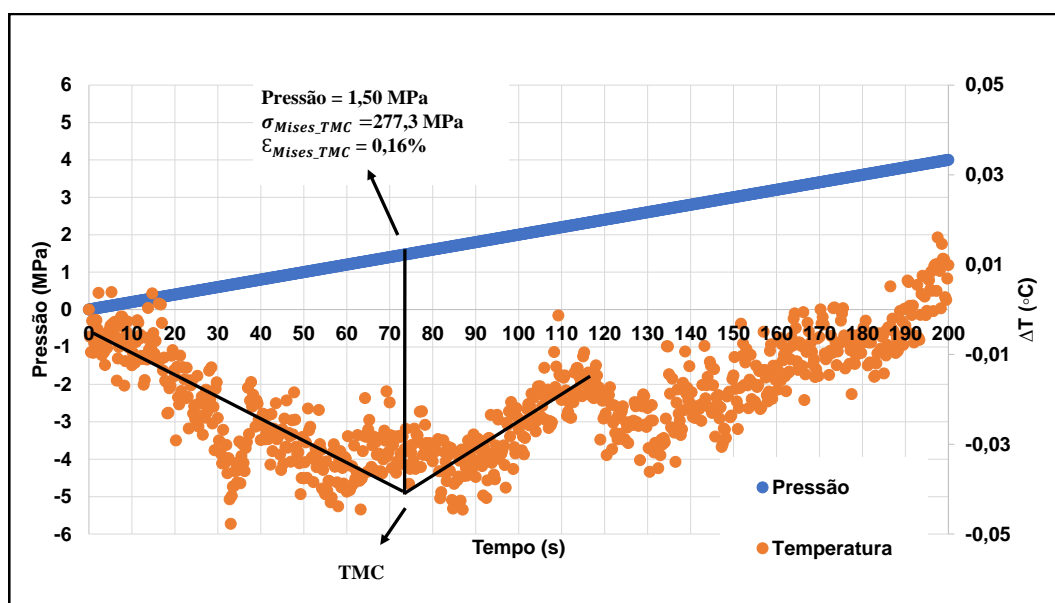


Figura G.1: Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Espécime 7, ponto E. Primeiro método para determinação do ponto da TMC.

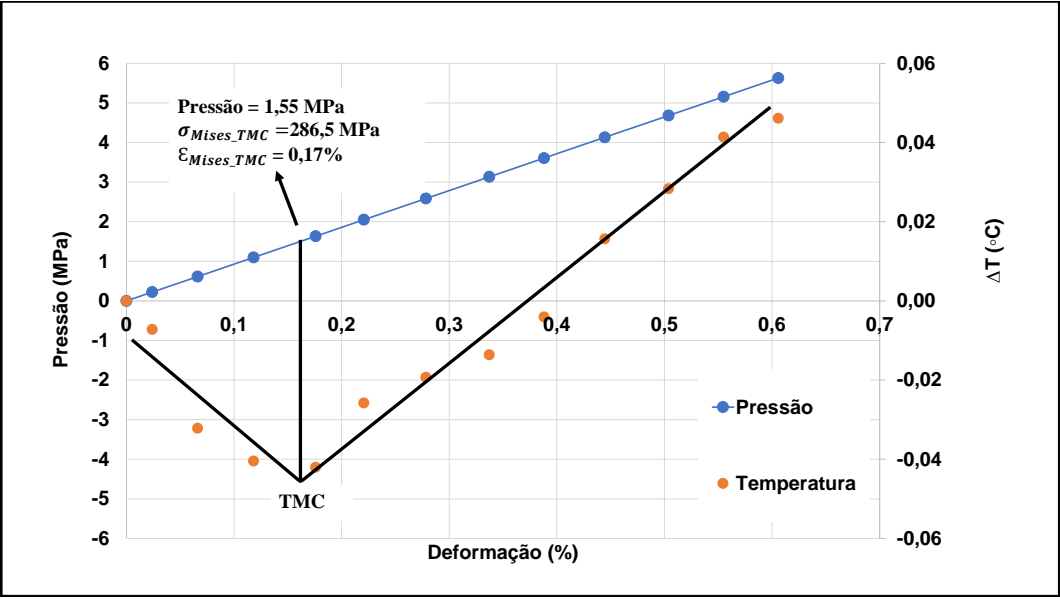


Figura G.2: Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Espécime 7, ponto E. Segundo método para determinação do ponto da TMC.

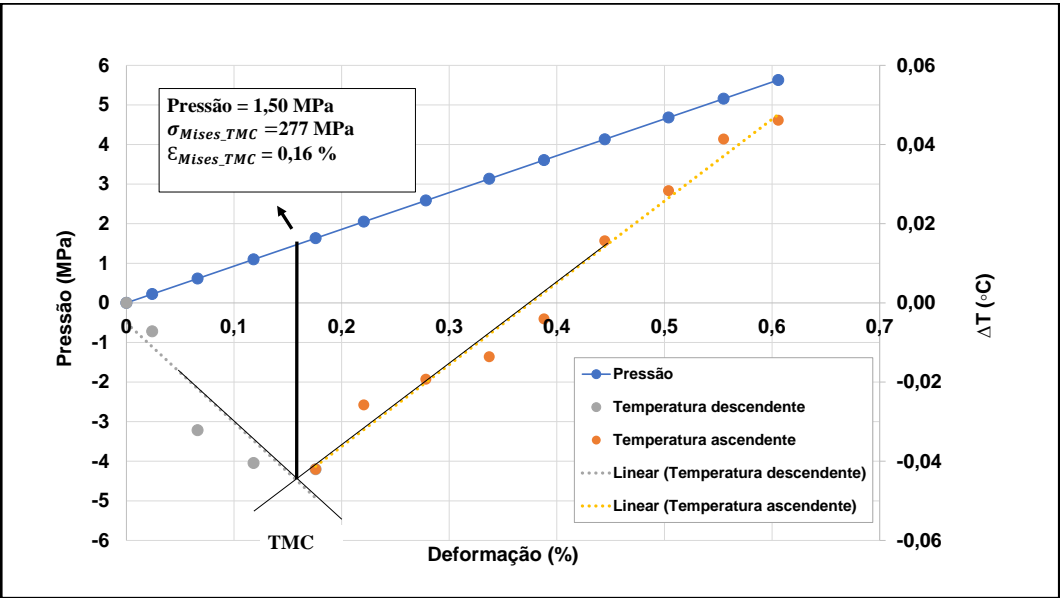


Figura G.3: Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Espécime 7, ponto E. Terceiro método para determinação do ponto da TMC.

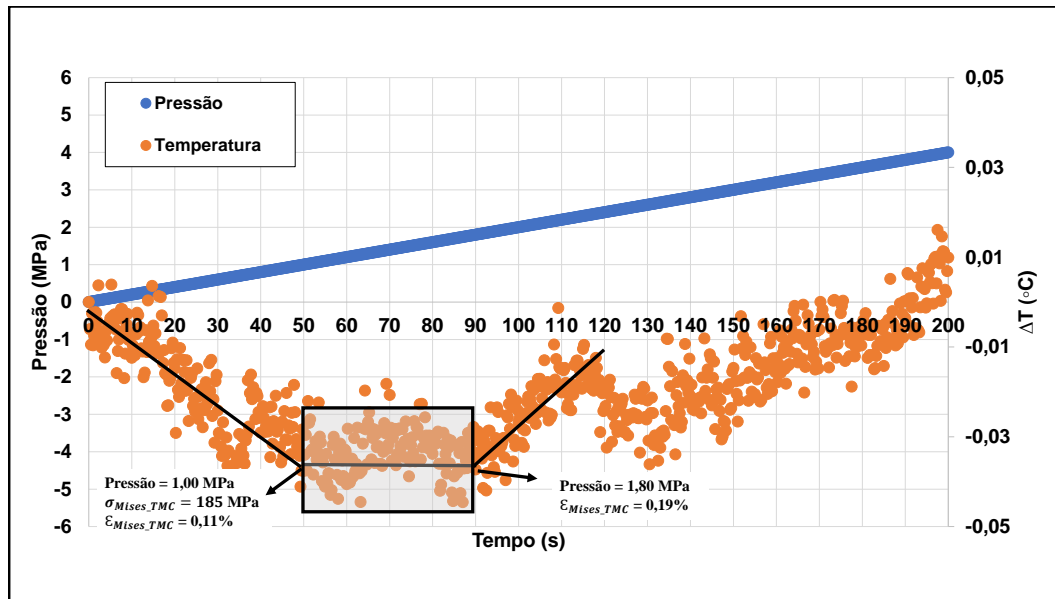


Figura G.4: Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Espécime 7, ponto E. Determinação da ZTMC.

G.2

Gráfico das deformações em função da pressão. Espécime 7. Ponto E.

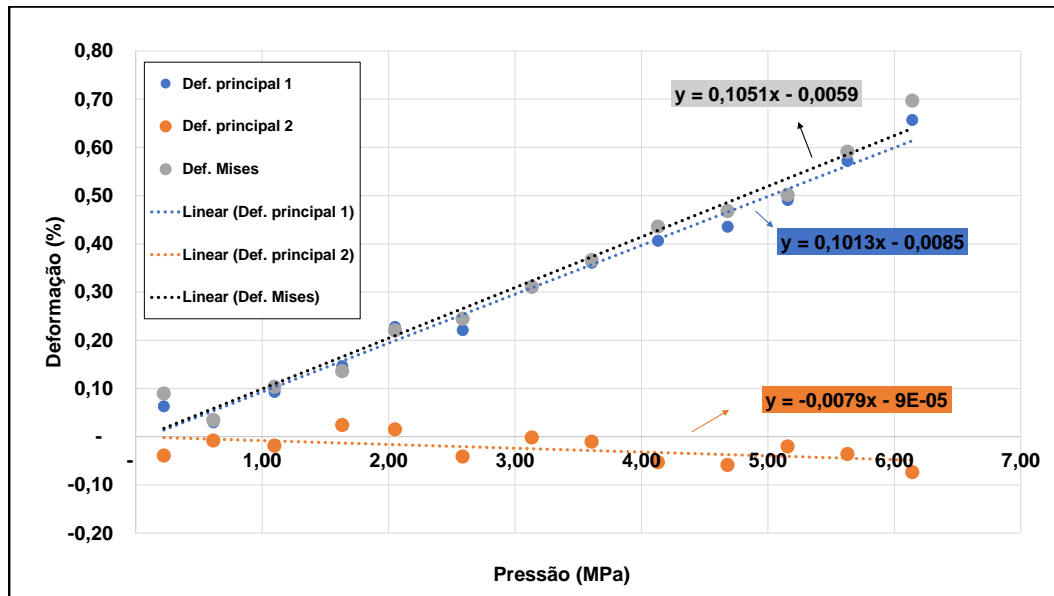


Figura G.5: Gráfico das deformações ε_1 , ε_2 e ε_{Mises} em função da pressão. Espécime 7, ponto E.

G.3

Determinações do ponto da TMC e da ZTMC. Espécime 7. Ponto F.

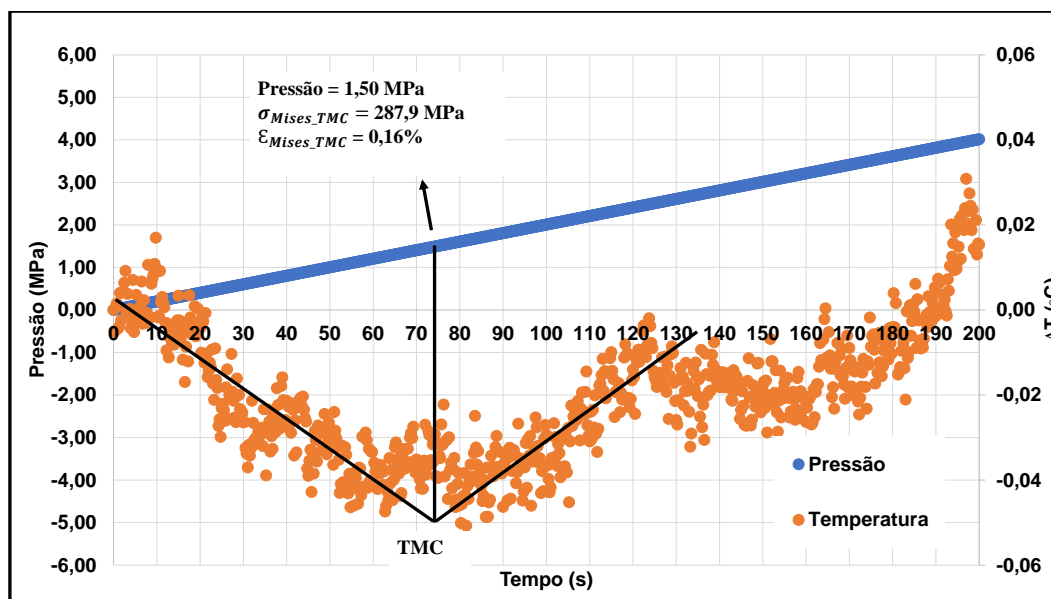


Figura G.6: Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Espécime 7, ponto F. Primeiro método para determinação do ponto da TMC.

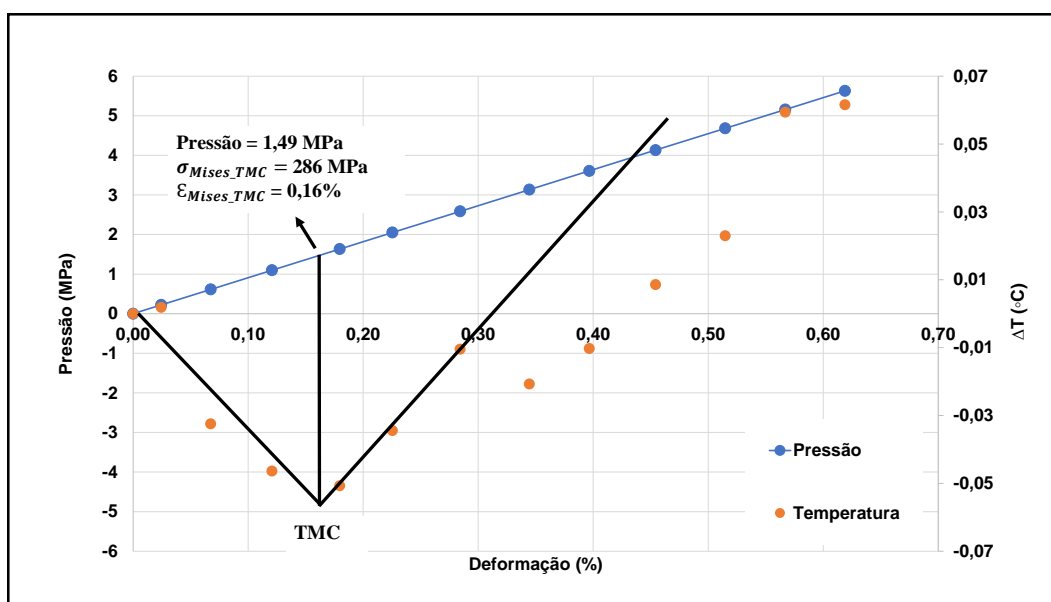


Figura G.7: Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Espécime 7, ponto F. Segundo método para determinação do ponto da TMC.

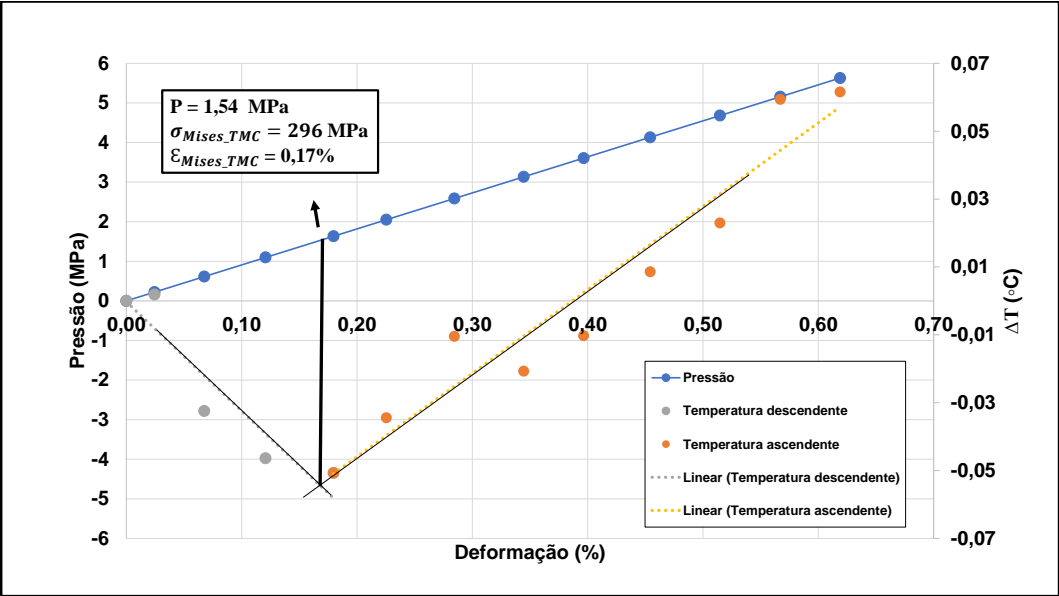


Figura G.8: Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Espécime 7, ponto F. Terceiro método para determinação do ponto da TMC.

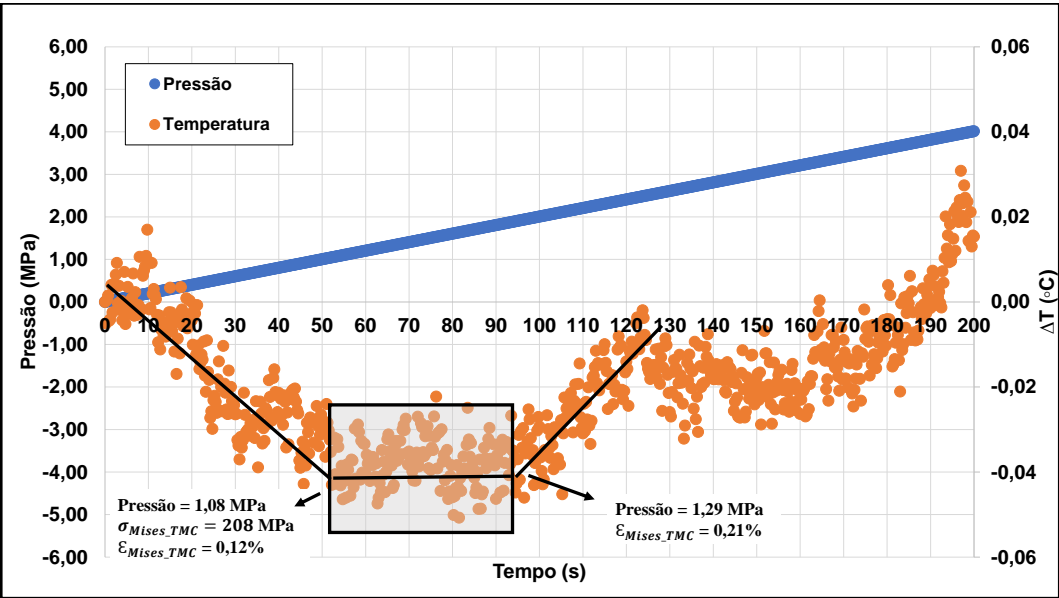


Figura G.9: Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Espécime 7, ponto F. Determinação da ZTMC.

G.4

Gráfico das deformações em função da pressão. Espécime 7. Ponto F.

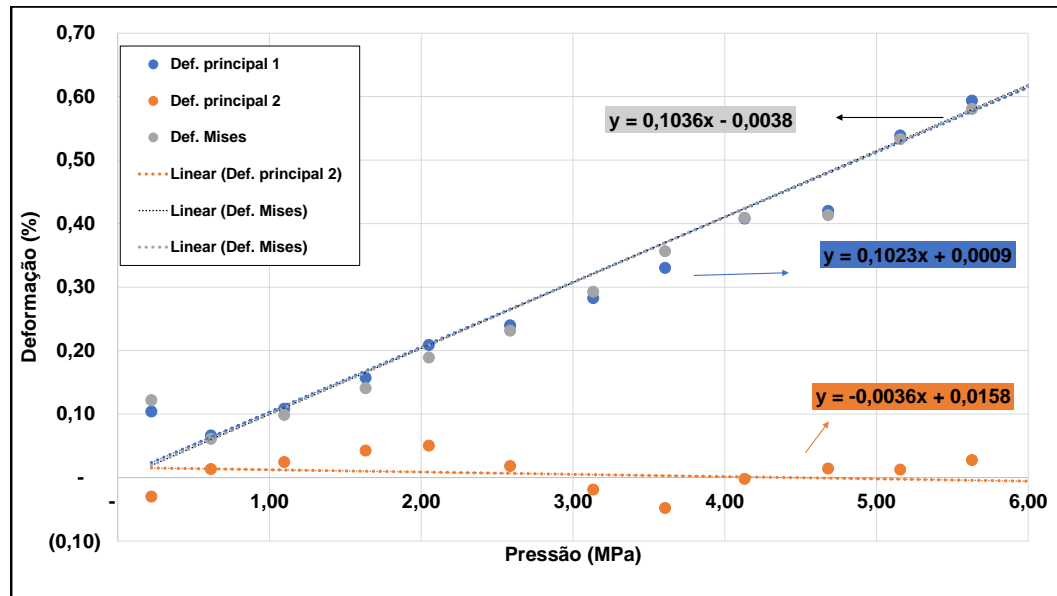


Figura G.10: Gráfico das deformações ε_1 , ε_2 e ε_{Mises} em função da pressão. Espécime 7, ponto F.

H

Gráficos do ensaio biaxial. Espécime 8.

H.1

Determinações do ponto da TMC e da ZTMC. Espécime 8. Ponto E.

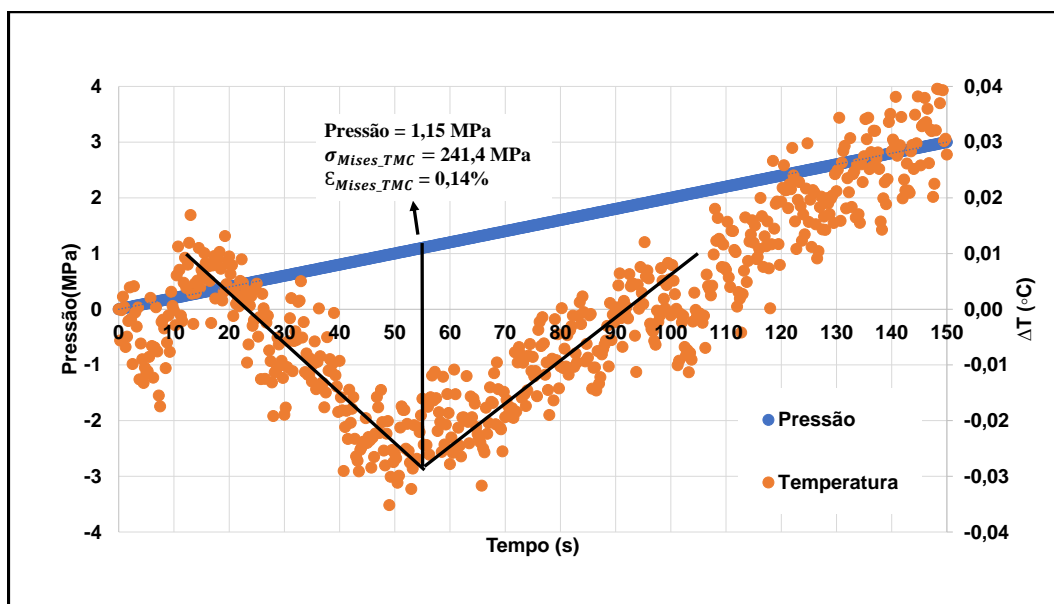


Figura H.1: Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Espécime 8, ponto E. Primeiro método para determinação do ponto da TMC.

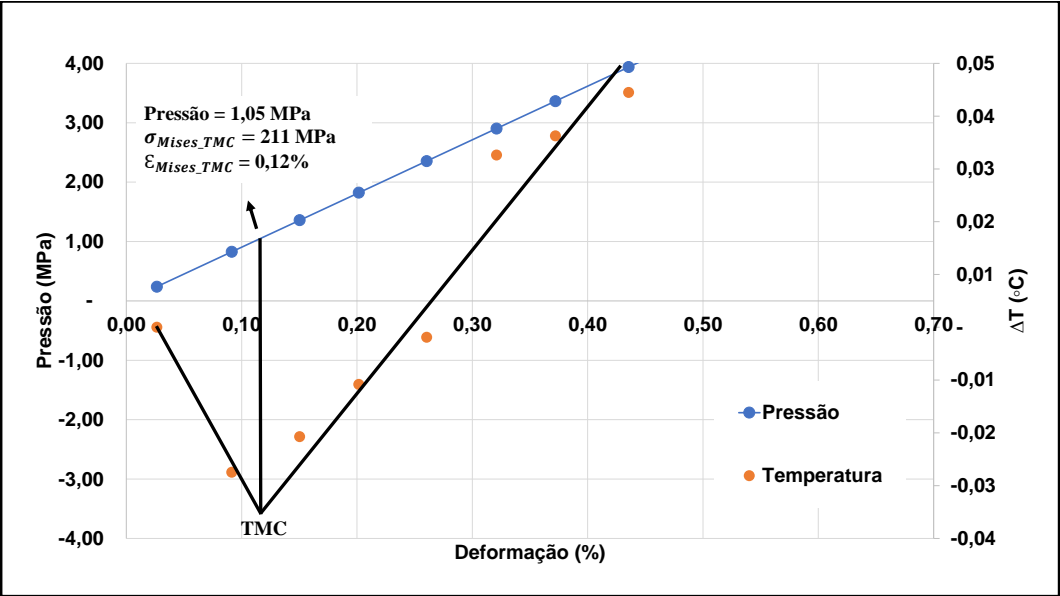


Figura H.2: Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Espécime 8, ponto E. Segundo método para determinação do ponto da TMC.

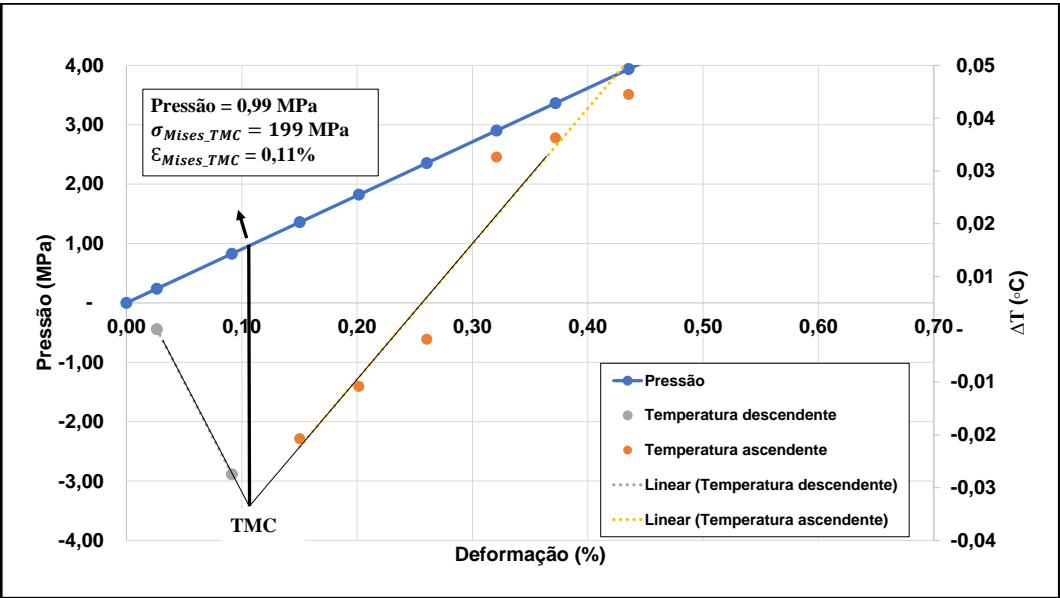


Figura H.3: Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Espécime 8, ponto E. Terceiro método para determinação do ponto da TMC.

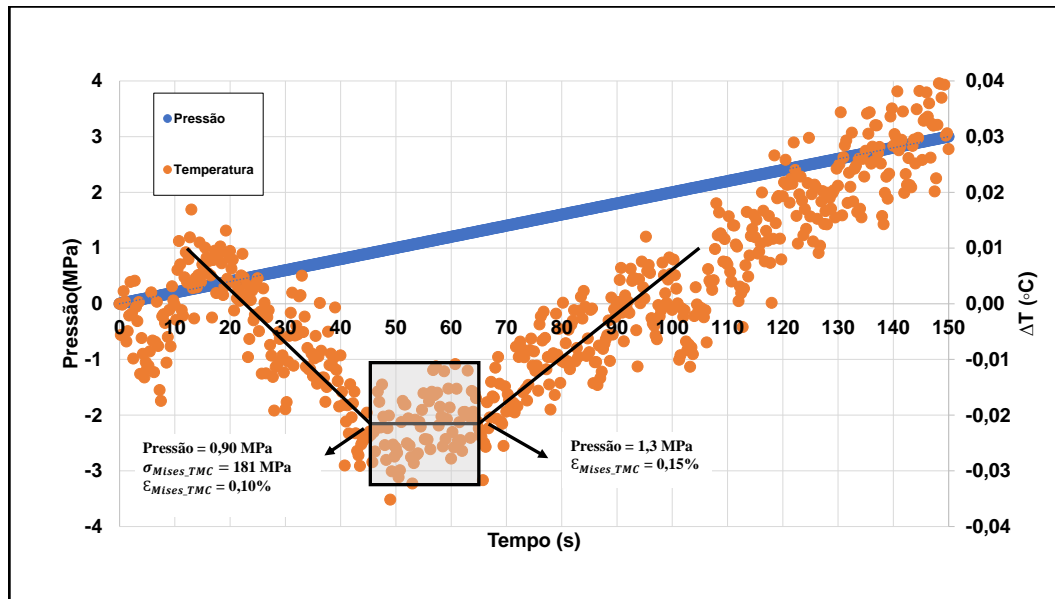


Figura H.4: Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Espécime 8, ponto *E*. Determinação da ZTMC.

H.2

Gráfico das deformações em função da pressão. Espécime 8. Ponto E.

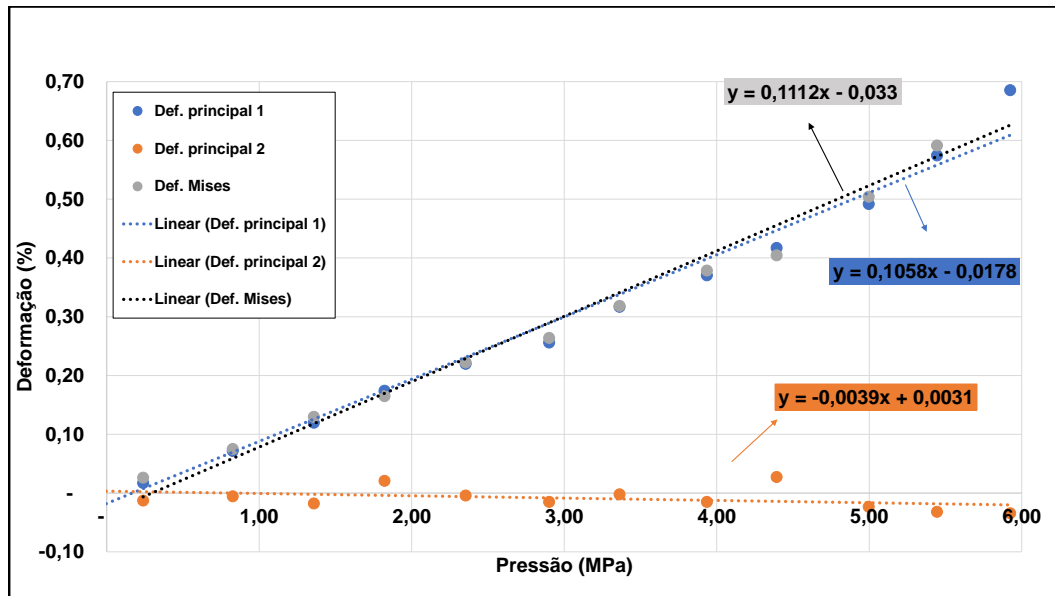


Figura H.5: Gráfico das deformações ε_1 , ε_2 e ε_{Mises} em função da pressão. Espécime 8, ponto E.

H.3

Determinações do ponto da TMC e da ZTMC. Espécime 8. Ponto F.

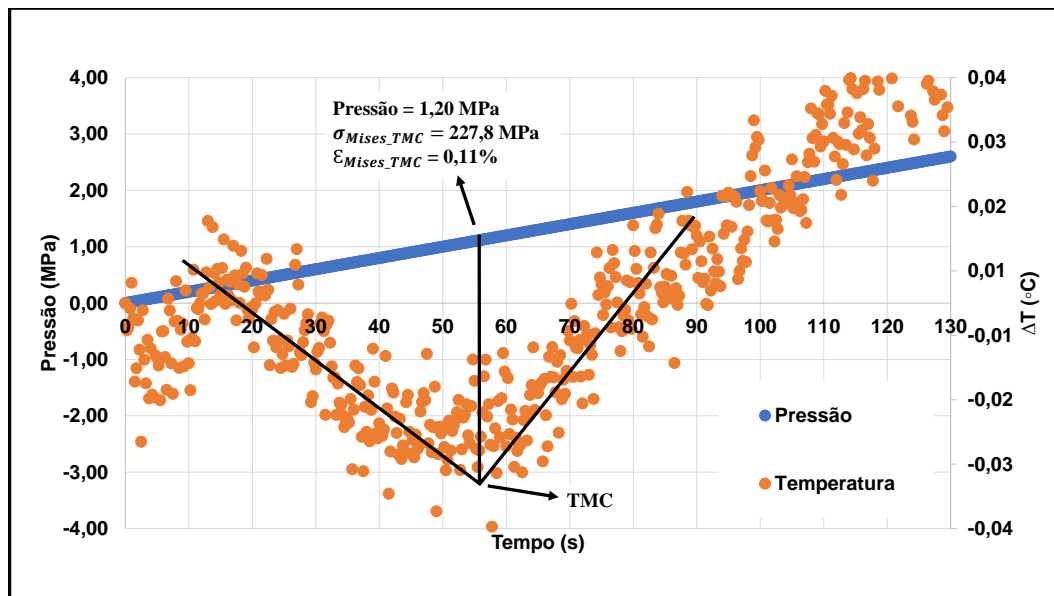


Figura H.6: Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Espécime 8, ponto F. Primeiro método para determinação do ponto da TMC.

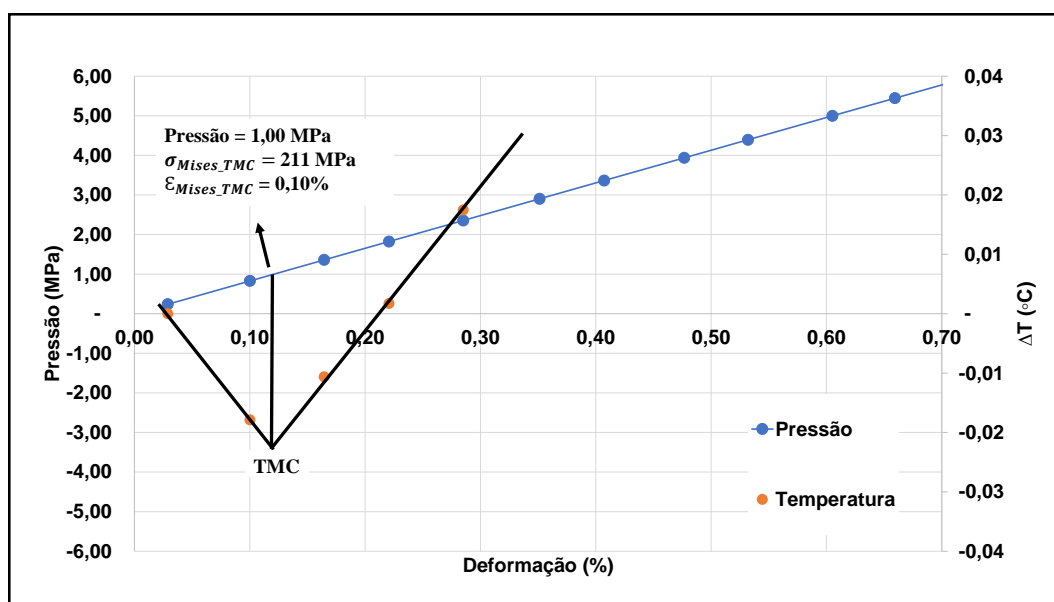


Figura H.7: Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Espécime 8, ponto F. Segundo método para determinação do ponto da TMC.

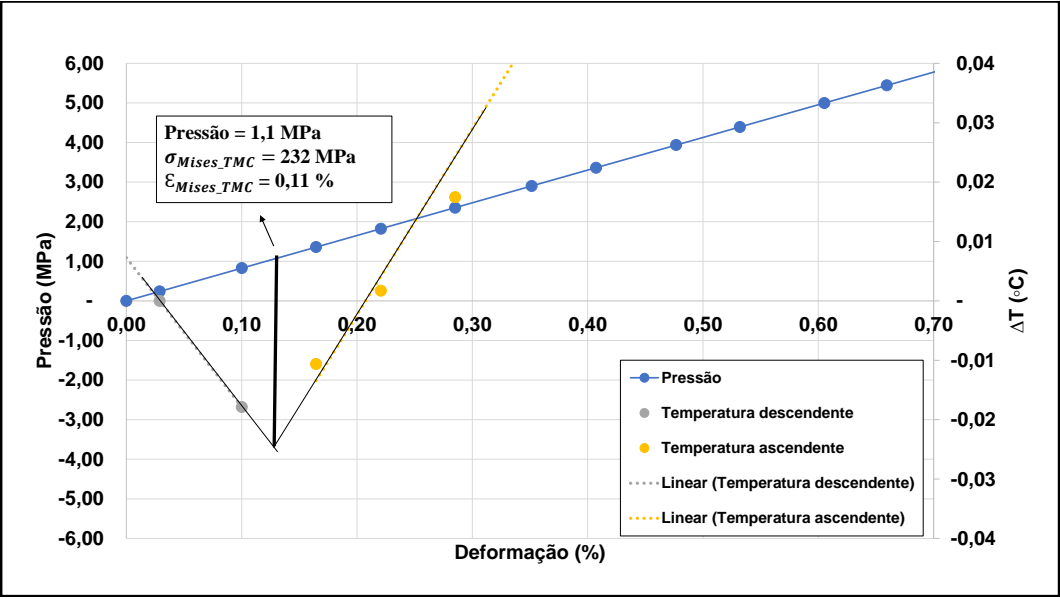


Figura H.8: Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Espécime 8, ponto F. Terceiro método para determinação do ponto da TMC.

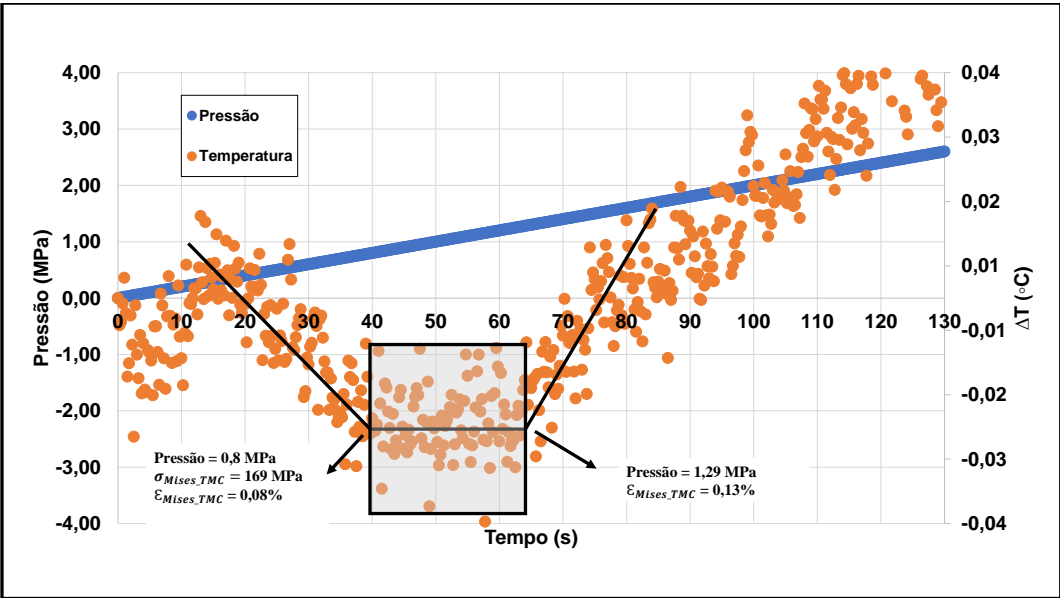


Figura H.9: Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Espécime 8, ponto F. Determinação da ZTMC.

H.4
Gráfico das deformações em função da pressão. Espécime 8. Ponto F.

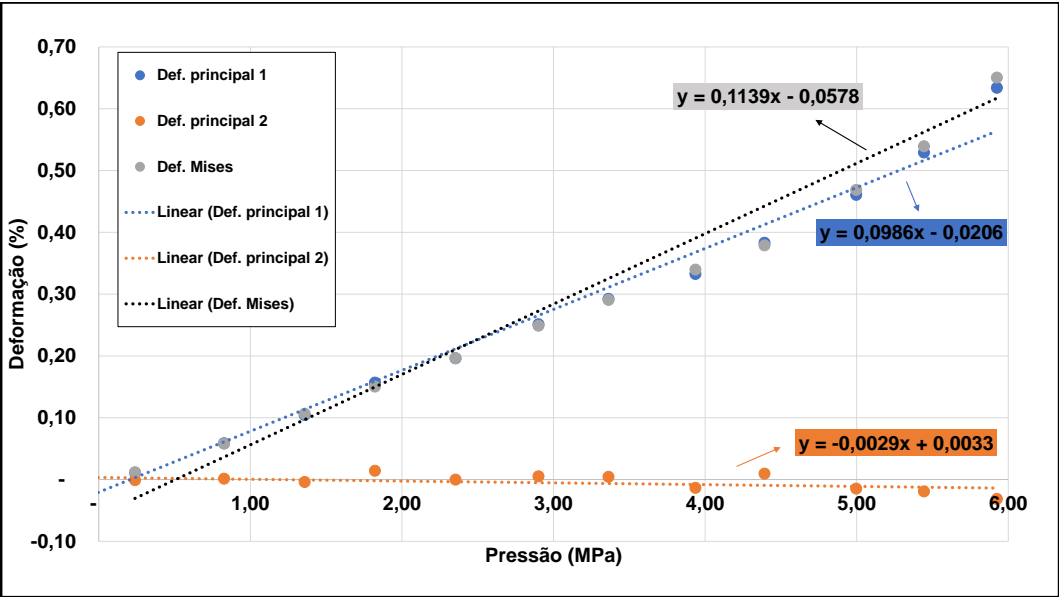


Figura H.10: Gráfico das deformações ε_1 , ε_2 e ε_{Mises} em função da pressão. Espécime 8, ponto F.

I

Gráficos do ensaio biaxial. Espécime 9.

I.1

Determinações do ponto da TMC e da ZTMC. Espécime 9. Ponto E.

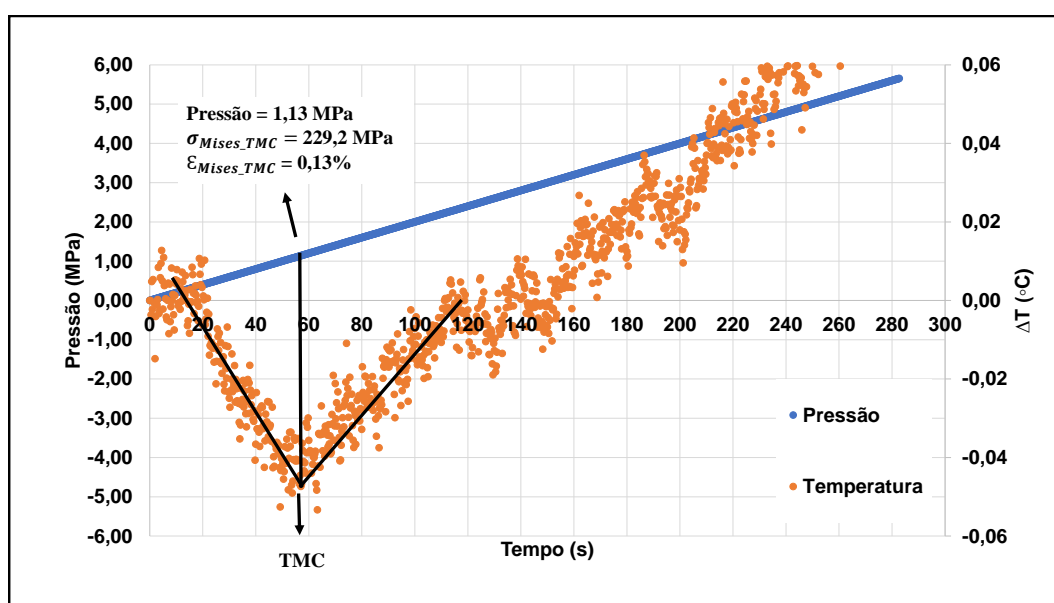


Figura I.1: Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Espécime 9, ponto E. Primeiro método para determinação do ponto da TMC.

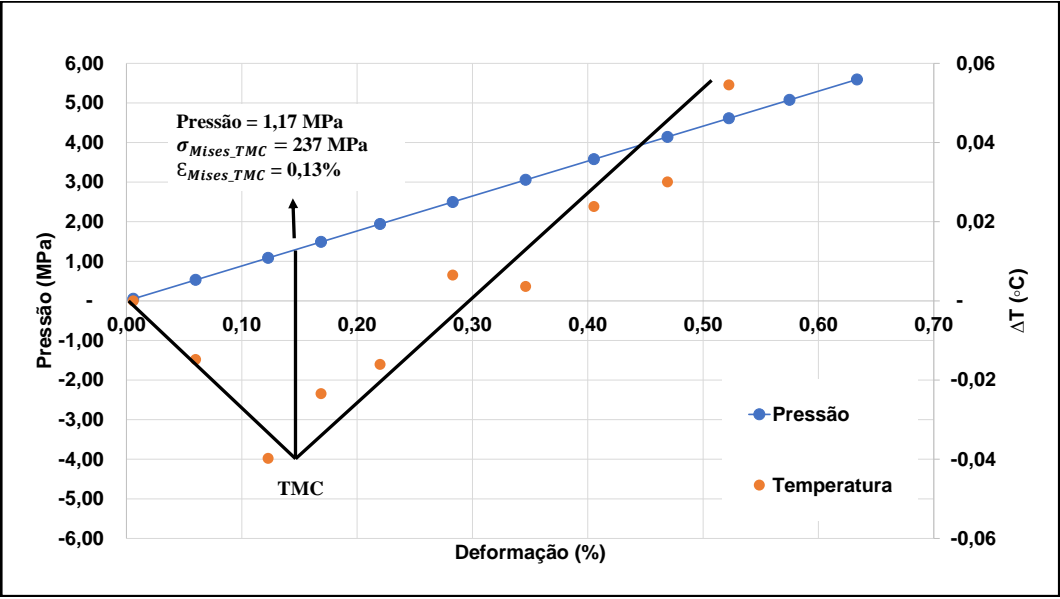


Figura I.2: Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Espécime 9, ponto E. Segundo método para determinação do ponto da TMC.

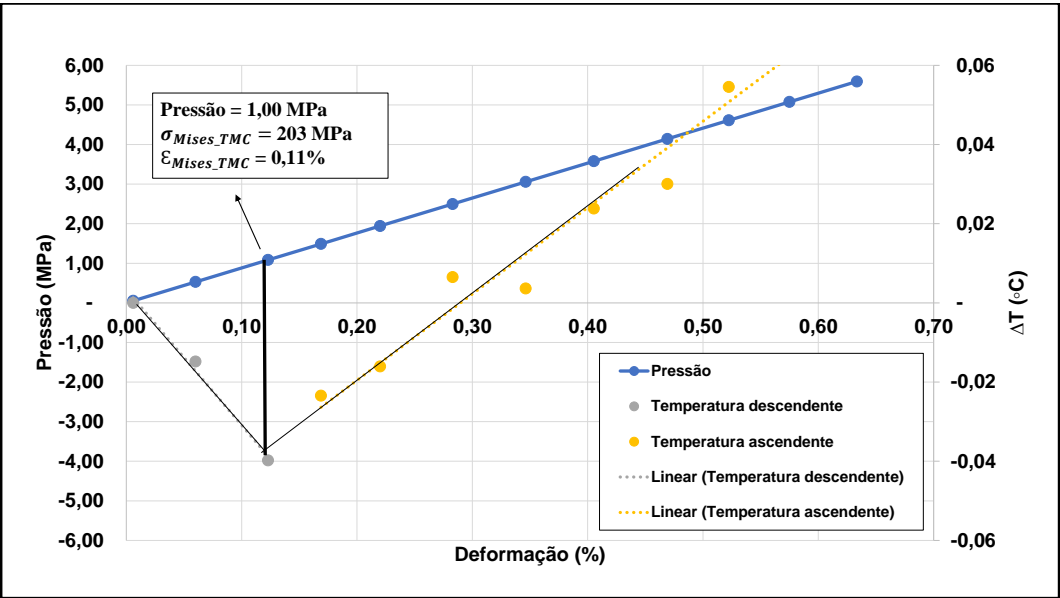


Figura I.3: Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Espécime 9, ponto E. Terceiro método para determinação do ponto da TMC.

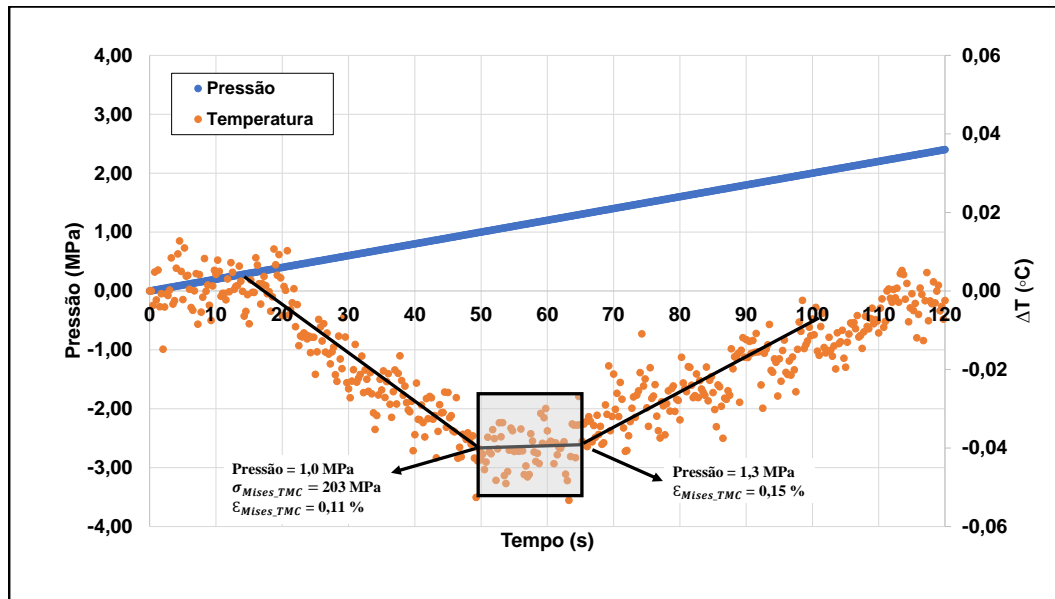


Figura I.4: Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Espécime 9, ponto *E*. Determinação da ZTMC.

I.2
Gráfico das deformações em função da pressão. Espécime 9. Ponto E.

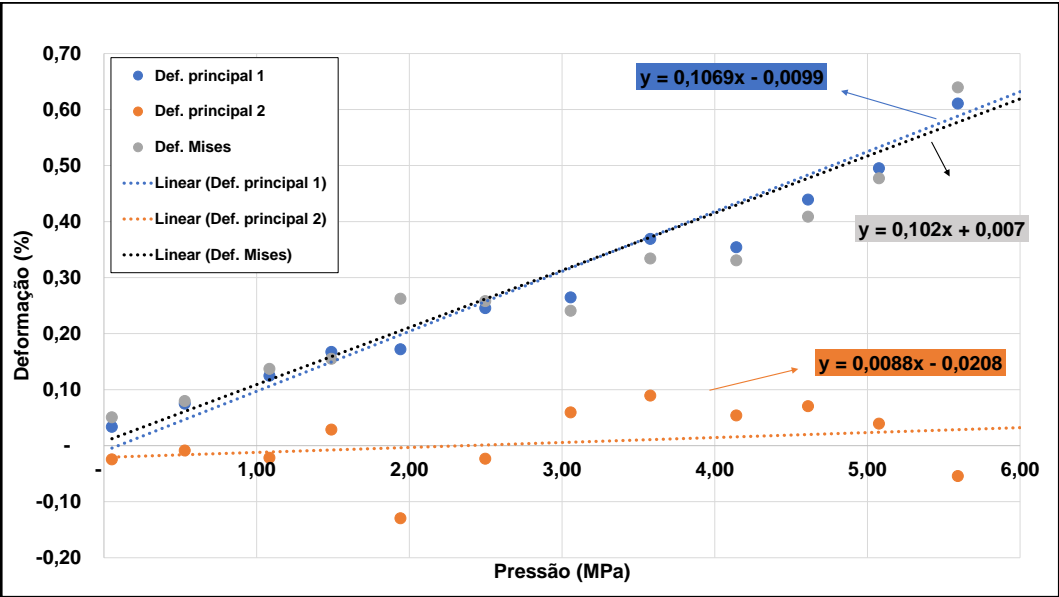


Figura I.5: Gráfico das deformações ε_1 , ε_2 e ε_{Mises} em função da pressão. Espécime 9, ponto E.

I.3
Determinações do ponto da TMC e da ZTMC. Espécime 9. Ponto F.

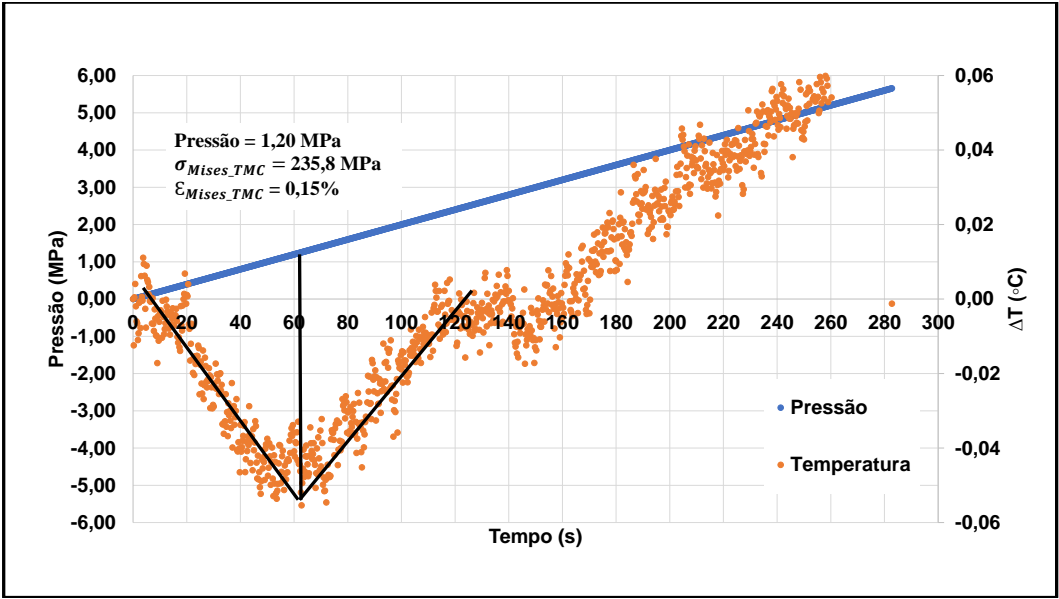


Figura I.6: Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Espécime 9, ponto F. Primeiro método para determinação do ponto da TMC.

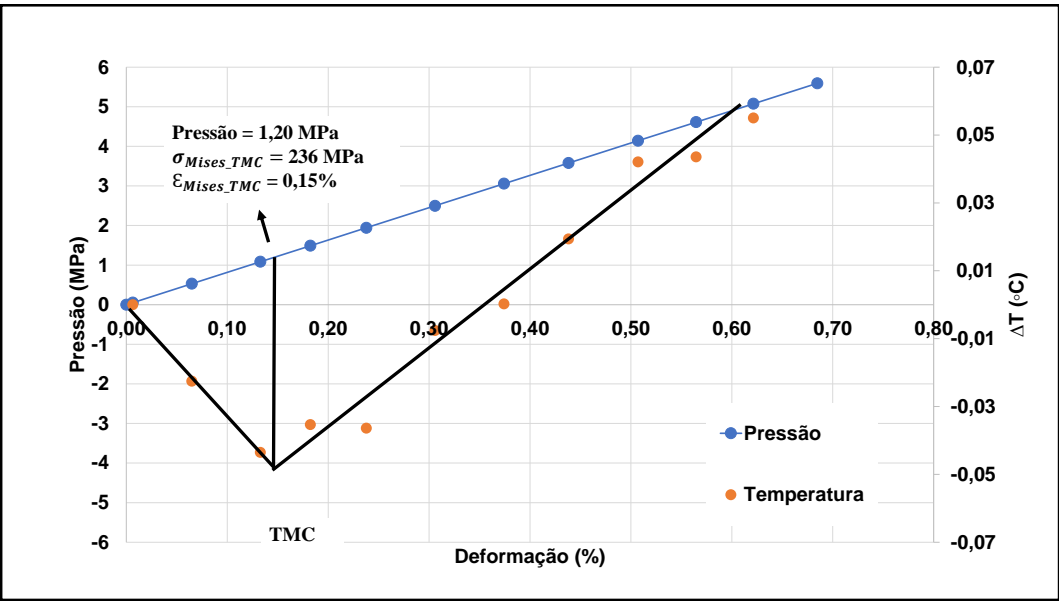


Figura I.7: Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Espécime 9, ponto F. Segundo método para determinação do ponto da TMC.

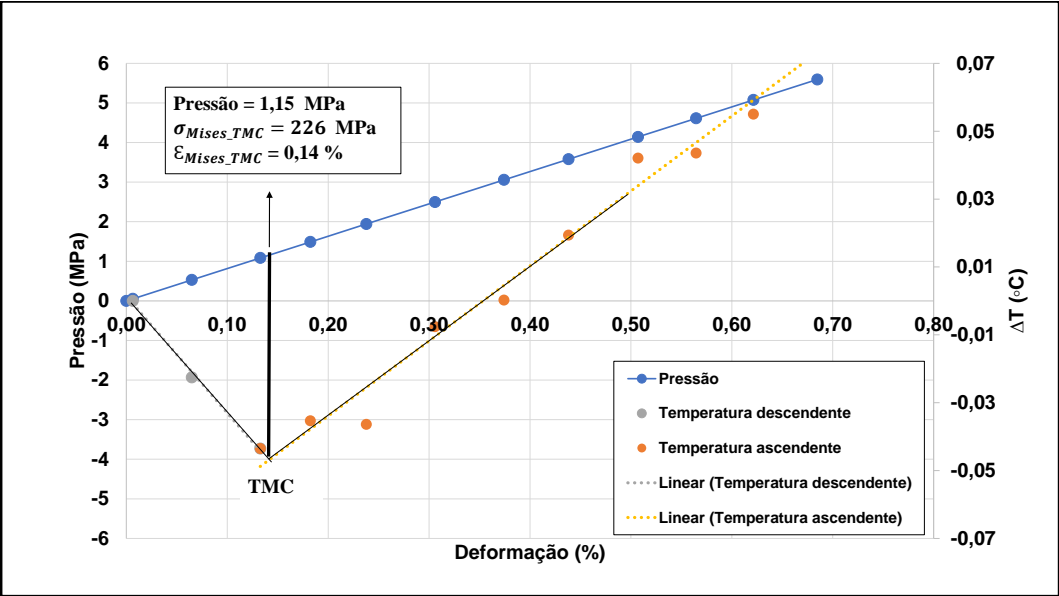


Figura I.8: Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Espécime 9, ponto F. Terceiro método para determinação do ponto da TMC.

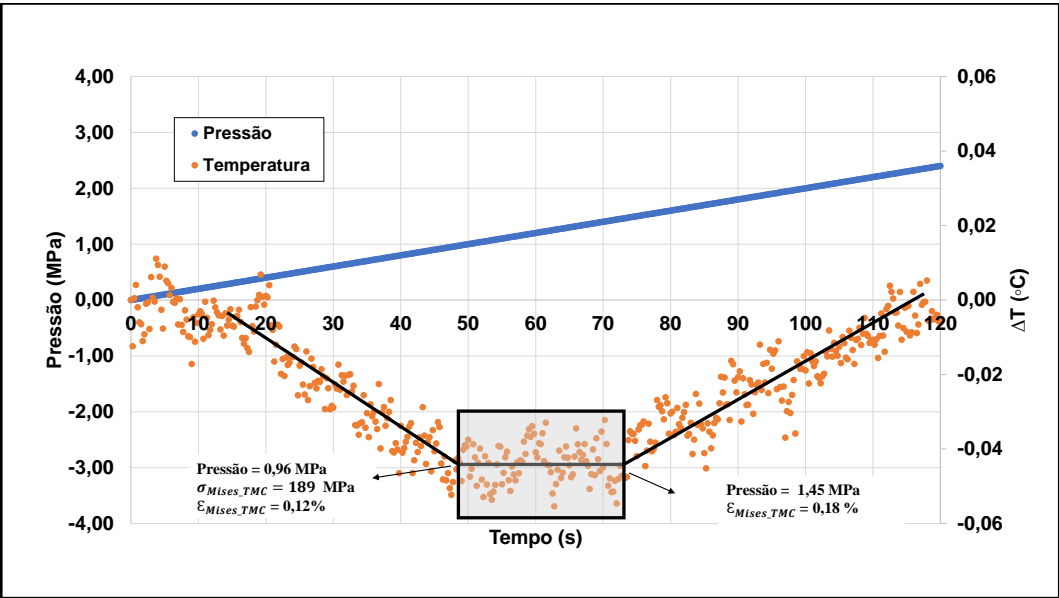


Figura I.9: Gráfico da pressão e temperatura em função do tempo. Espécime 9, ponto F. Determinação da ZTMC

I.4
Gráfico das deformações em função da pressão. Espécime 9. Ponto F.

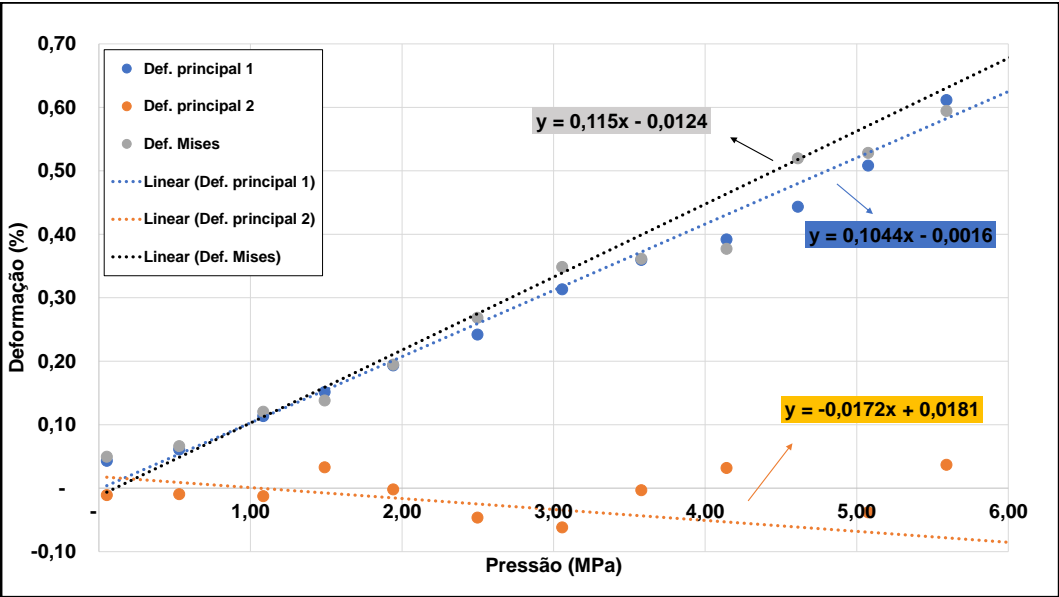


Figura I.10: Gráfico das deformações ε_1 , ε_2 e ε_{Mises} em função da pressão. Espécime 9, ponto F.