

TEÓFILO JACOB FREITAS E SOUZA

**CORRELAÇÃO ENTRE AS TEMPERATURAS DE TRANSIÇÃO
DÚCTIL-FRÁGIL DE CORPOS DE PROVA CONVENCIONAIS E
MINIATURIZADOS NO ENSAIO DE IMPACTO CHARPY DOS AÇOS
API 5L X65, L80 E P110**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2019

TEÓFILO JACOB FREITAS E SOUZA

**CORRELAÇÃO ENTRE AS TEMPERATURAS DE TRANSIÇÃO
DÚCTIL-FRÁGIL DE CORPOS DE PROVA CONVENCIONAIS E
MINIATURIZADOS NO ENSAIO DE IMPACTO CHARPY DOS AÇOS
API 5L X65, L80 E P110**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para obtenção do título de **bacharel em engenharia mecânica**.

Área de concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr.-Ing. Sinésio D. Franco.

UBERLÂNDIA - MG

2019

AGRADECIMENTOS

Aos meus orientadores, o professor Sinésio Domingues Franco e o engenheiro Fernando Buiatti Rodrigues por todo o conhecimento repassado que contribuiu para realização deste trabalho e para meu crescimento científico, profissional e pessoal. Em especial para o professor Sinésio, cujo trabalho desenvolveu toda a estrutura do Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste (LTAD), e que foi essencial para o sucesso deste trabalho.

À minha família, principalmente meus pais, por todo o suporte e confiança e por terem me proporcionado o melhor ambiente para traçar o caminho que me encontro hoje.

Ao engenheiro Henry Fong Hwang por todo auxílio e conselhos nessa trajetória dentro do LTAD.

Aos demais engenheiros do LTAD por todo o apoio técnico.

Aos técnicos Afrânio Vieira, Fabricio Quadros e Paulo Victor Cunha por todo o auxílio na realização dos experimentos e conhecimento técnico passado durante todos os anos em que estivemos trabalhando juntos.

Aos professores Rafael Ariza Gonçalves, Waldek Wladimir Bose Filho e Rosenda V. Arencibia por toda a ajuda e esclarecimento de dúvidas durante a realização deste trabalho.

Às técnicas administrativas Sandra Aparecida R. Silva e Thais Castro por toda a assistência durante a compra dos itens de consumo necessários para os ensaios. Além disso para a analista Joyce Antunes, pelo apoio na realização das imagens no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).

À Petrobras e ao professor Claudio Ruggieri, da Universidade de São Paulo, pela realização dos ensaios de impacto Charpy nos corpos de prova convencionais.

FREITAS E SOUZA, T. J., **Correlação entre as temperaturas de transição dúctil-frágil de corpos de prova convencionais e miniaturizados no ensaio de impacto Charpy dos aços API 5L X65, L80 e P110. 2019.** Trabalho de conclusão de curso de graduação em engenharia mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG.

Resumo

O ensaio de impacto Charpy é utilizado para determinar a resistência do material à fratura e sua temperatura de transição de um comportamento de fratura dúctil para a frágil. Em determinadas situações, a usinagem de corpos de prova convencionais não é viável, uma vez que o material pode possuir uma geometria complexa ou o componente em que se deseja fazer a análise esteja em pleno funcionamento. No sentido de evitar a parada de um equipamento ou analisar componentes de geometria complexa, corpos de prova miniaturizados são fabricados. Este trabalho objetivou correlacionar os resultados de ensaio de impacto Charpy entre corpos de prova de geometria convencional e miniaturizada, fabricados conforme as normas ISO 148 e ISO 14556, para três aços utilizados na indústria de óleo e gás. O enfoque principal deste estudo foi na correlação da temperatura de transição dúctil-frágil dos materiais. O ponto de partida para estudo do problema foi consultar os resultados de correlação obtidos por outros autores. Posteriormente, os corpos de prova foram fabricados, identificados e medidos de acordo com as orientações de normas internacionais. Finalmente, foram estabelecidos procedimentos de ensaio e de cálculo da temperatura de transição. Com a finalização do trabalho, foi possível observar que houve um decaimento da temperatura de transição entre corpos de prova convencionais e miniaturizados. Além disso, que essa variação depende essencialmente do tipo de material testado.

Palavras-chave: *Ensaio de impacto Charpy, miniCharpy, temperatura de transição dúctil-frágil, correlação.*

FREITAS E SOUZA, T. J., **Ductile-to-Brittle transition temperature correlation of conventional and miniaturized specimens for Charpy impact testing on API 5L X65, P110 and L80 steels. 2019.** Undergraduate thesis in mechanical engineering, Federal University of Uberlandia, Uberlândia-MG.

Abstract

The Charpy impact test is used to evaluate the impact fracture resistance of the material and its transition temperature from a ductile-to-brittle fracture behavior. In some situations, the manufacturing of conventional specimens is not possible since the material may have a complex geometry or the component, in which the analysis is desired, is on operation. In order to avoid stopping an equipment on operation or analyze complex geometry components, miniaturized specimens may be manufactured. This work aimed to correlate the results of Charpy impact test between conventional and miniaturized specimens, manufactured in accordance with ISO 148 and ISO 14556, for three steels used in the oil and gas industry. The main focus of this study was on the correlation of ductile-to-brittle transition temperatures of the materials. The starting point of this study was a review of the results from previous authors. Subsequently, the specimens were manufactured, identified and measured using international standards as guidelines. Finally, assay and transition temperature calculation procedures were established. Concluding the work, it was possible to observe that there was a drop in transition temperatures between conventional and miniaturized specimens. Moreover, that this variation depends essentially on the type of material tested.

Keywords: *Charpy impact test, miniCharpy, ductile-to-brittle transition temperature, correlation.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	– Esboço do equipamento para ensaio de impacto (GARCIA, 1999).	4
Figura 2.2	– Corpos de prova para ensaio de impacto Charpy (ASTM E23-18).	5
Figura 2.3	– Dimensões dos corpos de prova miniaturizados (ISO 14556:2015).	7
Figura 2.4	– Critérios de cálculo da temperatura de transição (SOUZA, 1982).	9
Figura 2.5	– Metades do espécime de impacto Charpy fraturado, ilustrando a medição da expansão lateral, dimensões A1, A2, A3 e A4 e espessura original, dimensão W (ASTM E23-18).	10
Figura 2.6	– Comportamento da temperatura de transição dúctil-frágil para aços com diferentes composições de carbono em sua microestrutura (ASM, 1990).	11
Figura 3.1	– Fotomicrografias do API 5L X65 ao longo da espessura da amostra: (a) parede externa, (b) centro e (c) parede interna (ataque químico: Nital 2% - 10 segundos); (NICOLosi, 2015).	19
Figura 3.2	– Fotomicrografias do aço L80 (ataque químico: Nital 2% - 10 segundos); (NICOLosi, 2015).	19
Figura 3.3	– Fotomicrografias do aço P110 (ataque químico: Nital 2% - 10 segundos); (NICOLosi, 2015).	20
Figura 3.4	– Posicionamento do corpo de prova em relação ao sentido de laminação dos tubos.	21
Figura 3.5	– Corpos de prova convencional e miniaturizado, para ensaio de impacto Charpy, finalizados (régua em milímetros).	22
Figura 3.6	– Entalhe do corpo de prova L80 1, representativa para os outros corpos de prova.	24
Figura 3.7	– Ângulo do entalhe para as amostras miniaturizadas de material P110.	24
Figura 3.8	– Micrometro digital equipado em sua base	25
Figura 3.9	– Paquímetro digital	25
Figura 3.10	– Medição de altura dos corpos de prova P110.	26

Figura 3.11	– Máquina de ensaio de impacto Charpy para corpos de prova convencionais, da marca PANTEC e com capacidade de 300 J. ...	27
Figura 3.12	– Máquina de ensaio de impacto Charpy para corpos de prova convencionais, da marca Tinius Olsen e com capacidade de 406 J.	28
Figura 3.13	– Máquina de ensaio de impacto miniCharpy.	29
Figura 3.14	– Corpos de prova ordenados para realização do ensaio.....	30
Figura 3.15	– Corpo de prova pronto para soldagem do termopar.	31
Figura 3.16	– Posicionamento do corpo de prova nos batentes.	32
Figura 3.17	– Posicionamento do condicionador térmico.	32
Figura 3.18	– Vista geral da superfície da fratura de um ensaio de impacto Charpy de um corpo de prova de seção 3 x 4 mm ² , indicando a região de análise escolhida.	33
Figura 3.19	– Curva de energia em função da temperatura de ensaio para diferentes aços (Lucon et al, 2015).	35
Figura 4.1	– Gráfico de Força [N] x Tempo [s] da amostra API 5L X65 15, ensaiada a 20,0°C, com fratura dúctil.	43
Figura 4.2	– Gráfico de Força [N] x Tempo [s] da amostra L80 13, ensaiada a 20,0°C, com fratura dúctil.	43
Figura 4.3	– Gráfico de Força [N] x Tempo [s] da amostra P110 11, ensaiada a 20,0°C, com fratura dúctil.	44
Figura 4.4	– Gráfico de Força [N] x Tempo [s] da amostra P110 14 (-121,0°C), representativo de resultados de fraturas na transição dúctil-frágil.	44
Figura 4.5	– Gráficos de Força [N] x Tempo [s] da amostra P110 18 (-194,8 °C), representativo de resultados de fraturas frágeis.	45
Figura 4.6	– Resultados de ensaio de impacto Charpy em função da temperatura de ensaio para o material L80 em amostras convencionais, mostrando a curva de regressão e a temperatura de transição calculada.	47

Figura 4.7	– Resultados de ensaio de impacto Charpy em função da temperatura de ensaio para o material P110 em amostras convencionais, mostrando a curva de regressão e a temperatura de transição calculada.	47
Figura 4.8	– Resultados de ensaio de impacto Charpy em função da temperatura de ensaio para o material API 5L X65 em amostras miniaturizadas, mostrando a curva de regressão e a temperatura de transição dúctil-frágil calculada.	48
Figura 4.9	– Resultados de ensaio de impacto Charpy em função da temperatura de ensaio para o material L80 em amostras miniaturizadas, mostrando a curva de regressão e a temperatura de transição dúctil-frágil calculada.	49
Figura 4.10	– Resultados de ensaio de impacto Charpy em função da temperatura de ensaio para o material P110 em amostras miniaturizadas, mostrando a curva de regressão e a temperatura de transição dúctil-frágil calculada.	50
Figura 4.11	– Imagens da fratura da amostra X65-20 ensaiada a -194,8 °C.	53
Figura 4.12	– Imagens da fratura da amostra L80-02 ensaiada a -194,8 °C.	54
Figura 4.13	– Imagens da fratura da amostra P110-18 ensaiada a -194,8 °C. .	54
Figura 4.14	– Imagens da fratura da amostra X65-22 ensaiada a -105,3 °C.	55
Figura 4.15	– Imagens da fratura da amostra L80-03 ensaiada a -88,4 °C.	56
Figura 4.16	– Imagens da fratura da amostra P110-14 ensaiada a -121,0 °C. .	56
Figura 4.17	– Imagens da fratura da amostra X65-11 ensaiada a -97,6 °C.	58
Figura 4.18	– Imagens da fratura da amostra L80-13 ensaiada a 20,0 °C.	58
Figura 4.19	– Imagens da fratura da amostra P110-04 ensaiada a -69,1 °C.	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	– Valores de temperatura de transição e USE calculadas para cada geometria (LUCON et al., 2015).	13
Tabela 2.2	– Redução das temperaturas de transição calculadas pelos diferentes métodos (energia absorvida (KV), expansão lateral (LE) e aparência da fratura (SFA)), comparando com os resultados para amostras convencionais (LUCON et al., 2015).	14
Tabela 3.1	– Composição química medida nos aços X65, L80 e P110 (% em peso).	17
Tabela 3.2	– Propriedades mecânicas obtidas através de ensaios de tração e de dureza para os aços API 5L X65, P110 e L80 (NICOLSI, 2015).	18
Tabela 3.3	– Principais dimensões dos corpos de prova Charpy convencionais e miniaturizados (ISO 148-1:2010 e ISO 14556:2015).	20
Tabela 4.1	– Resultados de energia do ensaio para corpos de prova convencionais API 5L X65.	37
Tabela 4.2	– Resultados de energia do ensaio para corpos de prova convencionais L80.	37
Tabela 4.3	– Resultados de energia do ensaio para corpos de prova convencionais P110.	37
Tabela 4.4	– Resultados de energia total do ensaio para corpos de prova miniaturizados do aço API 5L X65.	39
Tabela 4.5	– Resultados de energia total do ensaio para corpos de prova miniaturizados do aço L80.	40
Tabela 4.6	– Resultados de energia total do ensaio para corpos de prova miniaturizados do aço P110.	41
Tabela 4.7	– Resultados de temperatura de transição em amostras convencionais e miniaturizadas, bem como a redução da temperatura de transição dúctil-frágil entre ensaios.	51

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

DBTT: Ductile-to-Brittle Transition Temperature

HRC: Hardness Rockwell C

HV: Dureza Vickers

KV: Absorved Energy

LE: Lateral Expansion

LSE: Lower Shelf Energy

USE: Upper Shelf Energy

LISTA DE ABREVIATURAS

ASTM: American Society for Testing and Materials

ASM: American Society for Metals

CVN: Conventional specimens

ISO: International Organization for Standardization

KLST: Kleinstprobe specimens

LTAD: Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste

MEV: Microscópio Eletrônico de Varredura

NDT: Nil Ductility Transition

RHS: Reduced Half-Size specimens

SUMÁRIO

Capítulo 1 -	Introdução	1
Capítulo 2 -	Revisão Bibliográfica	3
2.1 -	Ensaio de Impacto Charpy	3
2.2 -	MiniTestes	5
2.3 -	Temperatura de Transição Dúctil-Frágil	7
2.4 -	Variação da temperatura de transição com a geometria do corpo de prova	11
Capítulo 3 -	Metodologia	17
3.1 -	Identificação e fabricação dos corpos de prova nas diferentes geometrias	17
3.2 -	Controle dimensional e geométrico dos corpos de prova	23
3.3 -	Procedimento para os ensaios de impacto Charpy	26
3.4 -	Análise da superfície da fratura após o ensaio de impacto	33
3.5 -	Determinação da temperatura de transição dúctil-frágil	34
Capítulo 4 -	Resultados e Discussão	36
4.1 -	Resultados dos ensaios de impacto Charpy em corpos de prova convencionais e miniaturizados	36
4.1.1 -	Corpos de prova convencionais	36
4.1.2 -	Corpos de prova miniaturizados	38
4.2 -	Curvas de energia em função da temperatura de ensaio e resultados de temperatura de transição dúctil-frágil	46
4.3 -	Correlação da temperatura de transição dúctil-frágil entre os corpos de prova convencionais e miniaturizados	51
4.4 -	Resultados da análise da superfície de fratura dos corpos de prova no MEV	52
Capítulo 5 -	Conclusões	60
Capítulo 6 -	Trabalhos Futuros	62
Capítulo 7 -	Referências Bibliográficas	63
Apêndice 01 -	Resultados da verificação dimensional dos corpos de prova convencionais	65
Apêndice 02 -	Resultados da verificação dimensional dos corpos de prova miniaturizados	68
Apêndice 03 -	Resultados da verificação dimensional do entalhe dos corpos de prova miniaturizados.	71
ANEXO 01 -	Resultados da análise da superfície da fratura dos materiais API 5L X65, P110 e L80.	75
ANEXO 02 -	Certificado de calibração do micrômetro digital.	77

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A determinação das propriedades mecânicas de um material é, na engenharia, essencial para guiar os profissionais no projeto de um componente mecânico. Dessa forma, diferentes ensaios mecânicos são realizados para obter as diversas propriedades do material, de acordo com cada necessidade específica.

Os ensaios mecânicos são divididos em duas categorias, a saber: os ensaios destrutivos, que levam à inutilização do corpo de prova após o teste, e os ensaios não destrutivos. O ensaio de impacto Charpy, um dos temas de estudo deste trabalho, é um ensaio mecânico destrutivo, realizado em amostras entalhadas.

O principal objetivo desse ensaio é correlacionar resultados do teste com fraturas ocorridas na prática, de tal sorte a se poder evitar que ocorram fraturas frágeis em componentes mecânicos em serviço. Os resultados dos ensaios são utilizados como critério de aceitação de materiais com possibilidade de ocorrerem fraturas frágeis. Os fatores essenciais para garantir esse tipo de fratura no ensaio Charpy são a alta velocidade de deformação, baixas temperaturas de ensaio e fabricação de um entalhe nos corpos de prova, produzindo um estado triaxial de tensões de tração que facilita a propagação da trinca durante o impacto.

Uma vez que a velocidade de impacto e a fabricação do entalhe nos corpos de prova é mantida constante, a variação da temperatura de ensaio resultará em uma curva de fragilização do material. Dessa forma, é possível determinar a temperatura de transição dúctil-frágil deste material, ou seja, a faixa de temperatura em que o resultado do ensaio muda de uma fratura com características dúcteis para uma fratura de características frágeis.

Uma dificuldade presente em todos os ensaios mecânicos está na fabricação dos corpos de prova. Normalmente as amostras convencionais padronizadas pelas normas internacionais e nacionais possuem dimensões desfavoráveis para determinadas situações. Alguns cenários inconvenientes são quando o componente do qual se deseja retirar um corpo de prova é pequeno ou de geometria complexa, ou em momentos que o corpo de prova deve ser retirado de um componente sem inutilizá-lo.

Pensando em uma solução para essas situações complexas, foi projetado pelo Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste (LTAD) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) um equipamento de ensaio de impacto Charpy para corpos de prova miniaturizados, denominado de MiniCharpy.

A questão envolvendo um ensaio mecânico realizado em corpos de prova miniaturizados é como comparar o resultado obtido com ensaios em corpos de prova com dimensões convencionais. Dados como energia de impacto e temperatura de transição dúctil-frágil do material, obtidos pelo ensaio Charpy, devem ser comparados entre os corpos de prova de dimensões diferentes (miniaturizado e convencional).

Nesse sentido, o objetivo deste trabalho é correlacionar resultados de ensaios de impacto Charpy entre corpos de prova convencionais e miniaturizados, para três materiais diferentes. Os materiais utilizados neste estudo foram os aços API 5L X65, L80 e P110, geralmente utilizados na indústria de óleo e gás para fabricação de dutos.

A correlação da temperatura de transição dúctil-frágil para os três aços entre corpos de prova convencionais e miniaturizados é o principal resultado deste estudo. Os resultados de correlação serão comparados com resultados de outros autores. O conceito de temperatura de transição, assim como os meios de cálculo dessa temperatura serão apresentados no decorrer do texto.

Ainda serão abordados o procedimento de fabricação dos corpos de prova convencionais e miniaturizados, o procedimento de ensaio de impacto Charpy e as formas utilizadas para correlacionar os resultados.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada a revisão bibliográfica dos principais temas de estudo necessários para o desenvolvimento deste trabalho de conclusão de curso. São abordados os seguintes tópicos: ensaio de impacto Charpy, Minitestes, temperatura de transição dúctil-frágil e a variação da temperatura de transição com a geometria do corpo de prova.

2.1 Ensaio de impacto Charpy

Um dos ensaios para a caracterização do comportamento dúctil-frágil dos materiais é feita a partir de ensaios mecânicos de impacto. Ensaio de impacto são dinâmicos, onde a carga é aplicada nos corpos de prova por meio do choque entre a amostra e da queda de um pêndulo. Os ensaios de impacto mais conhecidos são o Charpy e o Izod (GARCIA, 1999).

A principal aplicação de um ensaio de impacto refere-se à definição da transição da fratura dúctil para a frágil do material, em função da energia absorvida durante o impacto e da temperatura. Assim, vários corpos de prova são fabricados de forma que sejam realizados diferentes ensaios em diferentes temperaturas. A

Figura 2.1 exemplifica um equipamento simplificado para ensaios de impacto.

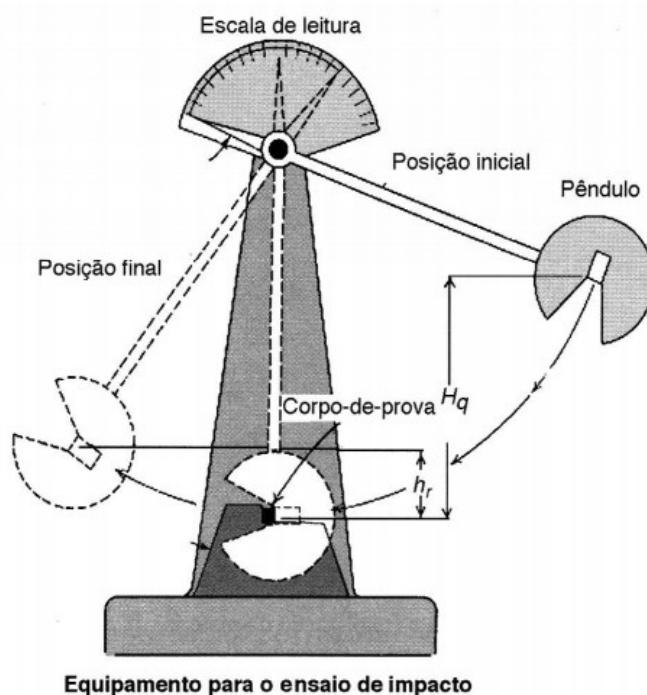


Figura 2.1 – Esboço do equipamento para ensaio de impacto (GARCIA, 1999).

Os corpos de prova para ensaio Charpy convencionais são padronizados pelas normas ASTM E23-18 e ISO 148-1 e possuem um formato de barra com seção transversal quadrada e um entalhe usinado, que concentra o local da fratura. A Figura 2.2 mostra os diferentes tipos de corpos de prova convencionais para o ensaio de impacto Charpy.

De acordo com a ASTM E23-18 (2018), a variação da geometria do entalhe depende das características do material testado. Em geral, entalhes mais precisos e mais profundos são necessários para distinguir diferenças em materiais muito dúcteis ou quando usando baixas velocidades de teste.

Segundo Souza (1982), a energia que o corpo de prova absorve durante o impacto é medida pela diferença entre a altura (ângulo) do martelo antes e após o impacto, multiplicada pelo peso do martelo em seu centro de gravidade. Quanto menor for a energia absorvida pelo corpo de prova, mais frágil é o comportamento do material à solicitação dinâmica.

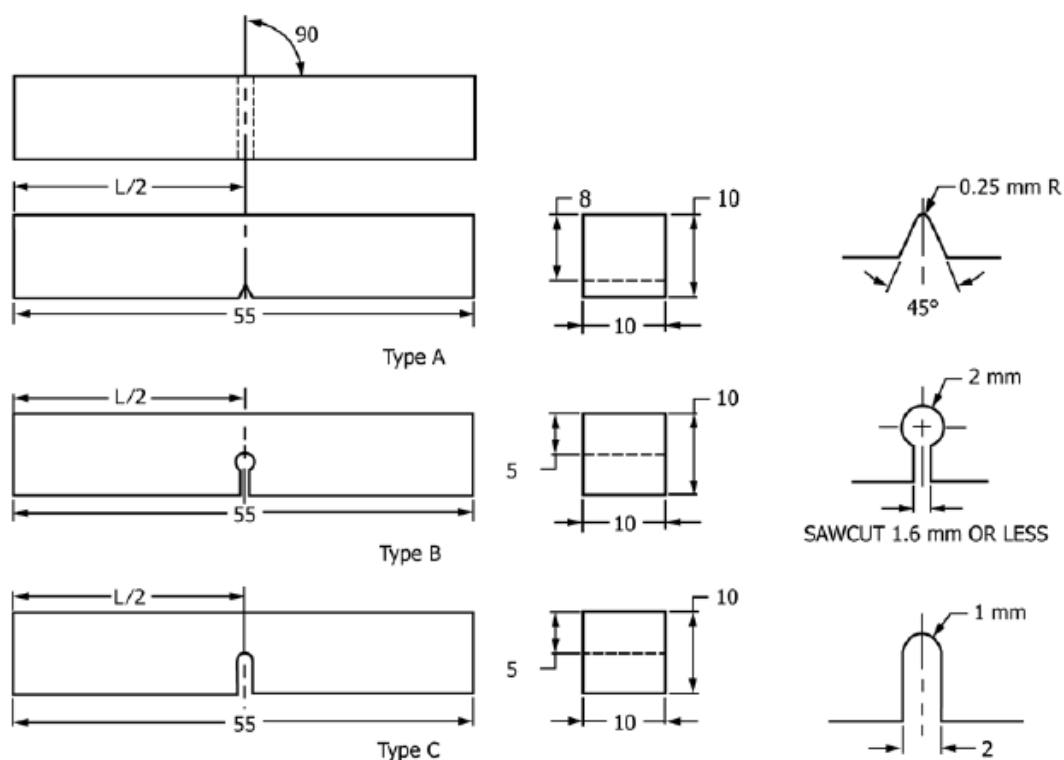


Figura 2.2 – Corpos de prova para ensaio de impacto Charpy (ASTM E23-18).

Atualmente, máquinas de ensaio instrumentadas e equipadas com *softwares* de análise calculam a energia de impacto desconsiderando perdas por atrito por rolamento do eixo e por influência do ar, durante o movimento do pêndulo. Esse tipo de estrutura proporciona medições de energia absorvida mais exatas.

2.2 MiniTestes

A realização de ensaios mecânicos convencionais requer corpos de prova com dimensões, de certa forma, inconvenientes para determinadas aplicações. Nesse sentido, amostras miniaturizadas são ensaiadas. No entanto, a dificuldade de um ensaio mecânico em escala miniaturizada está na comparação do resultado com o de escala convencional.

Corwin e Hugland (1986) avaliaram a efetividade do uso de corpos de prova miniaturizados na medição da mudança de temperatura de transição e queda de

energia de impacto, em comparação com corpos de prova Charpy convencionais, no estudo das propriedades de impacto do aço 9Cr-1Mo-V-Nb.

Segundo Kundan Kumar *et al.* (2014), a avaliação das propriedades mecânicas em corpos de prova miniaturizados é objeto de interesse entre os pesquisadores há muito tempo. A grande vantagem dessa avaliação é analisar as propriedades mecânicas de componentes em serviço, retirando apenas um pequeno volume de material que não afetará seu funcionamento.

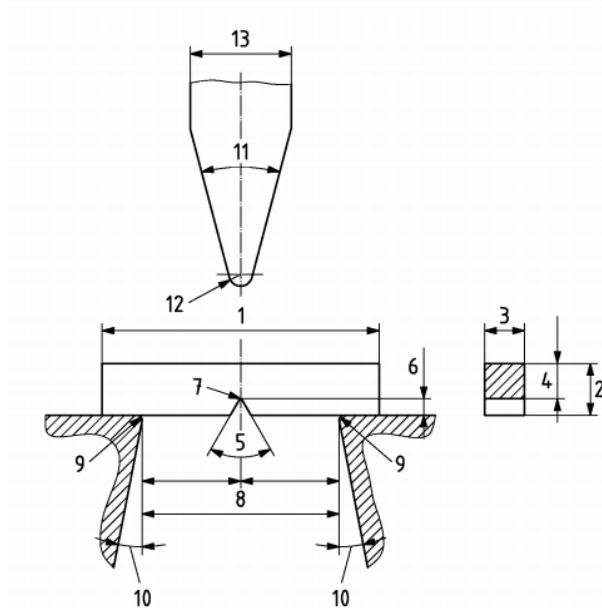
Ainda de acordo com Kundan Kumar *et al.* (2014), a redução dos corpos de prova causa o chamado “efeito de escala”, mudando o comportamento do material em comparação com ensaios em macro-escala. O “efeito de escala” é limitado pela dependência da força com a área de seção transversal disponível. Outros fatores como tamanho de grão na seção transversal, a anisotropia do material e limitações microestruturais podem mudar o comportamento do “efeito de escala”.

Tratando do ensaio de impacto Charpy, Lucon *et al.* (2015) chamam a atenção para a dificuldade prática em extrair amostras convencionais em componentes mecânicos de formas complicadas e espessuras reduzidas. Um exemplo destacado dessa dificuldade é a fabricação de corpos de prova a partir de tubos utilizados na indústria de petróleo e gás, foco de estudo desse autor. Considerando essas circunstâncias, amostras com seção reduzida são usinadas e testadas.

Pesquisadores como Loudon *et al.* (1988) e Moitra *et al.* (2017), que estudam a aplicabilidade de materiais para indústrias de energia nuclear, apontam que o uso de corpos de prova convencionais em ensaios Charpy tem custos onerosos. Portanto, amostras miniaturizadas vêm continuamente sendo utilizadas em ensaios de impacto Charpy para pesquisas destes materiais.

Atualmente, os ensaios de impacto Charpy em escala miniaturizada são padronizados pelas normas ASTM E2248-13 e ISO 14556:2015. O equipamento MiniCharpy, projetado pelo LTAD, para ensaios de impacto em amostras miniaturizadas, utiliza como referência a norma ISO 14556, para confecção dos corpos de prova. Os corpos de prova padronizados pela ISO 14556 são denominados de Kleinstprobe (KLST), ou “amostra menor”.

A Figura 2.3 indica as dimensões das amostras miniaturizadas, incluindo os valores de tolerância geométrica aceitáveis.



Número de referência	Designação	Valor
1	Comprimento da amostra	27 mm $\pm$ 0,50 mm
2	Altura da amostra	4 mm $\pm$ 0,05 mm
3	Largura da amostra	3 mm $\pm$ 0,05 mm
4	Altura abaixo do entalhe	3 mm $\pm$ 0,05 mm
5	Ângulo do entalhe	60° $\pm$ 1°
6	Profundidade do entalhe	1 mm $\pm$ 0,05 mm
7	Raio na raiz do entalhe	0,1 mm $\pm$ 0,025 mm
8	Distância entre as bigornas (span)	22 mm $\pm$ 0,10 mm
9	Raio das bigornas	1 mm $\pm$ 0,5 mm
10	Ângulo de conicidade das bigornas	11° $\pm$ 1°
11	Ângulo de conicidade do pêndulo	30° $\pm$ 1°
12	Raio na ponta do pêndulo	2 mm $\pm$ 0,5 mm
13	Largura do pêndulo	6 mm até 12 mm

Figura 2.3 – Dimensões dos corpos de prova miniaturizados (ISO 14556:2015).

2.3 Temperatura de transição dúctil-frágil

A temperatura de transição de um material, é definida pela temperatura onde há a mudança no caráter de ruptura do material, passando de dúctil para frágil. Existem vários critérios para definir a temperatura de transição. Determinar esse ponto característico do material é essencial, uma vez que só é conveniente utilizar um material em regiões de temperatura com a certeza de que fraturas frágeis não

ocorrerão (SOUZA, 1982). É possível analisar, pela Fig. 2.4, a região de transição dúctil-frágil de um material, resultado do ensaio de impacto Charpy em vários corpos de prova em temperaturas diferentes.

Ainda de acordo com Souza (1982), quando se obtém a curva de energia absorvida no impacto em função da temperatura de ensaio, são adotados pelo menos cinco critérios para calcular a temperatura de transição. A temperatura de transição (T) pode ser obtida pelos critérios apresentados a seguir e exemplificados na Fig. 2.4:

- Temperatura T1, que corresponde ao patamar superior (FTP), acima da qual a fratura obtida é 100% fibrosa. O valor da energia do patamar superior é chamado de *Upper Shelf Energy (USE)*, na norma ISO 148-1;
- Temperatura T2, onde ocorre 50% de fratura fibrosa e 50% de fratura frágil, calculada a partir da aparência da fratura;
- Temperatura T3, calculada pela média dos valores de energia dos patamares superior (fratura dúctil) e inferior (fratura frágil);
- Temperatura T4, que corresponde a um valor subjetivamente adotado de energia absorvida, próximo ao patamar inferior;
- Temperatura T5, definida pela temperatura onde a fratura resultante é totalmente cristalina, onde a deformação plástica é desprezível, e é denominada de transição de ductilidade nula, *nil ductility transition (NDT)* ou até mesmo *Lower Shelf Energy (LSE)*, na norma ISO 148-1.

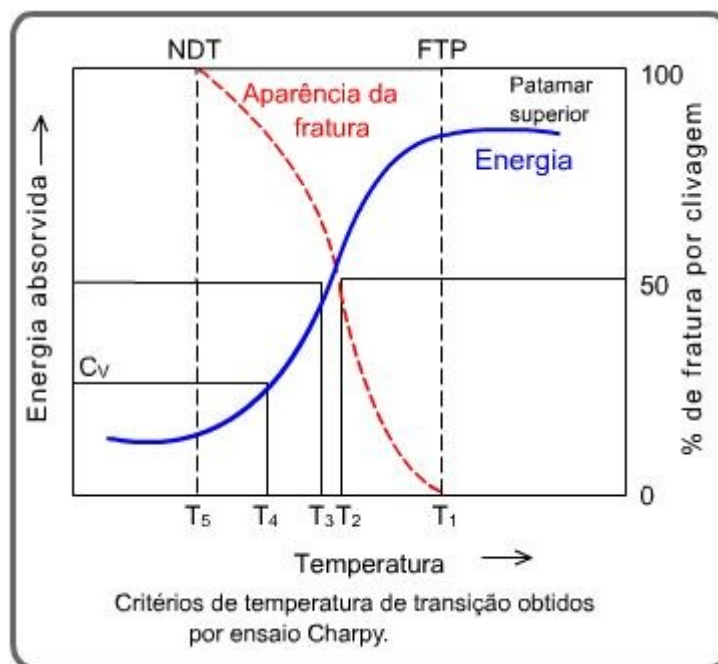


Figura 2.4 – Critérios de cálculo da temperatura de transição (SOUZA, 1982).

Além da energia absorvida durante o impacto e aparência da fratura, alguns autores, como Lucon *et al.* (2015), calculam a temperatura de transição pela expansão lateral causada no corpo de prova após o impacto. A expansão lateral, usada como medida da ductilidade do corpo de prova, é definida pelo aumento máximo da espessura da amostra como resultado do teste de impacto, expresso em mm (ASTM E23-18). A Figura 2.5 demonstra como o valor da expansão lateral do corpo de prova é obtido.

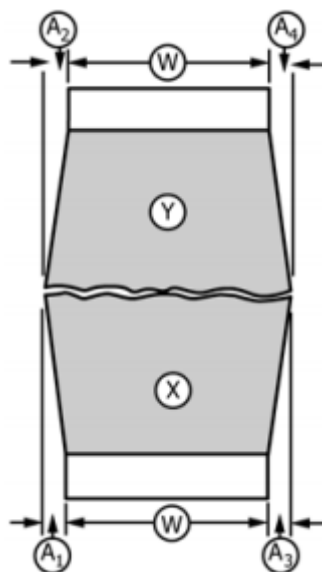


Figura 2.5 – Metades do espécime de impacto Charpy fraturado, ilustrando a medição da expansão lateral, dimensões A1, A2, A3 e A4 e espessura original, dimensão W (ASTM E23-18).

O comportamento da temperatura de transição dúctil-frágil para diferentes aços varia de acordo com suas características mecânicas como a, dureza e resistência mecânica, composição química e estrutura cristalina, além de outras variáveis como a anisotropia do material e o sentido de laminação dos corpos de prova durante a fabricação.

A variação da quantidade de carbono na composição química do aço pode mudar substancialmente sua dureza, tenacidade e resistência mecânica. De acordo com a *American Society for Metals* (1990), a temperatura de transição dúctil-frágil de um aço é deslocada para temperaturas superiores com o aumento do teor de carbono na composição química. Esse comportamento é mostrado pela Fig. 2.6. Além disso, os valores de patamares dúcteis de energia são deslocados para baixo com o aumento do teor de carbono. Isso se justifica pelo aumento da dureza e resistência mecânica do aço com a adição de carbono.

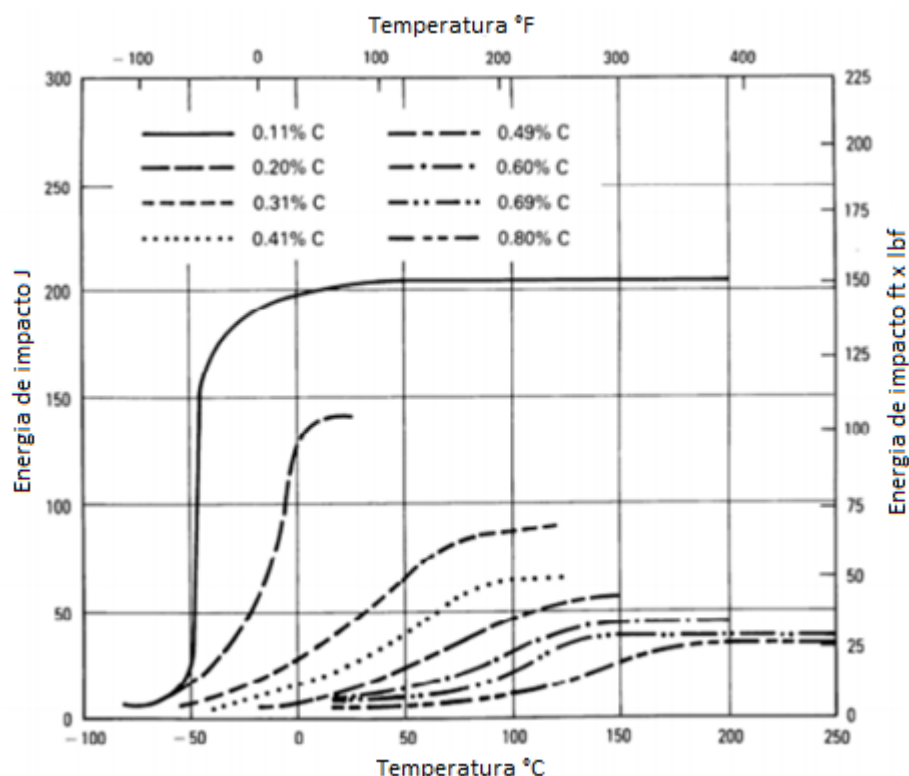


Figura 2.6 – Comportamento da temperatura de transição dúctil-frágil para aços com diferentes composições de carbono em sua microestrutura (ASM, 1990).

2.4 Variação da temperatura de transição com a geometria do corpo de prova

Em um ensaio de impacto Charpy, a variação da temperatura de transição dúctil-frágil entre testes realizados em corpos de prova miniaturizados e convencionais é uma das principais questões. Alguns pesquisadores relataram diversos resultados envolvendo a correlação entre diferentes tamanhos de corpos de prova, em ensaios Charpy.

A principal desvantagem no uso de espécimes Charpy miniaturizados é que eles produzem uma temperatura de transição dúctil-frágil menor do que o derivado de espécimes de tamanho convencionais. Isto é, em grande parte, devido a uma mudança no estado triaxial de tensões que existe no entalhe. Para espécimes convencionais, o estado de tensão é principalmente uma de deformação plana, que tende a promover a fratura frágil. Diminuir o tamanho da amostra aumenta a percentagem da secção transversal da amostra que está sob tensão plana, uma

condição que promove a falha dúctil. A mudança de dominância do estado de tensão no entalhe faz com que o material pareça ser mais dúctil a uma determinada temperatura e, portanto, diminui a temperatura de transição. Além disso, a energia absorvida em um ensaio de amostras reduzidas diminui, devido ao menor volume envolvido no processo de fratura (LOUDEN *et al.*, 1988).

Lucon *et al.* (2015) realizaram estudos de correlação entre ensaios de impacto Charpy para quatro aços denominados de *Line Pipe Steels*, utilizados na indústria de petróleo e gás. Para cada aço foram testadas diferentes combinações de geometria dos corpos de prova. As curvas de temperatura de transição, para cada geometria, foram estabelecidas através da energia absorvida durante o impacto, da expansão lateral sofrida pelo corpo de prova e da aparência da fratura por cisalhamento. Além disso, foram determinados os valores de *Upper Shelf Energy* (USE), para cada teste.

Dentre os quatro aços testados, um deles foi o API 5L X65, objeto de estudo deste trabalho. A Tabela 2.1 indica os valores de temperatura de transição encontrados por Lucon *et al.* (2015).

Segundo Lucon *et al.* (2015) foram observadas reduções na temperatura de transição, entre as amostras convencionais (CVN) e miniaturizadas (KLST), em uma faixa de -35 °C e -76 °C. No entanto, os resultados obtidos por Lucon *et al.* (2015), para o X65, foram excluídos do estudo de correlação da temperatura de transição, devido à grande diferença entre os valores calculados pelos três métodos (energia absorvida, expansão lateral e aparência da fratura).

Tabela 2.1 – Valores de temperatura de transição e USE calculadas para cada geometria (LUCON *et al.*, 2015).

Steel	Specimen type	<i>DBTT_{kv}</i> (°C)	<i>USE</i> (J)	<i>DBTT_{LE}</i> (°C)	<i>T_{50%}</i> (°C)
X52	CVN	11.7	72.6	8.4	17.8
	2/3-size	0.2	47.3	-0.8	9.0
	1/2-size	-4.3	36.0	-5.2	0.3
	KLST	-35.1	4.2	-29.6	-36.6
	RHS	-5.6	12.3	-4.8	-8.0
X65	CVN	-34.8	415.7	-75.7	-40.0
	2/3-size	-70.1	246.0	-94.6	-78.8
	1/2-size	-80.5	120.6	-102.6	-85.4
	KLST	-111.0	9.5	-110.9	-102.8
	RHS	-111.6	44.0	-114.1	-114.2
X70	CVN	-94.5	419.8	-100.3	-97.4
	2/3-size	-100.3	252.1	-104.3	-103.9
	1/2-size	-103.8	128.9	-117.2	-113.8
	KLST	-136.6	10.0	-136.2	-139.1
	RHS	-126.6	47.1	-123.5	-128.5
X100	CVN	-69.6	233.7	-74.0	-67.7
	2/3-size	-82.7	122.8	-85.2	-83.7
	1/2-size	-76.7	78.7	-78.6	-78.5
	KLST	-117.8	8.9	-115.5	-113.0
	RHS	-103.0	28.9	-103.0	-103.6

DBTT_{kv} : Temperatura de transição dúctil-frágil calculada pela energia de impacto

USE : *Upper Shelf Energy* (Energia no patamar superior da curva)

DBTT_{LE} : Temperatura de transição dúctil-frágil calculada pela expansão lateral do corpo de prova após o impacto

T_{50%} : Temperatura de transição dúctil-frágil calculada pela aparência da fratura dos corpos de prova

Excluindo os resultados de temperatura de transição do X65, Lucon *et al.* (2015) obteve um resultado médio de redução da temperatura de transição igual a -43,8 °C, entre corpos de prova convencionais e miniaturizados. A Tabela 2.2 mostra os dados de redução de temperatura de transição calculados. O autor destaca que a diferença na redução da temperatura de transição dúctil-frágil, entre ensaios em corpos de prova de diferentes geometrias, depende do material testado. Três dos quatro aços (X52 é a exceção) são microligados com Nb e Ti, o que resulta no refinamento do grão durante o processamento do aço. Os aços X65 e X70 representam materiais de ductilidade e resistência muito elevadas. Já o X100, exibe uma menor relação entre ductilidade e resistência mecânica.

Tabela 2.2 – Redução das temperaturas de transição calculadas pelos diferentes métodos (energia absorvida (*KV*), expansão lateral (*LE*) e aparência da fratura (*SFA*)), comparando com os resultados para amostras convencionais (LUCON *et al.*, 2015).

Parâmetro	Material	Geometria do corpo de prova			
		¾-size	½-size	RHS	KLST
<i>KV</i>	X52	-11.4	-16.0	-17.2	-46.7
	X65	-35.3	-45.7	-76.8	-76.2
	X70	-5.8	-9.3	-32.1	-42.2
	X100	-13.2	-7.1	-33.4	-48.2
	Média	-10.1	-10.8	-27.6	-45.7
<i>LE</i>	X52	-9.2	-13.7	-13.2	-38.1
	X65	-18.9	-26.9	-38.4	-35.2
	X70	-4.0	-16.9	-23.2	-35.9
	X100	-11.2	-4.7	-29.0	-41.5
	Média	-10.8	-15.5	-26.0	-37.7
<i>SFA</i>	X52	-8.8	-17.4	-25.8	-54.4
	X65	-38.8	-45.4	-74.2	-62.8
	X70	-6.5	-16.4	-31.1	-41.7
	X100	-16.0	-10.8	-35.9	-45.3
	Média	-17.5	-22.5	-41.7	-51.0
Média geral		-9.6	-12.5	-26.8	-43.8
DP geral		3.8	4.7	7.6	5.6

Com o objetivo de desenvolver uma equação que correlacionasse o decaimento da temperatura de transição do material a partir das dimensões do corpo de prova, Lucon *et al.* (2015) relacionou as médias de redução obtidas com o volume de fratura proporcional para cada tipo de amostra. Esse procedimento resultou na equação abaixo.

$$\Delta T = 92,7 - 14,34 * \ln(Bb^2) \text{ Equação 1}$$

Bb^2 é o volume de fratura proporcional, onde B é a altura da amostra e b é a largura da amostra retirando a profundidade do entalhe. Para corpos de prova convencionais, esse volume é igual a 640 mm³ (10 mm x 8 mm x 8 mm). Já para os corpos de prova miniaturizados, que também são utilizados neste trabalho, o volume é igual a 27 mm³ (3 mm x 3 mm x 3 mm). Utilizando o valor de 640 mm³, o resultado de ΔT é igual a zero. Utilizando 27 mm³, o valor encontrado é 45,4 °C. Ou seja, a redução da temperatura de transição entre amostras convencionais e miniaturizadas deve estar em torno de 45,4 °C. Lucon *et al.* (2015) argumenta que a equação

encontrada está de acordo com resultados de outros autores. No entanto, destaca que para alguns materiais como aços de alta resistência, o comportamento de decaimento pode variar significativamente da equação.

Ainda de acordo com Lucon *et al.* (2015), foi concluído que os aços X65 e X70 são os mais resistentes, por apresentarem menores temperaturas de transição e maiores *Upper Shelf Energies* (USE) e menores temperaturas de transição dúctil-frágil. No entanto, os resultados obtidos por Lucon *et al.* (2015), para o X65, foram excluídos do estudo de correlação da temperatura de transição, devido à grande diferença entre os valores calculados pelos três métodos (energia absorvida, expansão lateral (LE) e aparência da fratura (SFA)).

Louden *et al.* (1988), em um estudo para desenvolvimento de ligas para aplicações estruturais em reatores nucleares, realizaram ensaios de impacto Charpy em corpos de prova de diferentes geometrias. O objetivo era correlacionar a variação do tamanho da amostra com os resultados obtidos pelo ensaio.

O material utilizado neste ensaio foi um aço ferrítico 12Cr-1Mo-VW, designado por HT-9, tratado termicamente e com dureza de 23HRC. Foram testadas amostras na geometria convencional, com metade e, posteriormente, com um terço da geometria convencional. Os corpos de prova com um terço do tamanho convencional tinham as dimensões 3,3 x 3,3 x 23,6 mm³ e entalhe em formato de “V”. A diferença da temperatura de transição dúctil-frágil calculada, entre os corpos de prova convencionais e de um terço, foi de -62 °C (LOUDEN *et al.*, 1988 p. 664).

Corwin e Hugland (1986), outros pesquisadores da aplicabilidade de materiais em reatores nucleares, examinaram os efeitos de fragilização pela irradiação de nêutrons sobre o aço ferrítico de alto teor de cromo 9Cr-1Mo-V-Nb, temperado e normalizado, que é um candidato para a primeira parede de reatores de fusão. Eles concluíram que deveriam limitar severamente o tamanho dos espécimes para acomodar os corpos de prova em reatores de teste de irradiação de alto fluxo, que estavam disponíveis. Espécimes de impacto com seções transversais de 3,3 x 3,3 x 23,6 mm³ foram comparados com os corpos de prova tamanho padrão de ensaio Charpy. Dessa forma, ao realizar ensaios em corpos de prova miniaturizados sob efeito da irradiação de nêutrons, teriam dados de comparação já realizados em amostras sem a irradiação prévia.

Em outro trabalho, foram usinados corpos de prova pela orientação transversal e longitudinal da chapa do aço escolhido. O salto de temperatura de transição dúctil-

frágil calculado mais alto, entre as duas orientações de usinagem, foi a transversal. Entre os ensaios em amostras convencionais e miniaturizadas houve um decaimento de -44 °C na temperatura de transição (CORWIN E HUGLAND, 1986).

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentado o procedimento utilizado na realização dos experimentos deste estudo. As etapas do procedimento experimental foram as seguintes: identificar e fabricar os corpos de prova nas diferentes geometrias, efetuar o controle dimensional das amostras, realizar os ensaios de impacto Charpy na escala convencional e miniaturizada, analisar a superfície da fratura e calcular a temperatura de transição dúctil-frágil para os aços API 5L X65, L80 e P110.

3.1 Identificação e fabricação dos corpos de prova nas diferentes geometrias

Os corpos de prova utilizados neste estudo foram usinados a partir de tubos confeccionados nos materiais API 5L X65, L80 e P110. Dentre as propriedades avaliadas destacam-se: a composição química, a dureza, o limite de escoamento e o limite de resistência à tração. As composições químicas para os aços deste trabalho estão indicadas na Tab. 3.1.

Tabela 3.1 – Composição química medida nos aços X65, L80 e P110 (% em peso).

	C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Mo	V	Ti	Nb	Co
X65	0,070	0,278	1,438	0,010	0,014	0,031	0,047	0,059	0,036	0,002	0,025	0,010
L80	0,266	0,231	1,077	0,010	0,015	0,022	0,307	0,055	0,003	0,022	0,001	0,006
P110	0,248	0,225	1,053	0,010	0,007	0,023	0,326	0,052	0,003	0,027	0,000	0,003

Nicolosi (2015), em um estudo a respeito da avaliação de métodos para determinação de propriedade mecânicas de aços via ensaio de macroindentação instrumentada, determinou as propriedades mecânicas dos três aços utilizados neste trabalho. A Tabela 3.2 mostra os resultados obtidos. Vale ressaltar que os corpos de prova deste trabalho foram fabricados a partir dos mesmos materiais (tubos) utilizados por Nicolosi.

Tabela 3.2 – Propriedades mecânicas obtidas através de ensaios de tração e de dureza para os aços API 5L X65, P110 e L80 (NICOLOSI, 2015).

Material	Módulo de Elasticidade (GPa)	Limite de Escoamento (MPa)	Limite de Resistência (MPa)	Dureza (HV10)
API 5L X65	207	473	561	184
L80	202	514	621	204
P110	205	857	929	290

Além da análise das propriedades mecânicas dos três aços estudados, Nicolosi (2015) avaliou a microestrutura dos materiais por meio de fotomicrografias, como mostrado pelas Figs. 3.1, 3.2 e 3.3. Destacando, portanto, microestruturas características de aços beneficiados, com o refinamento dos grãos, devido aos tratamentos térmicos utilizados na fabricação dos tubos.

Apesar de Nicolosi (2015) destacar em sua análise uma variação da microestrutura no decorrer da espessura do tubo do aço API 5L X65 (Fig. 3.1), um dos processos de fresamento, utilizado na fabricação dos corpos de prova deste estudo retirou a espessura inicial e final do tubo em que ocorria essa variação. De acordo com Nicolosi (2015), a variação da microestrutura se estendia por 3 mm da espessura da parede interna e externa do tubo do aço API 5L X65. Essa variação é justificada pelas diferentes taxas de resfriamento a que o tubo é submetido durante os tratamentos térmicos executados na fabricação.

Portanto, a fotomicrografia de referência para os corpos de prova do aço API 5L X65 deste estudo foi a analisada na região central da espessura do tubo (Fig. 3.1 (b)).

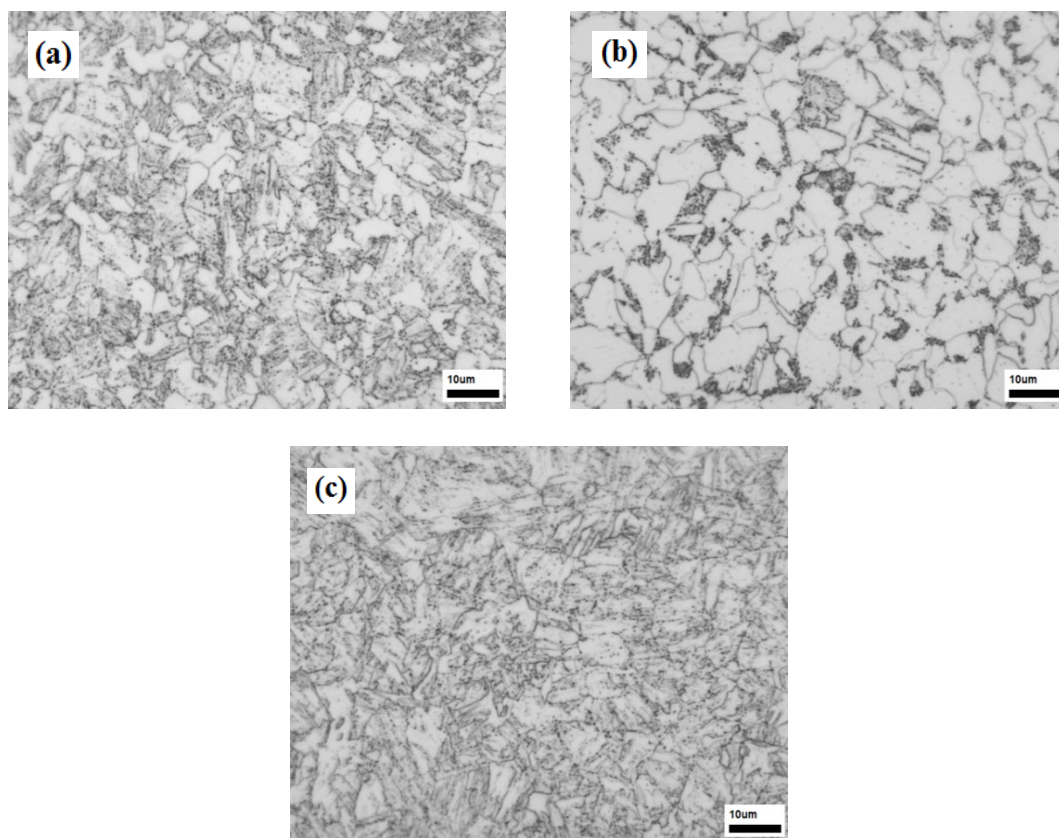


Figura 3.1 – Fotomicrografias do API 5L X65 ao longo da espessura da amostra: (a) parede externa, (b) centro e (c) parede interna (ataque químico: Nital 2% - 10 segundos); (NICOLOSI, 2015).

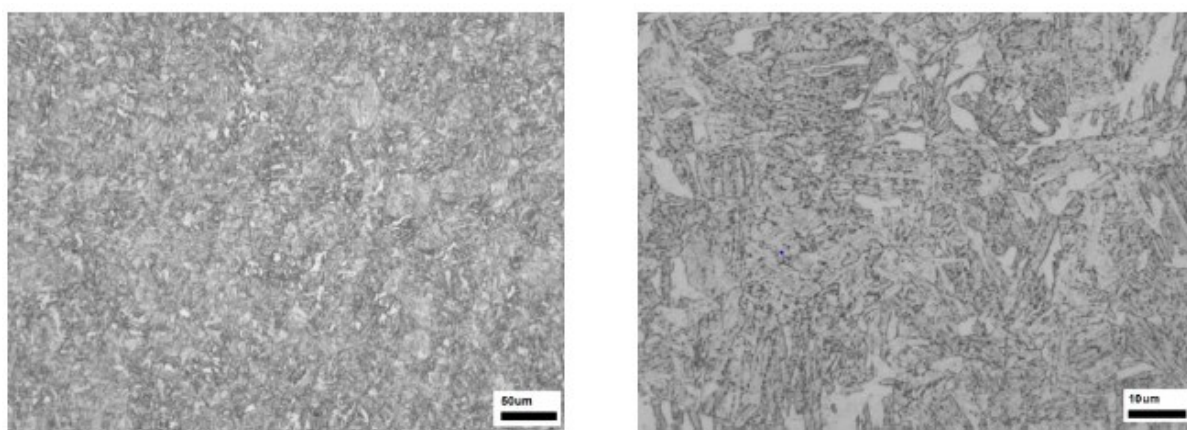


Figura 3.2 – Fotomicrografias do aço L80 (ataque químico: Nital 2% - 10 segundos); (NICOLOSI, 2015).

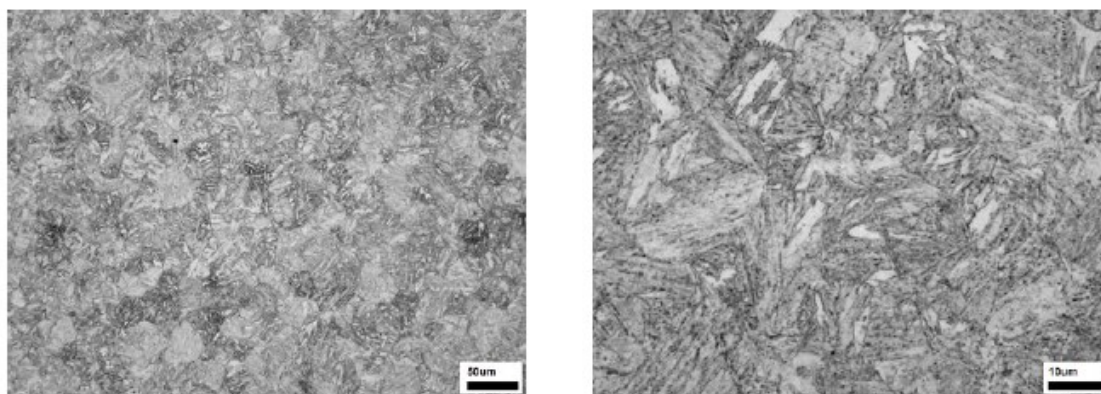


Figura 3.3 – Fotomicrografias do aço P110 (ataque químico: Nital 2% - 10 segundos); (NICOLSI, 2015).

No presente trabalho foram realizados ensaios de impacto Charpy em amostras convencionais e miniaturizadas. Os corpos de prova convencionais e miniaturizados foram fabricados em conformidade com as normas ISO 148-1:2010 e ISO 14556:2015.

A Tabela 3.3 mostra as dimensões e tolerâncias que devem ser adotadas durante a usinagem e verificação dimensional dos corpos de prova, conforme as normas citadas.

Tabela 3.3 – Principais dimensões dos corpos de prova Charpy convencionais e miniaturizados (ISO 148-1:2010 e ISO 14556:2015).

Dimensões (mm)	CP's convencionais	CP's miniaturizados
Comprimento da amostra	55,0 ± 0,6	27,0 ± 0,6
Altura da amostra	10,000 ± 0,075	4,00 ± 0,05
Largura da amostra	10,000 ± 0,075	3,00 ± 0,05
Profundidade do entalhe	2,000 ± 0,075	1,00 ± 0,05
Ângulo do entalhe	45° ± 2°	60° ± 1°
Raio da ponta do entalhe	0,250 ± 0,025	0,100 ± 0,025
Rugosidade da superfície (Ra)	< 5 µm	< 2 µm

O principal parâmetro observado durante a fabricação dos corpos de prova foi o sentido de laminação do tubo. As amostras devem sempre ser retiradas do mesmo sentido de laminação, de forma a evitar variações na microestrutura dos diferentes corpos de prova. A anisotropia do material pode gerar variações de resultado caso os corpos de prova sejam retirados de sentidos diferentes. A Fig. 3.4 mostra o posicionamento do corpo de prova em relação ao sentido de laminação dos tubos.

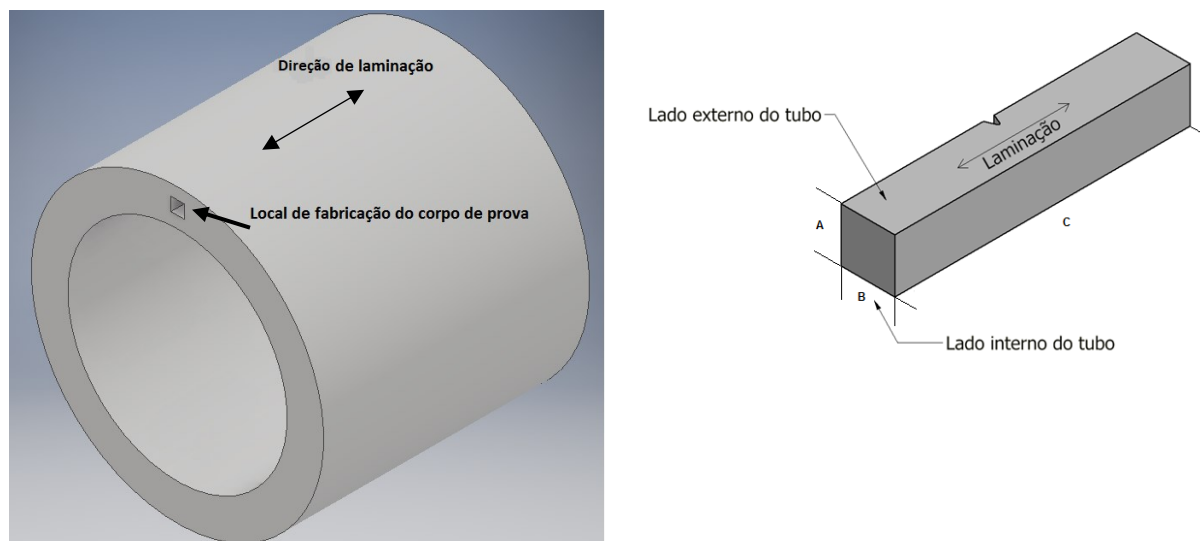


Figura 3.4 – Posicionamento do corpo de prova em relação ao sentido de laminação dos tubos.

O processo de usinagem das amostras **convencionais** seguiu as seguintes etapas:

- a) Utilizando uma esmerilhadeira com disco de corte, uma seção de material foi retirada do tubo inicial;
- b) O processo de planificação desta seção foi feito utilizando uma máquina fresadora, tendo como resultado uma barra de seção retangular com cerca de 1 mm de sobremetal;
- c) Esta barra foi levada para uma máquina de eletroerosão a fio para corte dos corpos de prova, com algum sobremetal;
- d) As amostras cortadas na eletroerosão foram levadas para uma retificadora, de forma a retirar o sobremetal e garantir a tolerância e rugosidade necessárias, conforme indicado na Tab. 3.3;
- e) O entalhe dos corpos de prova foi usinado por meio de uma brochadeira.

No procedimento de fabricação dos corpos de prova miniaturizados, a máquina de eletroerosão a fio foi utilizada para usinar as amostras já nas dimensões corretas (sem sobremetal) e usinar o entalhe.

Após a usinagem de cada amostra, foi realizada uma primeira verificação dimensional, utilizando um micrômetro. Posteriormente, o corpo de prova foi lavado em álcool etílico, utilizando um equipamento de limpeza por ultrassom. Terminada a limpeza, a amostra foi marcada na face perpendicular à face do entalhe. A Figura 3.5 mostra os corpos de prova convencional e miniaturizado, finalizados após a fabricação.

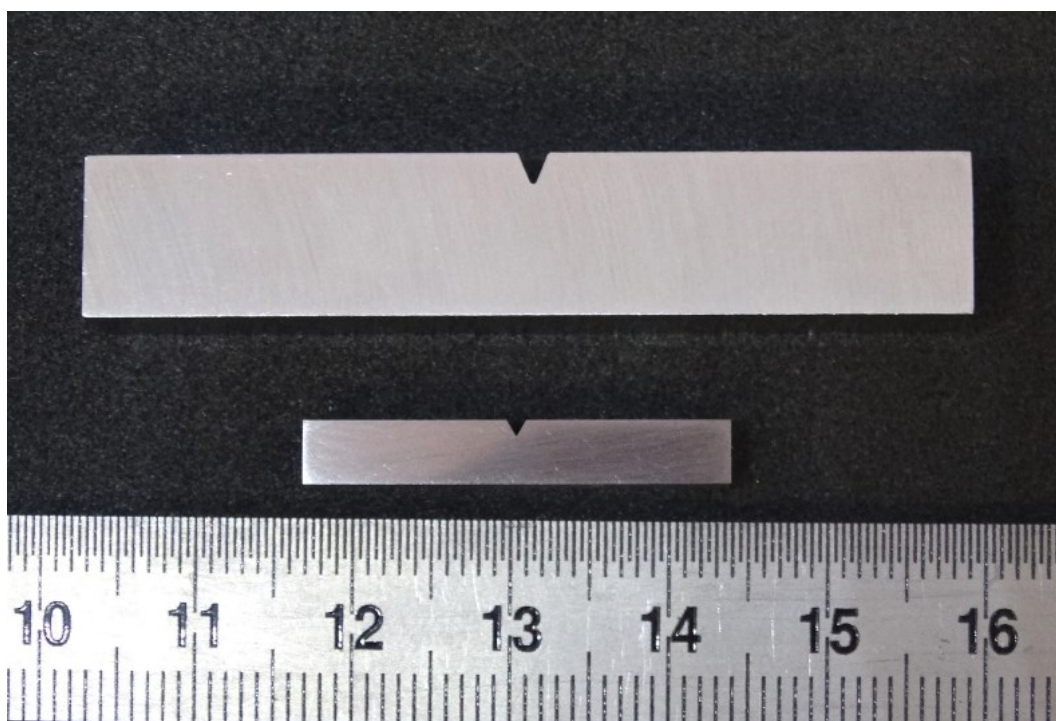


Figura 3.5 – Corpos de prova convencional e miniaturizado, para ensaio de impacto Charpy, finalizados (régua em milímetros).

Para identificação definitiva dos corpos de prova, foi utilizado um gravador engravar com uma ponta de tungstênio. A nomenclatura utilizada na marcação levou em consideração o tipo de material e a numeração da amostra.

Uma vez terminada a fabricação, os corpos de prova convencionais foram armazenados em óleo e os miniaturizados em um dessecador à vácuo, com o objetivo de inibir a oxidação do material. As amostras foram armazenadas mesmo após a finalização do experimento, evitando a formação de camadas de óxido na região da

fratura impediriam a análise da topografia no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).

Para os ensaios em amostras convencionais, foram fabricados 20 corpos de prova para o material API 5L X65 e 25 corpos de prova para os materiais L80 e P110. A quantidade de corpos de provas foi definida no intuito de realizar cinco repetições por temperatura desejada.

Nos ensaios com amostras miniaturizadas optou-se por ensaiar os corpos de prova em temperaturas diferentes para cada amostra. Assim, foram fabricados 20 corpos de prova para cada material (API 5L X65, L80 e P110), totalizando 60 amostras.

No entanto, após o término dos ensaios, foram fabricados e ensaiados oito corpos de prova adicionais do material API 5L X65, uma vez que nos primeiros ensaios foram obtidos resultados apenas na região dúctil de fratura.

3.2 Controle dimensional e geométrico dos corpos de prova

Após a fabricação dos corpos de prova, foi realizado o controle dimensional dos mesmos com o objetivo de avaliar se esses estavam dentro das tolerâncias estabelecidas pelas respectivas normas. O manuseio das amostras foi realizado utilizando luvas, de forma a se evitar a oxidação superficial. Antes de cada etapa de medição, os corpos de prova permaneceram em um ambiente com temperatura controlada de 20°C por no mínimo 4 horas, e foram limpas com um pano umedecido em álcool etílico com 99,9% de pureza.

As medições das amostras miniaturizadas foram realizadas em duas etapas. Na primeira, o entalhe de todas as amostras foi medido. A avaliação do entalhe consistiu em medir o valor do raio, da profundidade e do ângulo. Foram realizadas três medições para cada parâmetro.

O equipamento utilizado para a medição dos entalhes foi um microscópio ótico da marca Olympus, modelo BX51M, equipado com câmera Carl Zeiss AxioCam ICc5 e *software* Carl Zeiss AxioVs40 V4.8.2.

A Figura 3.6 mostra uma das imagens de entalhe registradas durante as medições, no caso, do corpo de prova L80 (material) 1.

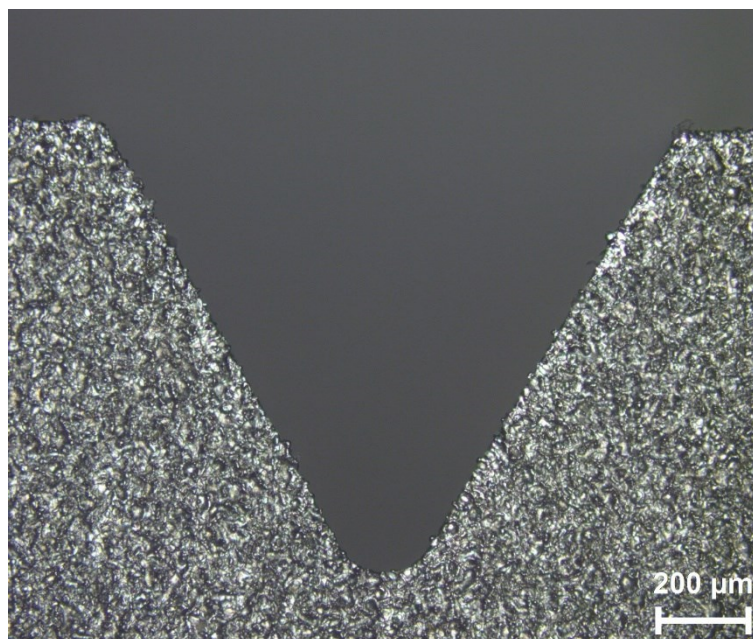


Figura 3.6 – Entalhe do corpo de prova L80 1, representativa para os outros corpos de prova.

Os resultados das medições do entalhe de cada corpo de prova miniaturizado se encontram no Anexo 03. A Fig. 3.7 ilustra um exemplo dos gráficos com medições do ângulo do entalhe dos corpos de prova para o aço P110.

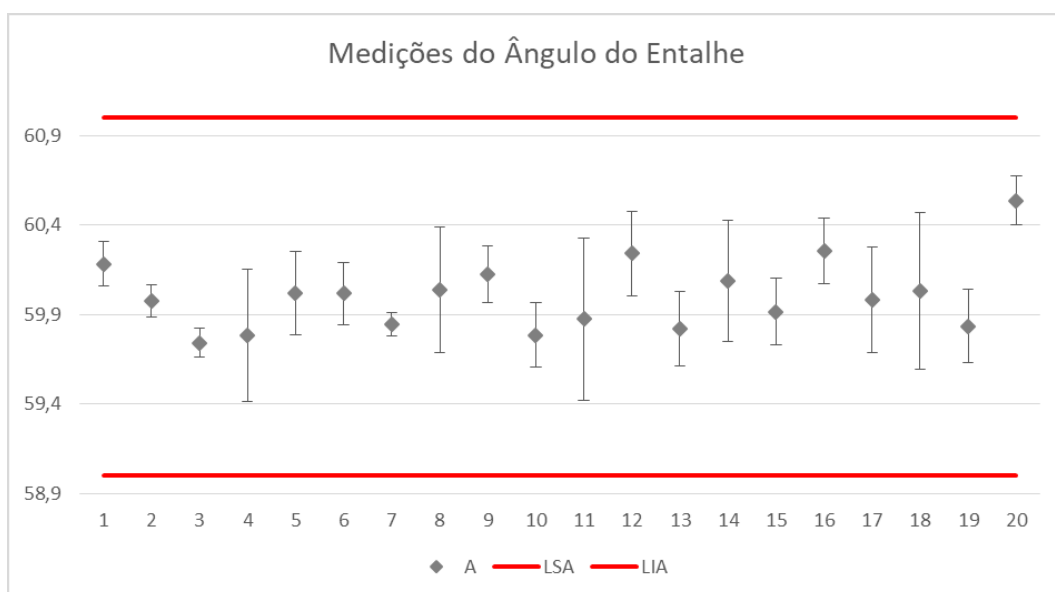


Figura 3.7 – Ângulo do entalhe para as amostras miniaturizadas de material P110.

A segunda etapa do procedimento de medição das amostras miniaturizadas foi a verificação da seção (espessura e largura) e do comprimento dos corpos de prova. Assim como na primeira etapa, cada parâmetro foi medido três vezes.

Para a medição da altura (4 mm) e da largura (3 mm), o instrumento utilizado foi um micrometro digital com resolução de 0,001 mm, equipado com uma base para micrometros. Para o comprimento (27 mm) foi utilizado um paquímetro digital com resolução de 0,01 mm. Ambos os instrumentos de medição possuem certificados de calibração, mostrados nos Anexos 01 e 02. Os equipamentos utilizados estão ilustrados nas Figs. 3.8 e 3.9.



Figura 3.8 – Micrometro digital equipado em sua base.



Figura 3.9 – Paquímetro digital.

Os resultados da etapa de medição da seção (altura, largura e comprimento) também foram representados por gráficos que identifiquem os corpos de prova. Foram representadas as variações de medição de cada mensurando dentro da tolerância estabelecida pela norma, como ilustrado na Fig. 3.10.

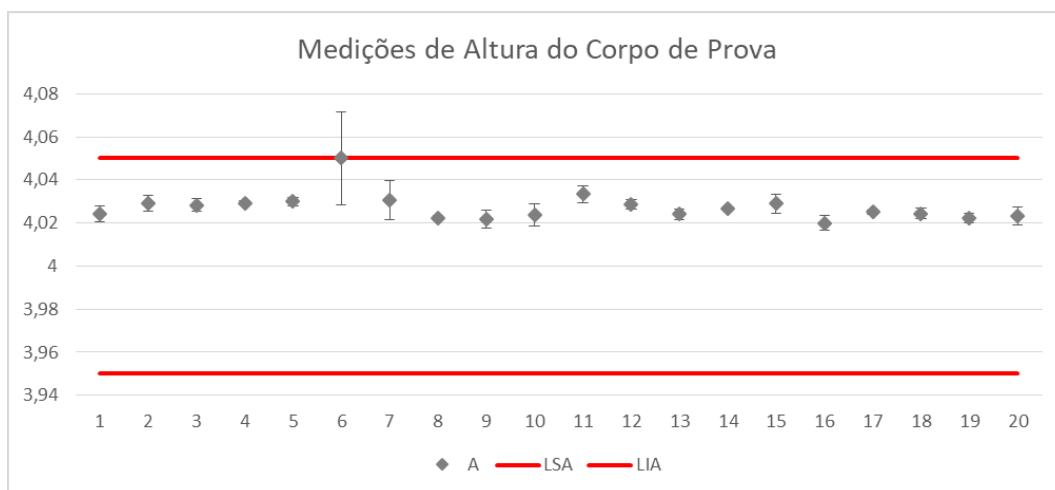


Figura 3.10 – Medição de altura dos corpos de prova P110.

O procedimento para o controle dimensional dos corpos de prova foi o mesmo, tanto para as amostras convencionais quanto para as miniaturizadas. No entanto, o entalhe das amostras convencionais não foi avaliado. Isso se deve ao fato de os resultados de ensaios em corpos de prova miniaturizados serem muito mais susceptíveis a variações com mudanças no entalhe. Dessa forma, optou-se por verificar mais precisamente os entalhes das amostras miniaturizadas.

Os resultados da avaliação dimensional da seção dos corpos de prova convencionais e miniaturizados se encontram nos Apêndices 01 e 02, respectivamente.

3.3 Procedimento para os ensaios de impacto Charpy

Os métodos de ensaio para os corpos de prova convencionais e miniaturizados possuem algumas diferenças. Primeiramente apresenta-se o procedimento de ensaio dos corpos de prova convencionais e, posteriormente, dos miniaturizados. Deve-se destacar que o principal objetivo dos experimentos é obter resultados abrangendo desde fraturas dúcteis até fraturas totalmente frágeis.

Os ensaios das amostras convencionais foram realizados em dois momentos e em equipamentos diferentes, em uma faixa de temperatura entre $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. O procedimento teve como referência a norma ISO 148-1:2010.

Para os corpos de prova do aço API 5L X65 a faixa de temperatura de ensaio foi de $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. O equipamento utilizado foi um pêndulo de impacto analógico, com acionamento manual, da marca PANTEC. As características técnicas principais deste equipamento são uma energia máxima de impacto de 300 J, ângulo de ensaio de 140° , resolução de escala de 2 J e velocidade de impacto de 5,3 m/s. A Fig. 3.11 mostra o equipamento utilizado nos ensaios dos corpos de prova do aço API 5L X65.



Figura 3.11 – Máquina de ensaio de impacto Charpy para corpos de prova convencionais, da marca PANTEC e com capacidade de 300 J.

O equipamento utilizado para os ensaios dos aços L80 e P110, mostrado na Fig. 3.12, em corpos de prova convencionais, foi um pêndulo de impacto da marca Tinius

Olsen, modelo IT 406, com capacidade máxima de 406 J e velocidade de impacto de 5,5 m/s. A faixa de temperatura dos ensaios nesses aços foi de -80 °C a 20 °C.

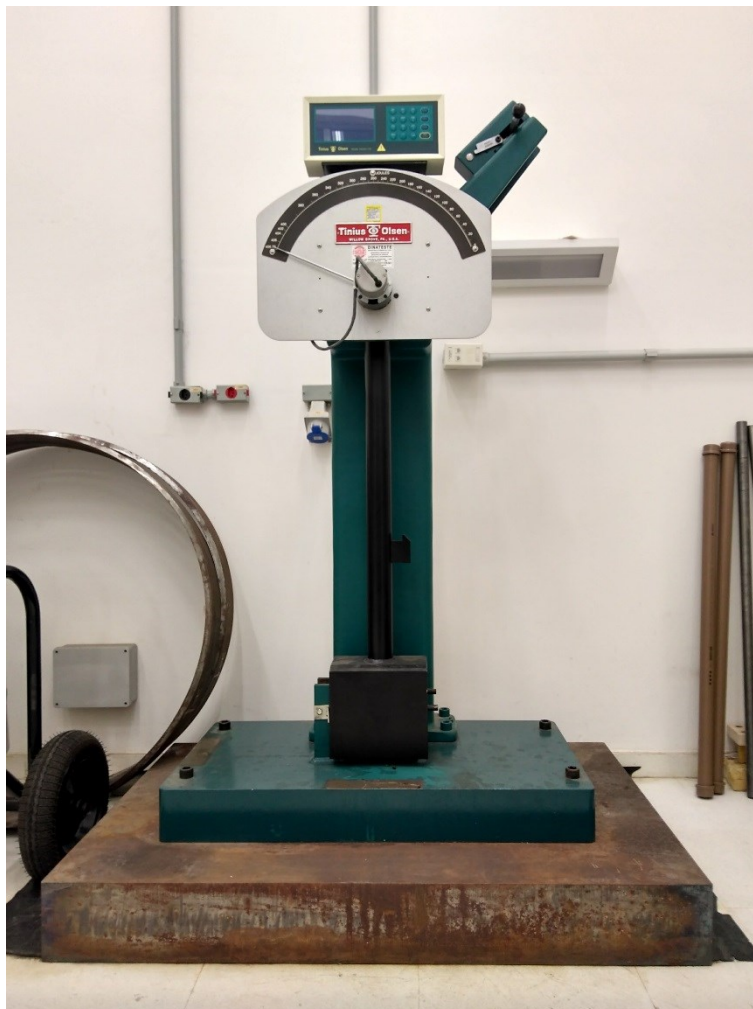


Figura 3.12 – Máquina de ensaio de impacto Charpy para corpos de prova convencionais, da marca Tinius Olsen e com capacidade de 406 J.

De forma a controlar a temperatura de ensaio desejada, os corpos de prova foram imersos em banhos de álcool etílico, condicionados à temperatura necessária. Como exigido pela norma ISO 148-1:2010, as amostras foram imersas durante cinco minutos, estabilizando por completo a temperatura do material.

O intervalo de tempo entre a transferência da amostra do banho para os batentes e a realização do ensaio não excedeu cinco segundos, seguindo as orientações da norma. Além disso, a pinça utilizada para transferir o corpo de prova foi resfriada junto com o mesmo. Dessa forma, perdas excessivas de temperatura da amostra foram evitadas.

Após o impacto, foi feita a leitura e registro da energia absorvida pela amostra durante o ensaio. O procedimento se repetiu para os outros corpos de prova.

Os ensaios das amostras miniaturizadas abrangeram temperaturas entre -196 °C e 20 °C e tiveram como referência a norma ISO 14556:2015. De acordo com referências na literatura como Lucon *et al.* (2015), essa faixa de temperatura seria suficiente para obter uma curva de transição dúctil-frágil para os materiais testados (corpos de prova miniaturizados).

A máquina de ensaio de impacto utilizada foi projetada pelo LTAD, denominada de MiniCharpy, modelo MCY-DE-000-01-B, é mostrada na Fig. 3.13. A energia potencial inicial de disparo corresponde a 14,1 J, e a velocidade de impacto de 3,2 m/s. Esse é um equipamento totalmente instrumentado, sendo possível medir, além da energia necessária à fratura do corpo de prova, variações de velocidade durante o impacto, ângulos inicial e final, e força em função do tempo ou do deslocamento (deformação) durante o impacto.

Os certificados de calibração dos três equipamentos de ensaio de impacto Charpy se encontram em relatório interno do Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste (LTAD).



Figura 3.13 – Máquina de ensaio de impacto miniCharpy.

O controle de temperatura foi feito usando um condicionador térmico, projetado pelo LTAD. Esse condicionador utiliza gás nitrogênio e nitrogênio líquido, criando um fluxo de vapor de nitrogênio sobre a amostra. Neste experimento, para todas as amostras dos três diferentes materiais, foram utilizados um cilindro de 50 litros de gás nitrogênio a 200 bar, com uma pureza 5.0 (99,999% de N₂), e 60 litros de nitrogênio líquido.

O procedimento de ensaio se iniciou com o posicionamento das amostras identificadas e limpas, de forma organizada, como demonstrado na Fig. 3.14, representativa para todos os ensaios realizados em corpos de prova miniaturizados.

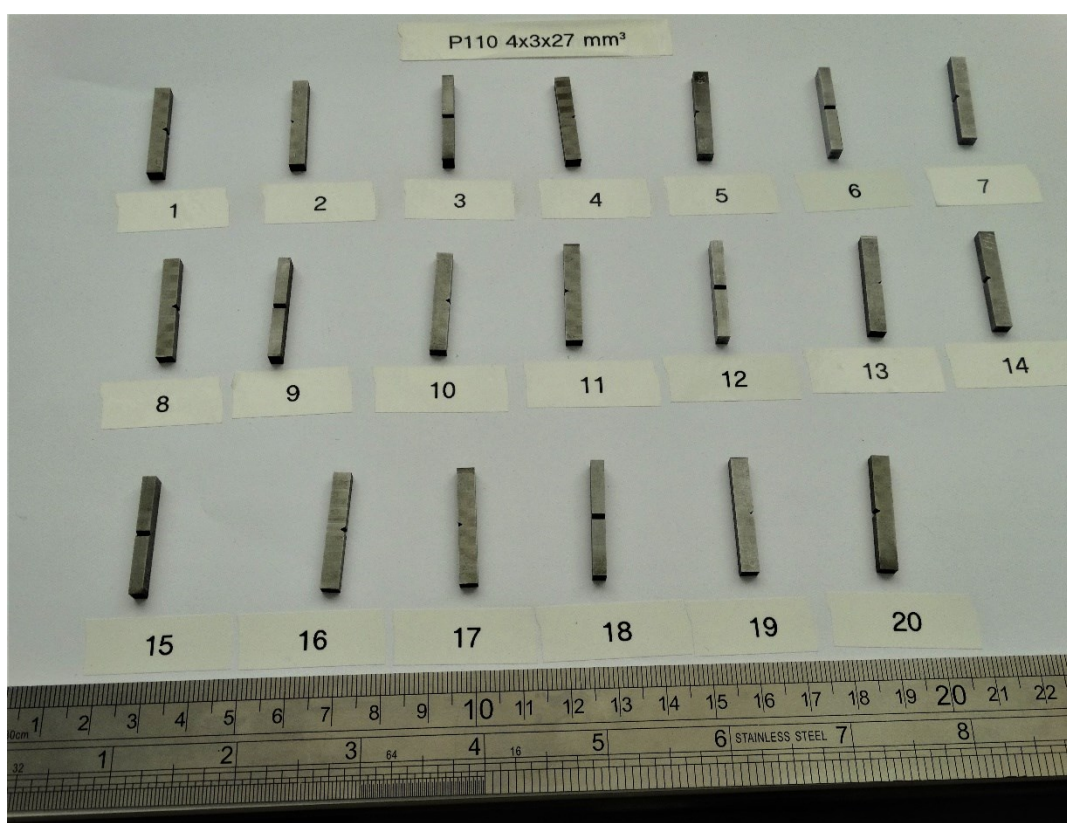


Figura 3.14 – Corpos de prova ordenados para realização do ensaio nos corpos de prova miniaturizados do aço P110.

O condicionador térmico é equipado com dois sensores de temperatura PT100 posicionados próximo às amostras, e têm o objetivo de medir em tempo real a temperatura do ambiente onde o corpo de prova está condicionado. No entanto, uma vez que os sensores não estão em contato direto com a amostra, as leituras podem ser diferentes da temperatura real do corpo de prova. Assim, foram soldados termopares AWG-30 do tipo K no centro de cada amostra, próximo à região do

entalhe, destacado pela Fig. 3.15. O método de soldagem de um termopar próximo a região do entalhe, com o objetivo de obter localmente a temperatura do corpo de prova, também foi utilizado por outros autores como Lucon *et al.* (2015) em seus ensaios de impacto Charpy.

Os equipamentos utilizados para soldagem do termopar foram uma fonte, capacitor e cabos para fechamento do circuito. O procedimento de soldagem do termopar é ilustrado pela Fig. 3.15.

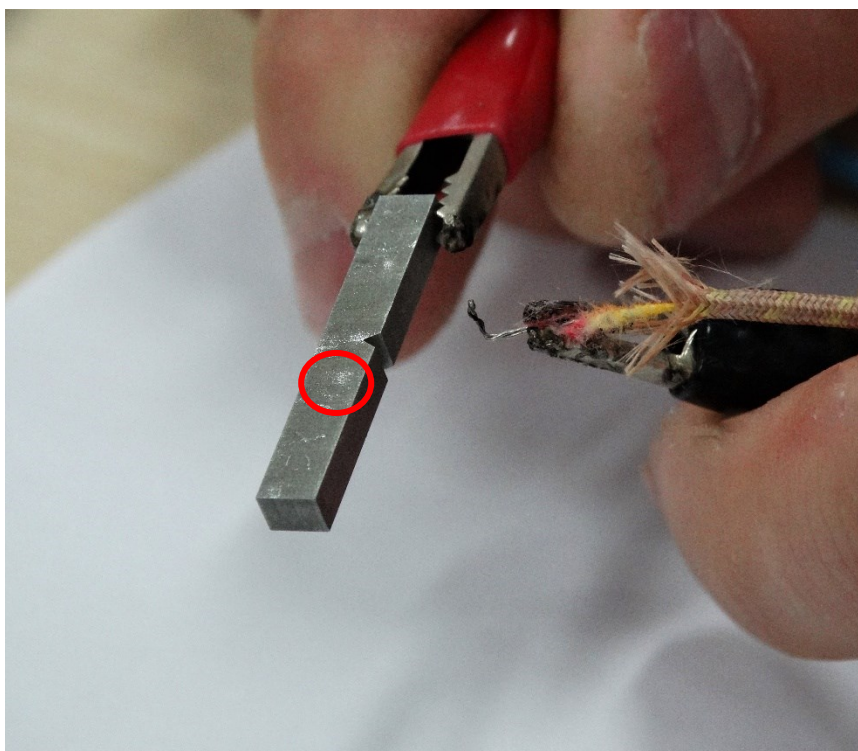


Figura 3.15 – Corpo de prova pronto para soldagem do termopar.

Finalizada a soldagem do termopar, a próxima etapa foi o posicionamento da amostra nos batentes e do condicionador térmico. Um centralizador específico para este equipamento foi fabricado e utilizado para centralizar os corpos de prova nos batentes, como mostrado pela Fig. 3.16.

Foram tomadas precauções para se evitar que a amostra saísse do lugar devido ao peso do cabo do termopar. A Figura 3.16 ilustra o procedimento para centrar o corpo de prova e, a Fig. 3.17, para posicionar o condicionador térmico.

Uma vez posicionada a amostra, o ensaio de impacto da amostra era realizado. A temperatura desejada para a amostra foi obtida controlando a vazão de vapor de nitrogênio no condicionador, destacado na Fig. 3.17. Com a estabilização da

temperatura, o ensaio foi acionado pelo software da máquina, o condicionador térmico desce, posiciona a amostra nos batentes (Fig. 3.17) e o pêndulo é liberado para o impacto.

Os valores de energia absorvida pelo impacto, assim como dados de força máxima do ensaio e gráficos de força em função do tempo de ensaio, que serão apresentados neste trabalho são obtidos pelo programa do equipamento. Todos os resultados foram armazenados para futuras avaliações.

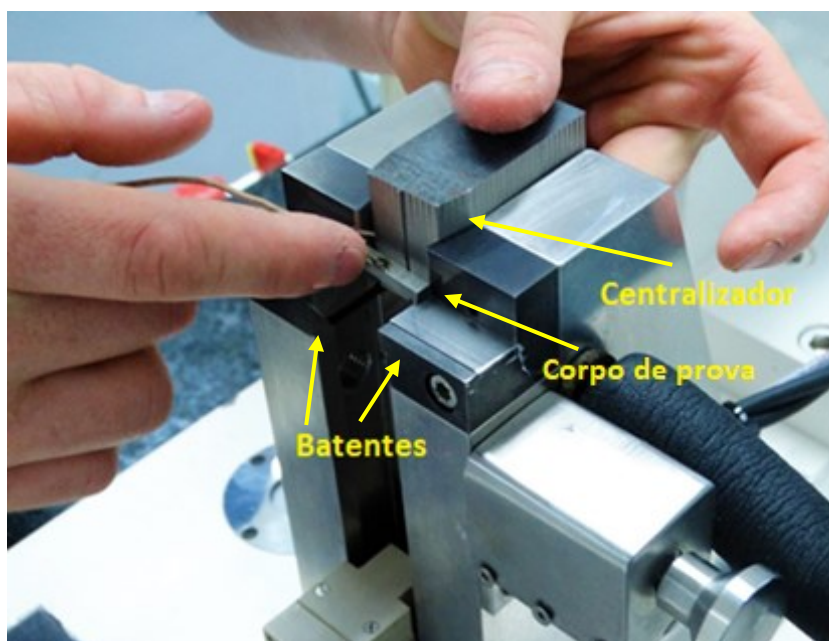


Figura 3.16 – Posicionamento do corpo de prova nos batentes.

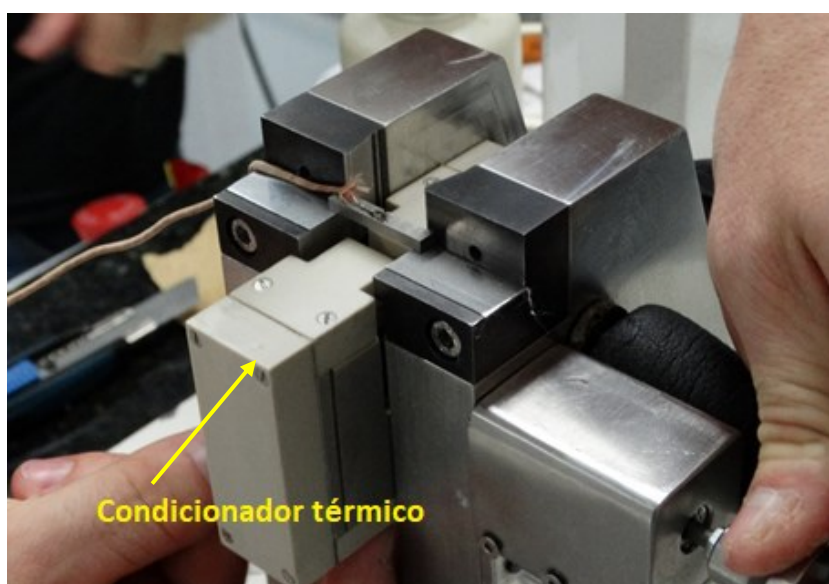


Figura 3.17 – Posicionamento do condicionador térmico.

3.4 Análise da superfície da fratura após o ensaio de impacto

A análise da superfície da fratura do corpo de prova, após o ensaio, teve o objetivo de caracterizar o comportamento dos materiais testados em diferentes condições de temperatura de ensaio. Dessa forma, foram analisados três corpos de prova de cada material (API 5L X65, L80 e P110). As amostras foram escolhidas a partir das curvas de energia em função da temperatura de ensaio, nas regiões de fratura totalmente dúctil, totalmente frágil e de transição dúctil-frágil. Apenas os corpos de prova miniaturizados foram analisados, uma vez que não houve a possibilidade, até o fim deste trabalho, de analisar os corpos de prova convencionais.

O MEV utilizado nessa análise foi um microscópio da marca Zeiss, modelo Supra 40, do tipo FEG, equipado com análise de energia dispersiva de raios-X (EDS).

O procedimento de preparação consistiu em separar as amostras a partir dos resultados já obtidos, lavar as amostras usando um ultrassom por 15 minutos. As análises da superfície da fratura se concentraram no centro dos corpos de prova, como indicado pela Fig. 3.18.



Figura 3.18 – Vista geral da superfície da fratura de um ensaio de impacto Charpy de um corpo de prova de seção 3 x 4 mm², indicando a região de análise escolhida.

Para cada corpo de prova, foram realizadas imagens com ampliações entre 500 e 10 000 X, além de uma vista geral da fratura, como mostrado pela Figura 3.18. O objetivo de utilizar ampliações de até 10 000 X foi identificar a fratura frágil em corpos de prova que estavam na região de transição dúctil-frágil.

3.5 Determinação da temperatura de transição dúctil-frágil

A temperatura de transição dúctil-frágil de cada material foi determinada levando-se em consideração a energia total absorvida durante o ensaio. Dentre as definições da temperatura de transição, como abordado por Souza (1982), optou-se por utilizar a região média entre os patamares superior e inferior das curvas de energia em função da temperatura, resultante dos ensaios.

Dessa forma, foi calculada, a temperatura na qual o material responde de forma 50% dúctil e 50% frágil, durante o impacto. Este método foi utilizado em estudos de correlação como os realizados por Lucon *et al.* (2015). A Figura 3.19 mostra os resultados de energia de impacto em função da temperatura obtidos por Lucon *et al.* (2015), para quatro aços diferentes, nos ensaios em corpos de prova convencionais.

O tratamento dos dados de ensaio foi feito por meio de um programa matemático, onde os dados de energia em função da temperatura de ensaio foram analisados por meio de uma curva de regressão exponencial logística, com o objetivo de identificar as regiões dos patamares superior, inferior e de transição dúctil-frágil (ver Fig. 3.19).

Uma vez obtida a curva do ensaio de energia de impacto em função da temperatura, o cálculo da temperatura de transição se deu a partir do ponto de inflexão da curva de regressão. Ou seja, o ponto de mudança da concavidade da curva e que, teoricamente, está no centro da região de transição entre os patamares superior e inferior. O ponto de inflexão foi calculado pela segunda derivada da função da curva de ensaio obtida, no zero da função da segunda derivada.

Com o objetivo de validar a análise por meio de uma curva de regressão exponencial logística, resultados como os obtidos por Lucon *et al.* (2015) foram testados utilizando esse mesmo método proposto. Comparando os resultados de temperatura de transição calculados por Lucon *et al.* (2015) e pelo método da curva exponencial, foi obtido o mesmo valor de temperatura de transição dúctil-frágil.

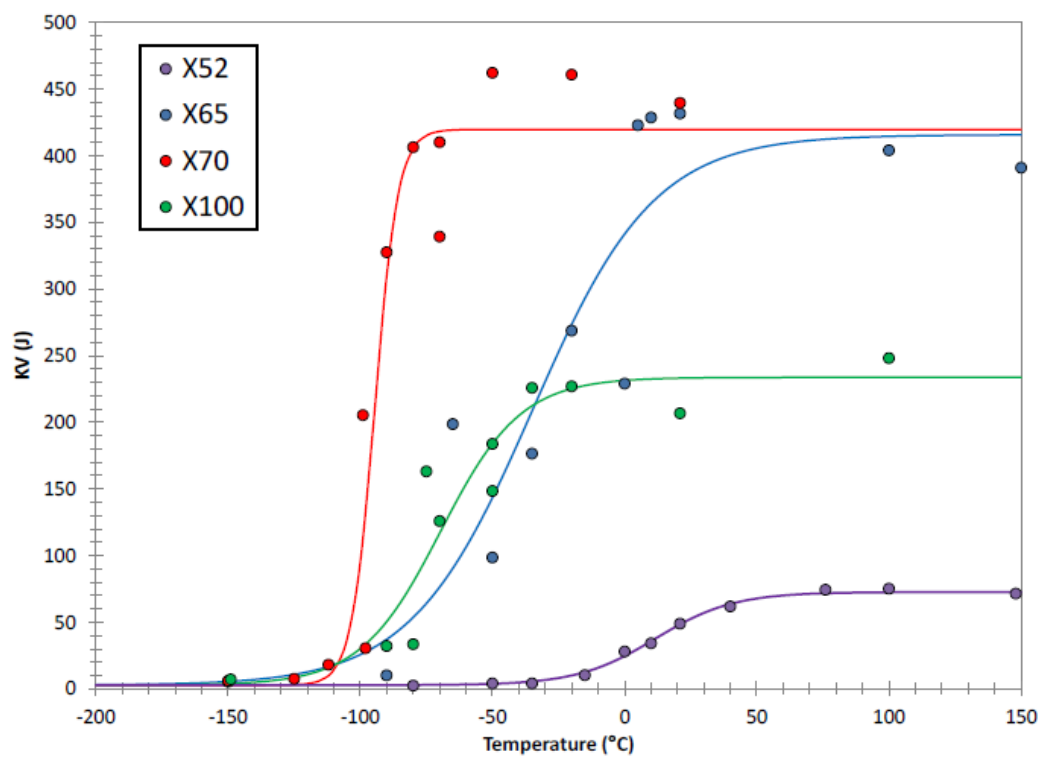


Figura 3.19 – Curva de energia em função da temperatura de ensaio para diferentes aços (Lucon *et al*, 2015).

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de impacto Charpy e miniCharpy, bem como as respectivas discussões. Dessa forma, apresentam-se inicialmente os valores de energia absorvida durante o impacto. Na sequência, são mostradas as curvas de energia em função da temperatura de ensaio e os resultados da determinação da temperatura de transição dúctil-frágil, seguidos da análise da superfície da fratura dos corpos de prova. Por fim, avalia-se a correlação entre a temperatura de transição dúctil-frágil dos corpos de prova convencionais e a dos miniaturizados.

4.1 Resultados dos ensaios de impacto Charpy em corpos de prova convencionais e miniaturizados

4.1.1 Corpos de prova convencionais.

Todos os resultados dos ensaios em corpos de prova convencionais se encontram nas Tabs. 4.1, 4.2 e 4.3. Uma vez que para cada temperatura de ensaio foram testados cinco corpos de prova, foram calculadas as médias e os respectivos desvios padrão da energia total.

Tabela 4.1 – Resultados de energia do ensaio para corpos de prova convencionais API 5L X65.

Temp. de ensaio (°C)	Energia absorvida (J)	Desvio padrão (J)
22,8	258,4	11,1
0,0	274,8	11,1
-30,0	253,8	15,9
-60,0	272,8	15,2

Tabela 4.2 – Resultados de energia do ensaio para corpos de prova convencionais L80.

Temp. de ensaio (°C)	Energia absorvida (J)	Desvio padrão (J)
22,8	222,7	4,5
0,0	212,3	4,3
-30,0	208,6	10,4
-60,0	150,9	7,4
-80,0	90,9	4,6

Tabela 4.3 – Resultados de energia do ensaio para corpos de prova convencionais P110.

Temp. de ensaio (°C)	Energia absorvida (J)	Desvio padrão (J)
22,8	155,7	4,1
0,0	155,0	1,9
-30,0	146,8	6,4
-60,0	90,3	8,4
-80,0	50,7	6,8

Para os materiais P110 e L80, observou-se uma queda esperada de energia de ensaio com a diminuição da temperatura de ensaio. No entanto, o decaimento de energia não chegou a valores característicos de fraturas totalmente frágeis, revelando a necessidade de se realizar ensaios a temperaturas ainda menores do que as utilizadas. Apesar disso, foi atingida a região de transição dúctil-frágil desses materiais, sendo possível calcular a temperatura de transição a partir da tendência da curva de regressão exponencial.

Em contrapartida, para o API 5L X65, mesmo com a diminuição da temperatura, observam-se resultados apenas na região de fratura totalmente dúctil, com valores de

energia constantes. Dessa forma, não foi possível calcular a temperatura de transição dos ensaios neste material para os corpos de prova convencionais.

Além disso, destaca-se que os valores de energia são superiores a 80% da capacidade nominal do equipamento utilizado (300 J). Portanto, seguindo as orientações da norma ISO 148-1:2010, os resultados devem ser registrados como aproximados. Dessa forma, os resultados dos ensaios em corpos de prova convencionais do aço API 5L X65 são qualitativos, utilizados neste estudo apenas para destacar que não houve transição dúctil-frágil com a diminuição da temperatura de ensaio.

Desses resultados ficou clara a necessidade de se realizar novos ensaios em corpos de prova convencionais do aço API 5L X65, em temperaturas menores que -60 °C e em um equipamento com capacidade de energia superior, como o utilizado para os ensaios dos aços L80 e P110.

4.1.2 Corpos de prova miniaturizados

Os resultados dos ensaios das amostras miniaturizadas são mostrados nas Tabs. 4.4, 4.5 e 4.6. Além da energia total do ensaio, foi registrada a força máxima aplicada no corpo de prova durante o impacto. A aquisição deste dado foi possível graças à instrumentação do equipamento. Como o experimento se baseou em realizar ensaios em temperaturas diferentes para cada amostra, as mesmas estão identificadas nas tabelas.

Um ponto importante é que, dos corpos de prova fabricados, nem todos tiveram seus resultados registrados. O mal posicionamento do corpo de prova antes do impacto foi o motivo para a invalidação de alguns ensaios, pois o impacto visualmente não havia ocorrido no centro do entalhe. Em alguns casos, o fluxo de vapor de nitrogênio retirou corpos de prova de sua posição centralizada. Para o material API 5L X65 (Tab. 4.4), apenas 24 das 28 amostras fabricadas tiveram seus dados registrados. Para o P110, todas as 20 amostras foram testadas com sucesso. Já para o aço L80, 17 das 20 amostras foram ensaiadas.

Tabela 4.4 – Resultados de energia total do ensaio para corpos de prova miniaturizados do aço API 5L X65.

Número da amostra	Temp. ensaio [°C]	Energia total [J]	Força máxima [N]
X20	-194,8	0,35	1806,9
X17	-129,6	0,93	1624,5
X22	-105,3	7,23	1552,0
X18	-105,3	10,91	1550,5
X16	-98,9	10,49	2227,3
X21	-98,8	9,75	1626,7
X05	-98,8	10,35	1467,8
X11	-97,6	10,49	1530,0
X01	-94,2	10,49	1547,6
X12	-92,8	9,98	1736,6
X02	-90,7	10,07	1584,2
X10	-84,9	10,68	1439,9
X23	-84,3	10,28	1617,2
X19	-81,9	10,70	1547,6
X03	-76,4	10,67	1423,1
X04	-70,2	10,18	1656,0
X06	-63,0	10,61	1418,7
X07	-57,2	10,50	1401,9
X08	-45,3	10,11	1974,6
X09	-42,4	10,38	1223,1
X13	-27,8	10,35	1370,4
X14	-10,4	10,21	1320,6
X27	-10,4	10,23	1517,6
X15	20,0	10,05	1147,0

Tabela 4.5 – Resultados de energia total do ensaio para corpos de prova miniaturizados do aço L80.

Número da amostra	Temp. ensaio [°C]	Energia total [J]	Força máxima [N]
L02	-194,8	0,42	1333,0
L14	-100,0	6,33	1594,5
L16	-91,5	5,32	1948,2
L03	-88,4	4,19	1819,3
L18	-83,8	8,21	2698,2
L01	-79,9	8,39	1581,3
L04	-77,2	7,78	1856,0
L05	-69,2	8,08	1757,1
L06	-62,5	8,40	1710,9
L08	-55,4	10,05	1861,8
L07	-54,9	8,47	1736,6
L09	-48,8	8,08	1576,2
L10	-38,3	8,27	1488,3
L11	-27,5	8,77	1892,6
L12	-8,1	8,76	1592,3
L15	0,0	8,30	1398,2
L13	20,0	8,62	1359,4

Tabela 4.6 – Resultados de energia total do ensaio para corpos de prova miniaturizados do aço P110.

Número da amostra	Temp. ensaio [°C]	Energia total [J]	Força máxima [N]
P18	-194,8	0,56	2080,1
P13	-130,0	2,59	1943,1
P16	-129,6	2,23	2048,6
P14	-121,0	3,66	1880,1
P17	-110,0	4,88	1946,8
P15	-95,0	6,51	1895,5
P12	-91,8	5,94	2255,1
P20	-90,0	6,48	2697,5
P02	-87,0	6,13	1912,4
P01	-80,4	7,09	1830,3
P03	-76,1	6,03	2220,7
P04	-69,8	7,22	1921,1
P19	-65,0	7,28	1868,4
P05	-62,4	6,98	2102,8
P06	-56,9	7,62	2025,1
P08	-43,2	7,75	1820,8
P07	-42,9	7,58	1888,9
P09	-28,6	7,41	1847,2
P10	-8,2	7,45	1790,8
P11	20,0	7,33	1792,2

Para todos os materiais testados, das tabelas anteriores, notam-se resultados nos três patamares característicos de um ensaio Charpy, ou seja, na região de transição dúctil-frágil, de fraturas totalmente dúcteis e de fraturas frágeis. Dessa forma, é possível calcular a temperatura de transição dúctil-frágil para todos os materiais a partir da curva de regressão exponencial. Esse assunto é tratado na seção seguinte.

Para o aço API 5L X65 (Tab. 4.4), nota-se que os valores de energia se mantiveram constantes, na região de fraturas dúcteis, até temperaturas de ensaio da ordem de -105 °C. No entanto, para os ensaios restantes, observa-se que a queda de energia, a partir de temperaturas abaixo de -100 °C (ensaio do corpo de prova X18), foi muito sensível com a diminuição da temperatura. Dessa forma, observou-se que a região de transição dúctil-frágil do material API 5L X65 é menor, comparando com os resultados nos aços L80 (Tab. 4.5) e P110 (Tab. 4.6).

Os valores de energia deste experimento se assemelham aos resultados de Lucon *et al.* (2015) para o API 5L X65, que obteve valores em torno de 9,5 J para o patamar de fratura dúctil ou *Upper Shelf Energy (USE)*. Além disso, o autor também observou que o decaimento de energia se inicia na região de temperatura de -100 °C.

Já para o material P110, tem-se valores de energia no patamar de fratura dúctil em torno de 7,4 J (Tab. 4.6), ou seja, trata-se aqui de um material menos resistente ao impacto que o API 5L X65 à temperatura ambiente. Em contrapartida, o decaimento de energia em função da temperatura é mais suave, de forma que o material possui uma região de transição maior que a do aço API 5L X65.

Para o aço L80 foram obtidos resultados de energia no patamar de fratura dúctil em torno de 8,3 J (Tab. 4.5), mostrando que esse é um material com resistência ao impacto intermediária em relação ao aço P110 e ao aço API 5L X65.

A instrumentação do equipamento MiniCharpy permitiu outras análises além do resultado da energia total do impacto em função da temperatura de ensaio. As Figs. 4.1, 4.2 e Figura 4.3 mostram as curvas da força no cutelo do pêndulo em função do tempo de ensaio, para os ensaios realizados em temperatura ambiente dos três aços (API 5L X65, L80 e P110). Dessa forma, foi possível observar o comportamento de aplicação da força nos corpos de prova dos diferentes materiais, na região de fratura dúctil.

Além disso, foram selecionadas curvas de corpos de prova com resultados de ensaio nas regiões de fratura frágil e de transição dúctil-frágil, do aço P110, mostradas nas Figura 4.4 e Figura 4.5. Deve-se destacar que o comportamento das curvas dos aços API 5L X65 e L80, para as regiões de fratura frágil e de transição, são análogas às apresentadas para o aço P110, variando apenas no patamar de forma máxima de ensaio. A aquisição de dados de força aplicada pelo pêndulo foi feita por meio de uma célula de carga montada no cutelo do pêndulo.

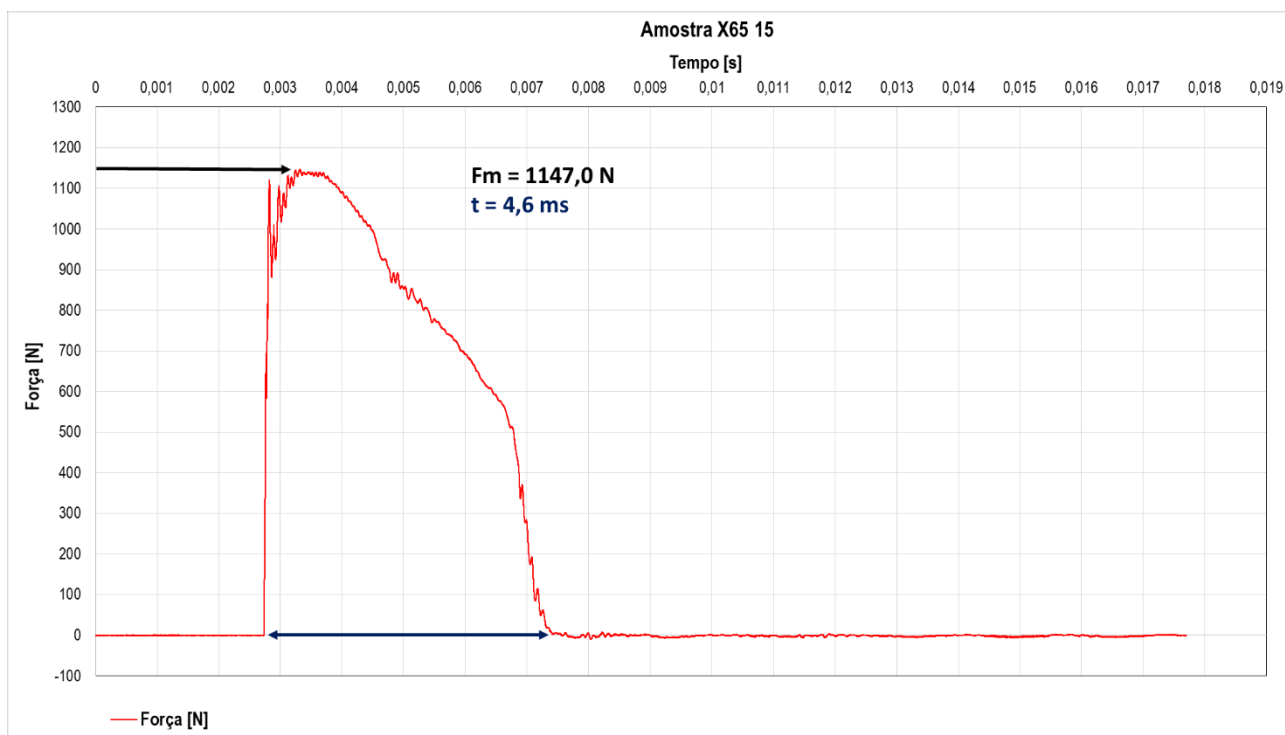


Figura 4.1 – Gráfico de Força [N] x Tempo [s] da amostra API 5L X65 15, ensaiada a 20,0°C, com fratura dúctil.

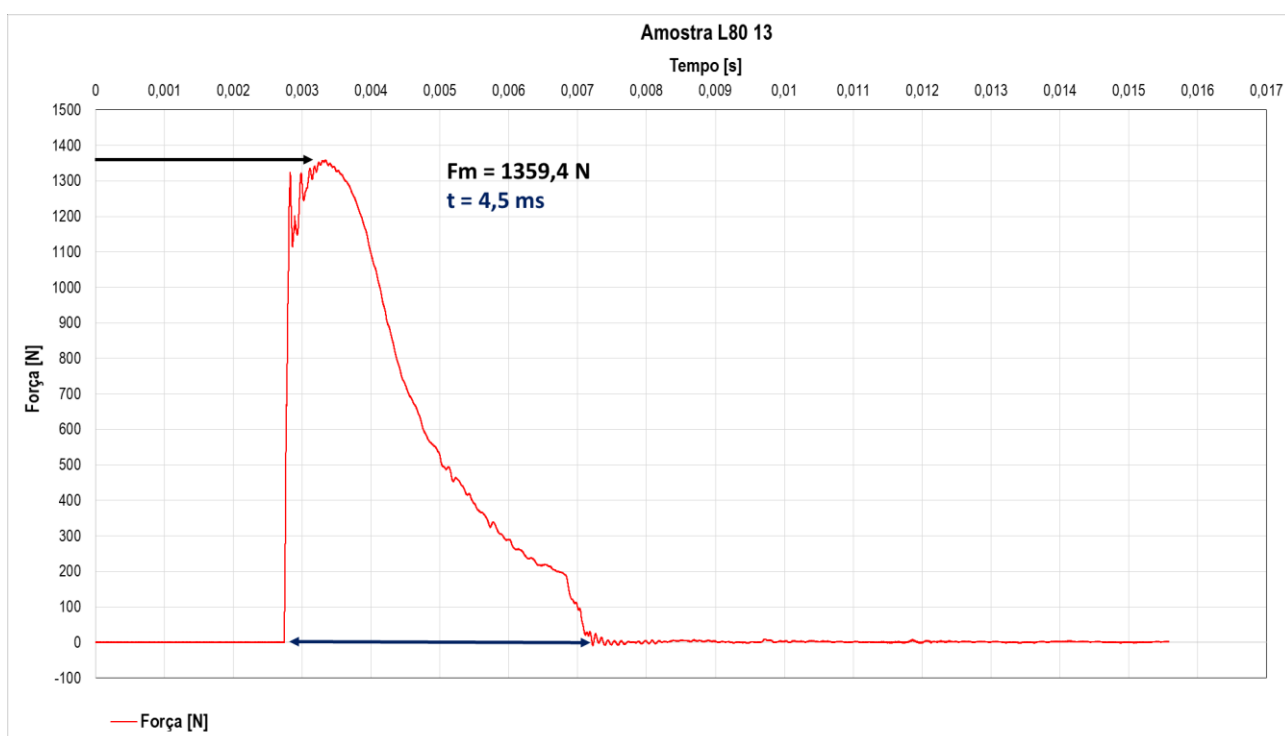


Figura 4.2 – Gráfico de Força [N] x Tempo [s] da amostra L80 13, ensaiada a 20,0°C, com fratura dúctil.

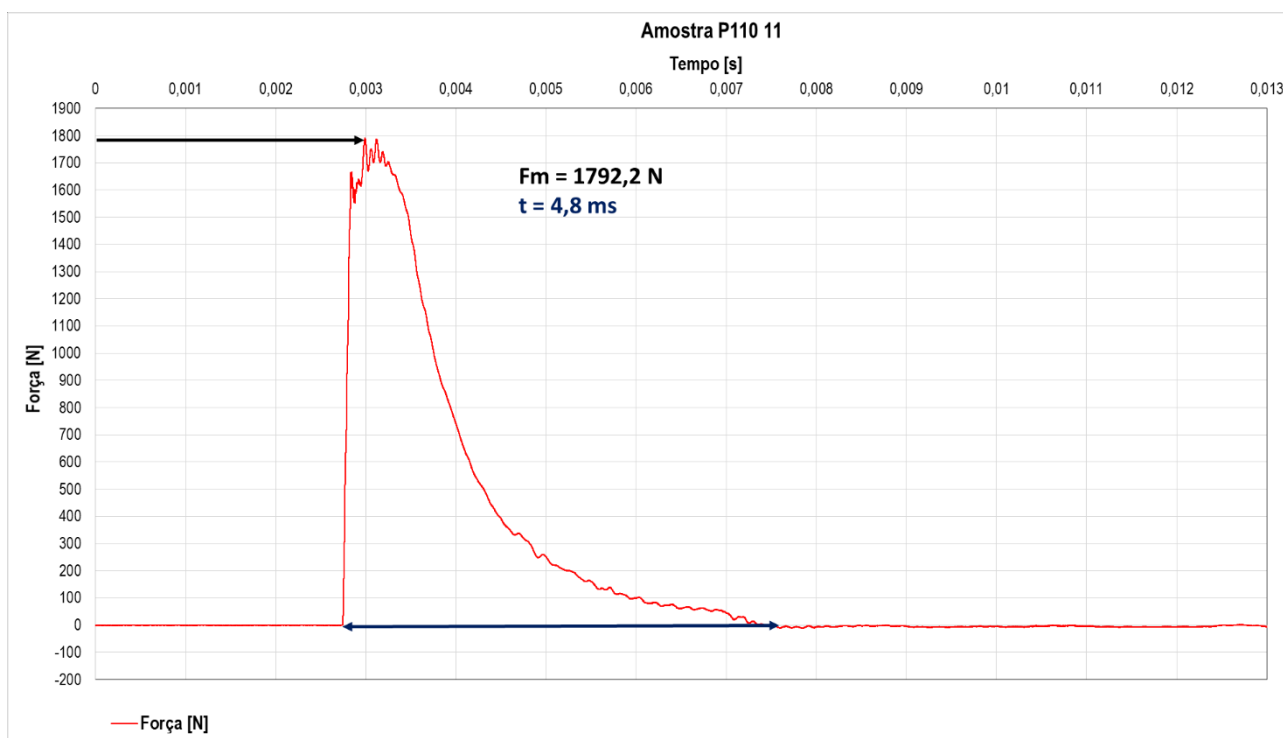


Figura 4.3 – Gráfico de Força [N] x Tempo [s] da amostra P110 11, ensaiada a 20,0°C, com fratura dúctil.

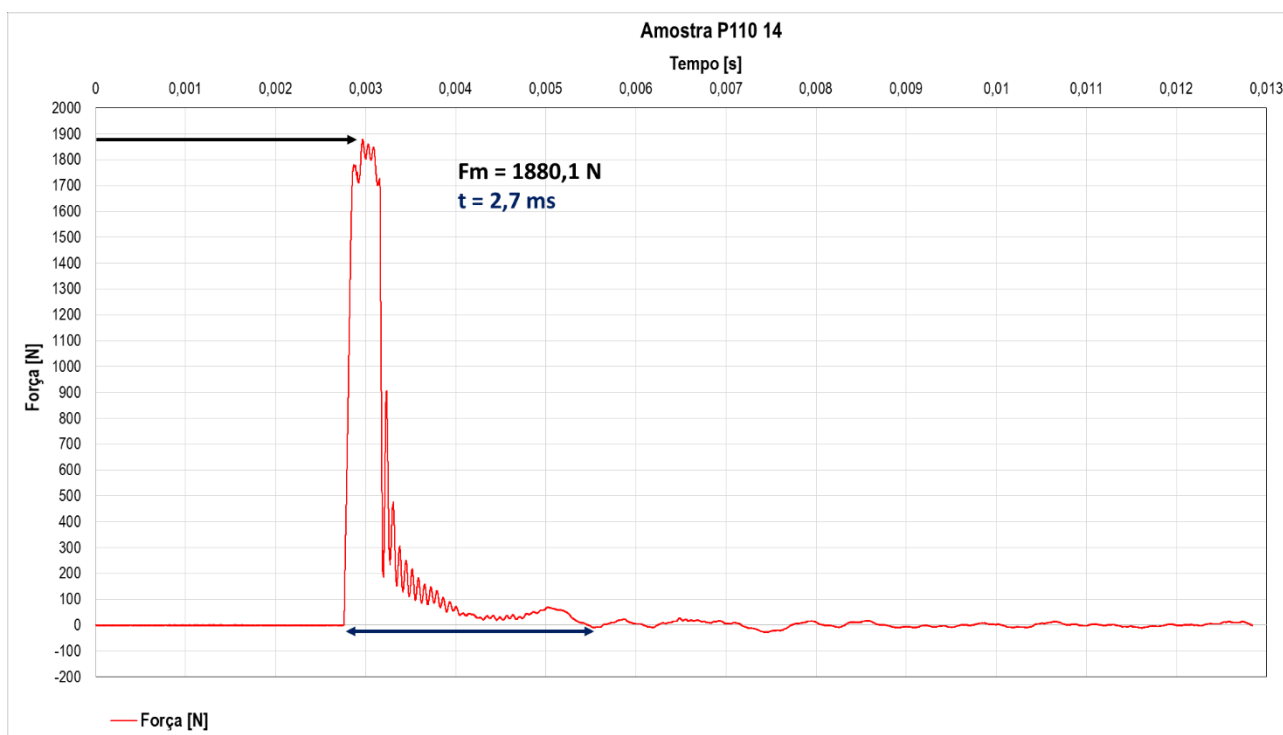


Figura 4.4 – Gráfico de Força [N] x Tempo [s] da amostra P110 14 (-121,0°C), representativo de resultados de fraturas na transição dúctil-frágil.

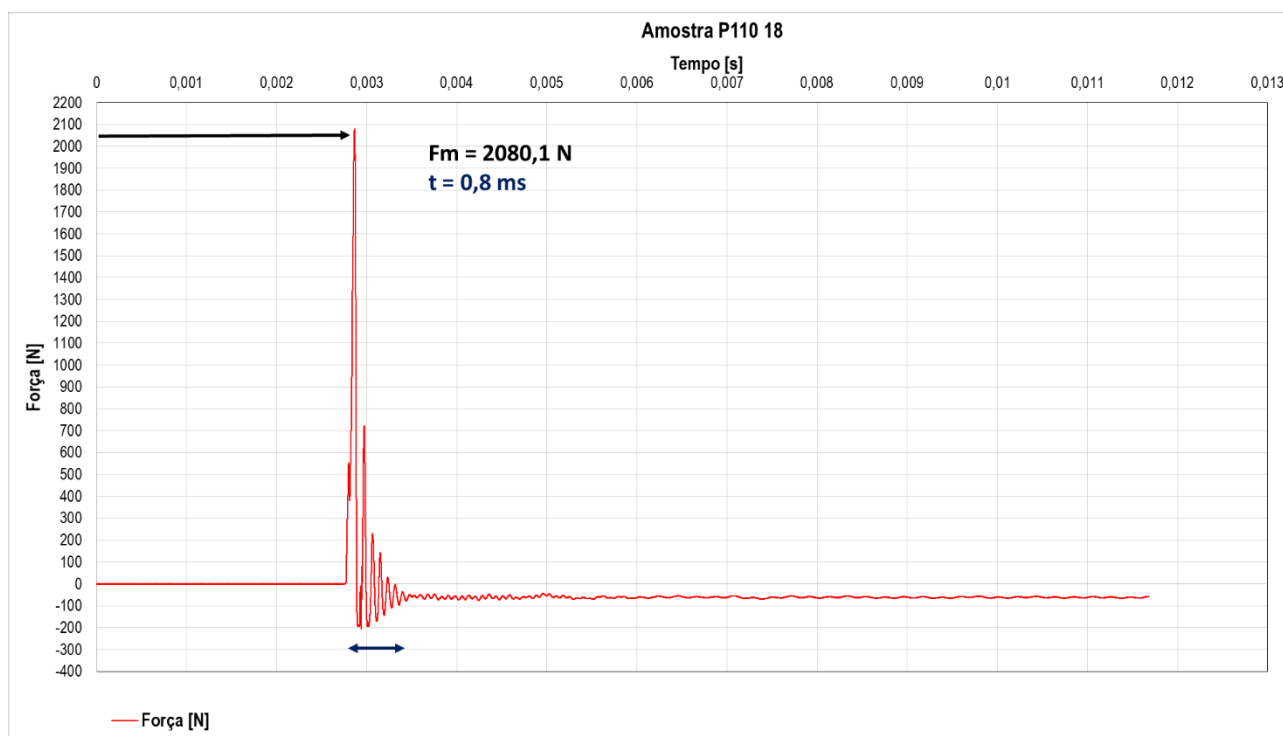


Figura 4.5 – Gráficos de Força [N] x Tempo [s] da amostra P110 18 (-194,8 °C), representativo de resultados de fraturas frágeis.

As Figs. 4.1, 4.2 e 4.3 mostram um comportamento semelhante entre os três aços estudados, todos falhando por fratura dúctil. A ruptura do corpo de prova ocorre no ponto de força máxima do ensaio, destacado pelos gráficos. Além disso, a duração de aplicação da força do pêndulo nos corpos de prova também foi próxima; entre 4,5 e 4,8 ms.

Os valores de força máxima de ensaio variam consideravelmente entre os três materiais. Constatou-se que o API 5L X65, o aço mais resistente ao impacto, apresentou a menor força máxima de ensaio, em torno de 1147,0 N. Enquanto que para o P110, o aço menos resistente ao impacto, teve como resultado a maior força máxima de ensaio entre os três aços, em torno de 1792,2 N. Os dados de força máxima de ensaio para cada material estão diretamente ligados com suas resistências mecânicas. Neste caso, o aço P110 têm a maior resistência mecânica entre os três aços avaliados e, portanto, a maior força máxima de ensaio de impacto.

No entanto, destaca-se que, muito embora o aço API 5L X65 apresente a menor força máxima entre os três materiais, ele absorve mais energia durante o impacto. A energia de impacto é definida e calculada pela área abaixo da curva de força x tempo

e o aço API 5L X65 apresenta a maior área abaixo da curva, como observou-se pelas Figs. 4.1, 4.2 e 4.3.

Ainda com relação aos gráficos das Figs. 4.3, 4.4 e 4.5, fica evidente que a força em ensaios com a amostra fragilizada é maior se comparada a ensaios na região dúctil e de transição. Para uma amostra do aço P110 testada a $-194,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Fig. 4.5), a aplicação da força ocorreu durante 0,8 ms. Em um ensaio na região de transição (Fig. 4.4), a aplicação durou 1,3 ms, enquanto na região dúctil (Fig. 4.3) a duração média foi de 4,2 ms. Este é um resultado esperado uma vez que quanto mais fragilizado o corpo de prova, com a diminuição da temperatura de ensaio, a região de deformação plástica é menor, diminuindo o tempo de aplicação da força. Na Fig. 4.5 é possível observar que o ponto de força máxima do ensaio coincide com o momento de ruptura do corpo de prova.

4.2 Curvas de energia em função da temperatura de ensaio e resultados de temperatura de transição dúctil-frágil

A partir dos resultados abordados no item anterior, curvas de energia em função da temperatura de ensaio foram plotadas. Como mencionado anteriormente, os dados de cada ensaio foram aproximados por meio de uma função de regressão exponencial. As Figs. 4.6 e 4.7 mostram as curvas dos ensaios de impacto das amostras convencionais para os materiais L80 e P110. Deve-se destacar que não foi possível a avaliação da temperatura de transição dúctil-frágil para o material API 5L X65 nas amostras convencionais, pois os resultados de fratura se mantiveram apenas na região dúctil.

Já as Figs. 4.8, 4.9 e 4.10 mostram as curvas dos ensaios de impacto em amostras miniaturizadas. Além das curvas e pontos dos ensaios, estão identificadas a função de regressão e a temperatura de transição (TT) dúctil-frágil calculada para cada curva, tanto para os ensaios em corpos de prova convencionais quanto para os miniaturizados.

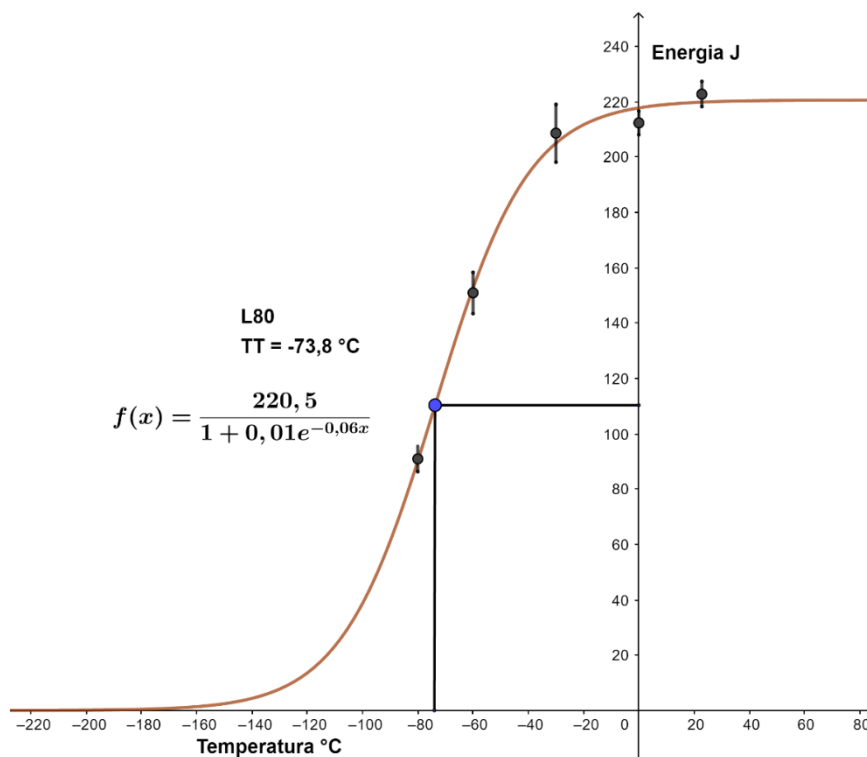


Figura 4.6 – Resultados de ensaio de impacto Charpy em função da temperatura de ensaio para o material L80 em amostras convencionais, mostrando a curva de regressão e a temperatura de transição calculada.

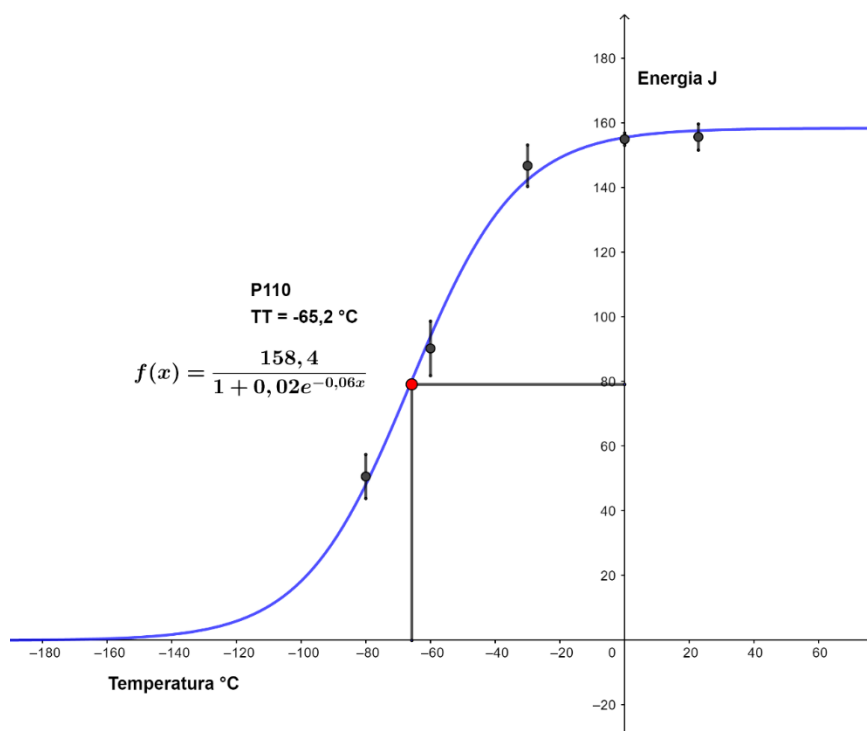


Figura 4.7 – Resultados de ensaio de impacto Charpy em função da temperatura de ensaio para o material P110 em amostras convencionais, mostrando a curva de regressão e a temperatura de transição calculada.

Os intervalos de desvio padrão calculados para os ensaios em corpos de prova convencionais também estão destacados nas figuras. Observou-se que em ambos os experimentos não foram obtidos resultados nos patamares inferiores das curvas. No entanto, uma vez que resultados na região de transição foram alcançados, a função de regressão aproxima a curva e é possível calcular a temperatura de transição.

Na Fig. 4.7 tem-se os resultados para o material P110, no ensaio em corpos de prova convencionais, onde a temperatura de transição deste material calculada pela curva foi de -65,2 °C. Para o material L80 (Fig. 4.6) a temperatura de transição calculada pelo ponto de inflexão da curva foi de -73,8 °C. Destaca-se, portanto, que o material L80, apesar de possuir maior resistência ao impacto que o P110, possui uma temperatura de transição dúctil-frágil semelhante.

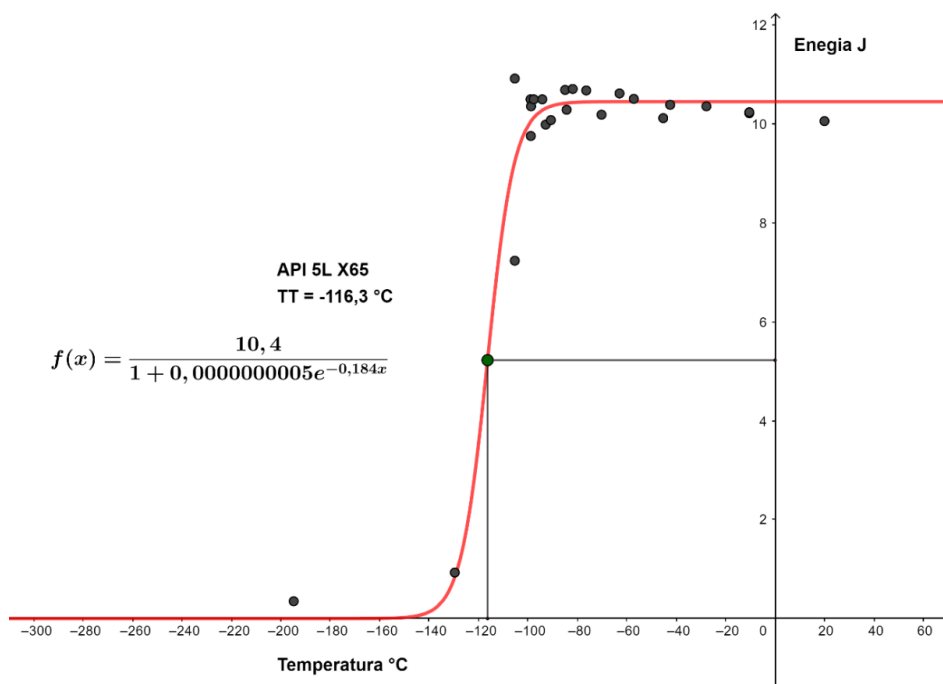


Figura 4.8 – Resultados de ensaio de impacto Charpy em função da temperatura de ensaio para o material API 5L X65 em amostras miniaturizadas, mostrando a curva de regressão e a temperatura de transição dúctil-frágil calculada.

Nota-se pela Fig. 4.8 que o aço API 5L X65 apresenta uma região de transição muito curta, na qual uma queda de apenas 30 °C na temperatura de ensaio difere de resultados de fratura dúctil para frágil. Esse comportamento é característico de materiais menos resistentes mecanicamente e com baixo teor de carbono em sua composição química, como mencionado anteriormente na revisão bibliográfica (Fig.

2.6). A temperatura de transição resultante dos ensaios em corpos de prova miniaturizados para o aço API 5L X65 foi de -116,3 °C.

O valor de temperatura de transição calculado por Lucon et al. (2015), pelo método de energia em função da temperatura de ensaio, foi de -111 °C, bem próximo ao obtido por este experimento.

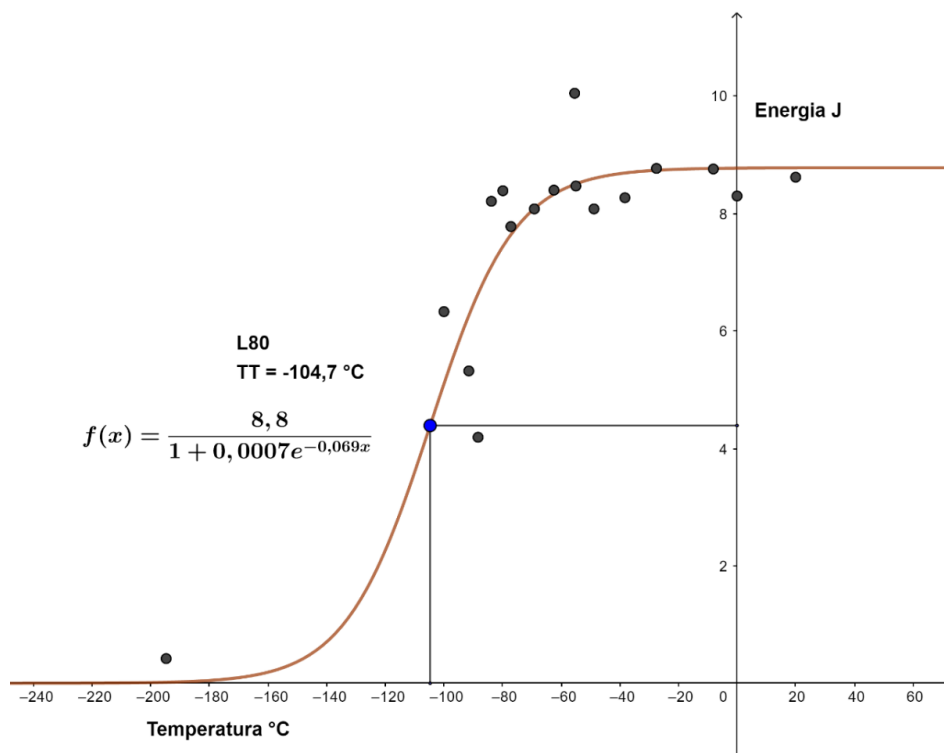


Figura 4.9 – Resultados de ensaio de impacto Charpy em função da temperatura de ensaio para o material L80 em amostras miniaturizadas, mostrando a curva de regressão e a temperatura de transição dúctil-frágil calculada.

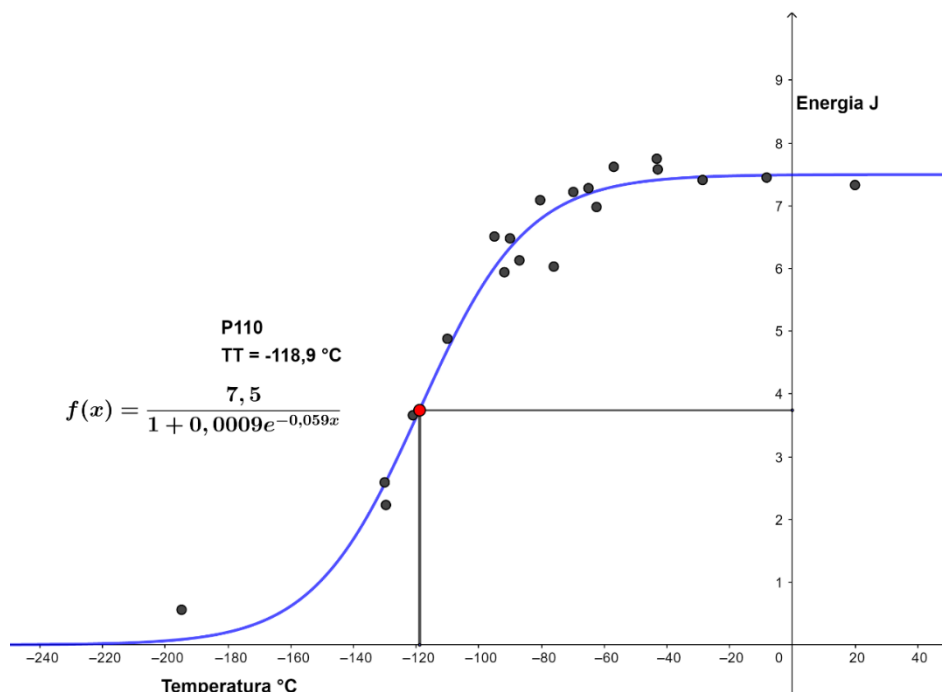


Figura 4.10 – Resultados de ensaio de impacto Charpy em função da temperatura de ensaio para o material P110 em amostras miniaturizadas, mostrando a curva de regressão e a temperatura de transição dúctil-frágil calculada.

Os materiais P110 (Fig. 4.10) e L80 (Fig. 4.9), nos ensaios em corpos de prova miniaturizados, apresentaram pontos bem distribuídos em todas as regiões características de um ensaio de impacto Charpy. Para esses materiais, a região de transição é mais larga, numa maior faixa de temperatura, se comparada ao API 5L X65. Destaca-se novamente a necessidade de realizar ensaios nas amostras convencionais em temperaturas menores, de forma a obter o mesmo comportamento observado nas curvas de ensaio das amostras miniaturizadas.

Para o P110, a temperatura de transição calculada foi de $-118,9\text{ °C}$. Já para o L80, o resultado foi de $-104,7\text{ °C}$. Comparando os resultados de temperatura de transição dos três aços (API 5L X65, L80 e P110), para os ensaios em corpos de prova miniaturizados, foi possível observar que os valores são próximos, com uma média de $-113,3\text{ °C}$, com diferenças máximas em torno da média de $-14,2\text{ °C}$.

4.3 Correlação da temperatura de transição dúctil-frágil entre os corpos de prova convencionais e miniaturizados

Os resultados de temperatura de transição dúctil-frágil resultantes dos ensaios realizados neste trabalho são mostrados na Tab. 4.7. Além disso, foram destacados os valores de redução na temperatura de transição dúctil-frágil entre os ensaios em amostras convencionais e miniaturizadas. Vale destacar que o material API 5L X65, mesmo tendo resultados em ensaios de amostras miniaturizadas, foi descartado das análises de correlação.

Como esperado, houve uma redução da temperatura de transição dúctil-frágil com a diminuição das dimensões dos corpos de prova, mesmo comportamento observado por vários autores como Lucon *et al* (2015) e Corwin (1986). Observou-se que os valores de temperatura de transição em corpos de prova convencionais e miniaturizados para os três aços (exceto para o API 5L X65 em corpos de prova convencionais) são, de certa forma, semelhantes, com médias de -69,5 °C para os convencionais e -113,3 °C para os miniaturizados, com variações inferiores a -14,2 °C em torno da média.

Tabela 4.7 – Resultados de temperatura de transição em amostras convencionais e miniaturizadas, bem como a redução da temperatura de transição dúctil-frágil entre ensaios.

Material	API 5L X65	P110	L80	Média
TT CP's convencionais (°C)	-	-65,2	-73,8	-69,5
TT CP's miniaturizados (°C)	-116,3	-118,9	-104,7	-113,3
Redução na temperatura de transição (°C)	-	-53,7	-30,9	-42,3

No estudo de correlação de ensaios de impacto Charpy entre corpos de prova de diferentes dimensões, vários autores como Lucon *et al.* (2015) e Dohi *et al.* (2002) apresentam equações com o objetivo de prever a redução da temperatura de transição dúctil-frágil. No entanto, evidenciam que essas equações podem apresentar erros significativos.

Nesse sentido, autores como Corwin (1986), Yamamoto *et al.* (2002) e Moitra *et al.* (2017) destacam em seus trabalhos que as variações de temperatura de transição entre as diferentes configurações de amostras mudam de material em material. Relações empíricas são questionáveis uma vez que o comportamento constitutivo do material muda significativamente.

Portanto, a forma mais confiável de correlacionar ensaios de impacto Charpy em amostras de diferentes dimensões seria a criação de um banco de dados de ensaios em diversos materiais. Dessa forma, assim que a demanda por um ensaio de impacto em corpo de prova miniaturizado fosse criada, seu resultado teria uma referência em ensaios com corpos de prova convencionais.

Apesar disso, os valores de redução na temperatura de transição encontrados para os materiais P110 e L80 se assemelham aos resultados de Lucon *et al.* (2015), cuja média de redução, para o método de temperatura de transição em função da energia total do ensaio, foi de $-45,7^{\circ}\text{C}$, enquanto a do presente trabalho foi de $-42,3^{\circ}\text{C}$. Destaca-se que os corpos de prova miniaturizados deste trabalho foram fabricados com as mesmas dimensões ($4 \times 3 \times 27 \text{ mm}^3$) dos corpos de prova de Lucon *et al.* (2015).

4.4 Resultados da análise da superfície de fratura dos corpos de prova no MEV

Após os ensaios nos corpos de prova convencionais e miniaturizados, e determinação das temperaturas de transição, foi feita a investigação da superfície da fratura de alguns corpos de prova específicos, utilizando MEV. Apenas as amostras miniaturizadas foram analisadas, devido ao seu melhor estado de preservação.

Como comentado anteriormente, para cada aço testado, foram separadas três amostras, cujos resultados abrangessem as regiões de fratura dúctil, frágil e de transição. Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados da análise de corpos de prova dos três aços ensaiados (API 5L X65, L80 e P110).

As Figs. 4.11, 4.12 e 4.13 mostram os resultados das análises dos corpos de prova X65-20, L80-02 e P110-18, com resultados de fratura na região frágil. Enquanto isso, as Figs. 4.14, 4.15 e 4.16 são dos corpos de prova X65-22, L80-03 e P110-14, cujo resultados de fratura encontram-se na região de transição dúctil-frágil. Os resultados dos corpos de prova X65-11, L80-13 e P110-04, da região de fratura dúctil, se encontram nas Figs. 4.17, 4.18 e 4.19.

Os locais onde as análises foram realizadas estão destacadas por um círculo vermelho e se concentraram no centro da superfície onde a fratura frágil é favorecida devido à maior triaxilidade das tensões trativas. As figuras subsequentes são ampliações do local destacado pelo círculo.

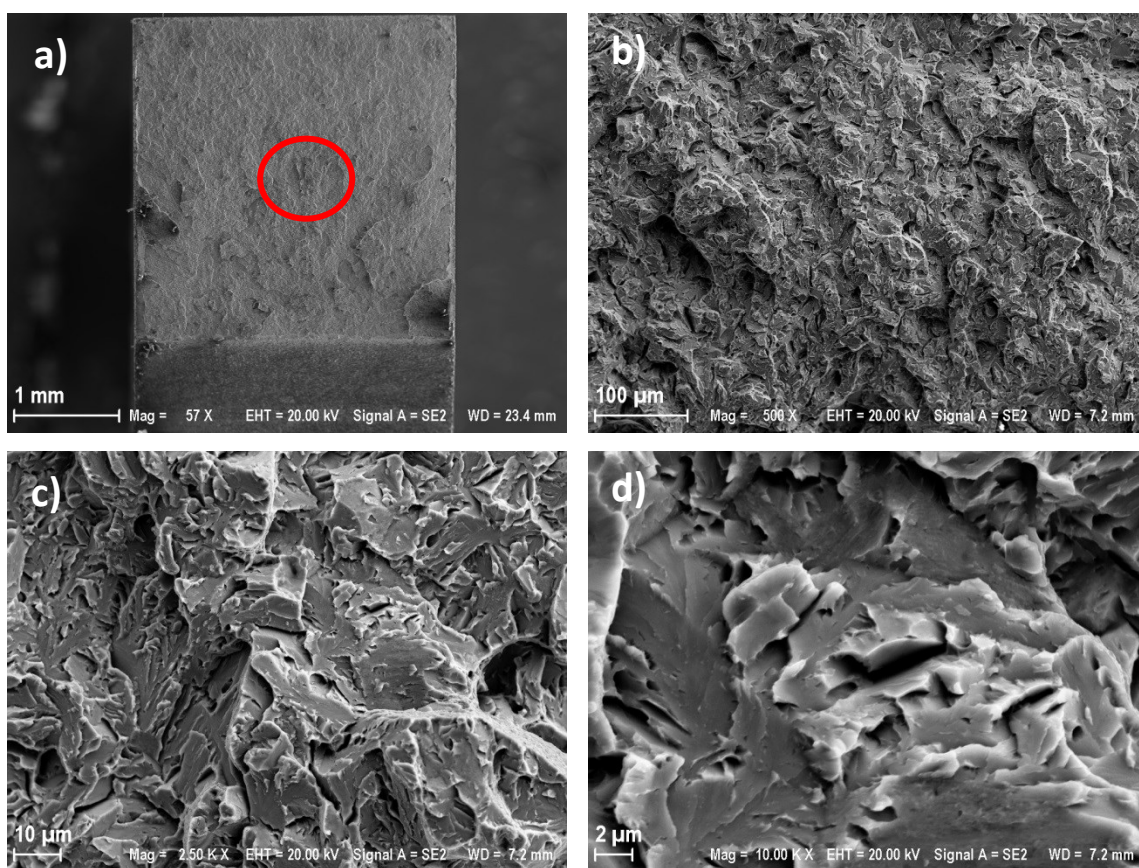


Figura 4.11 – Imagens da fratura da amostra X65-20 ensaiada a -194,8 °C.

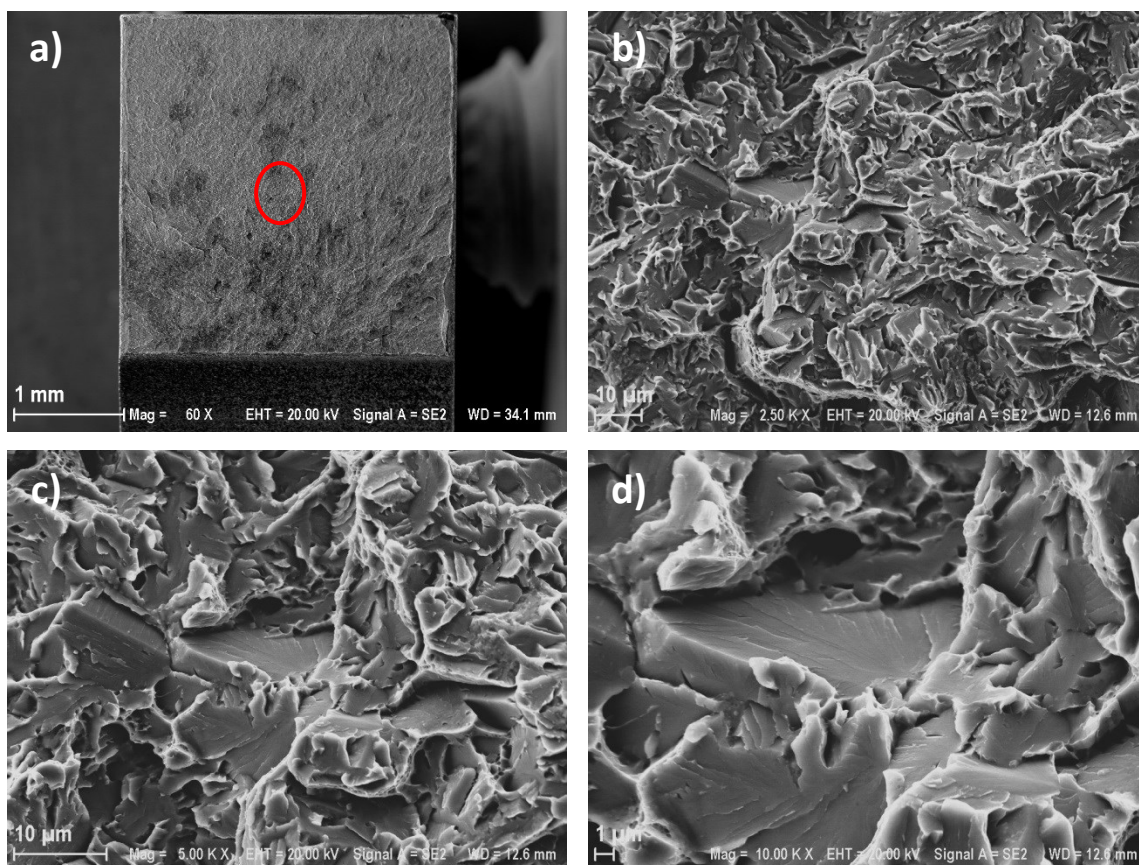


Figura 4.12 – Imagens da fratura da amostra L80-02 ensaiada a $-194,8^{\circ}\text{C}$.

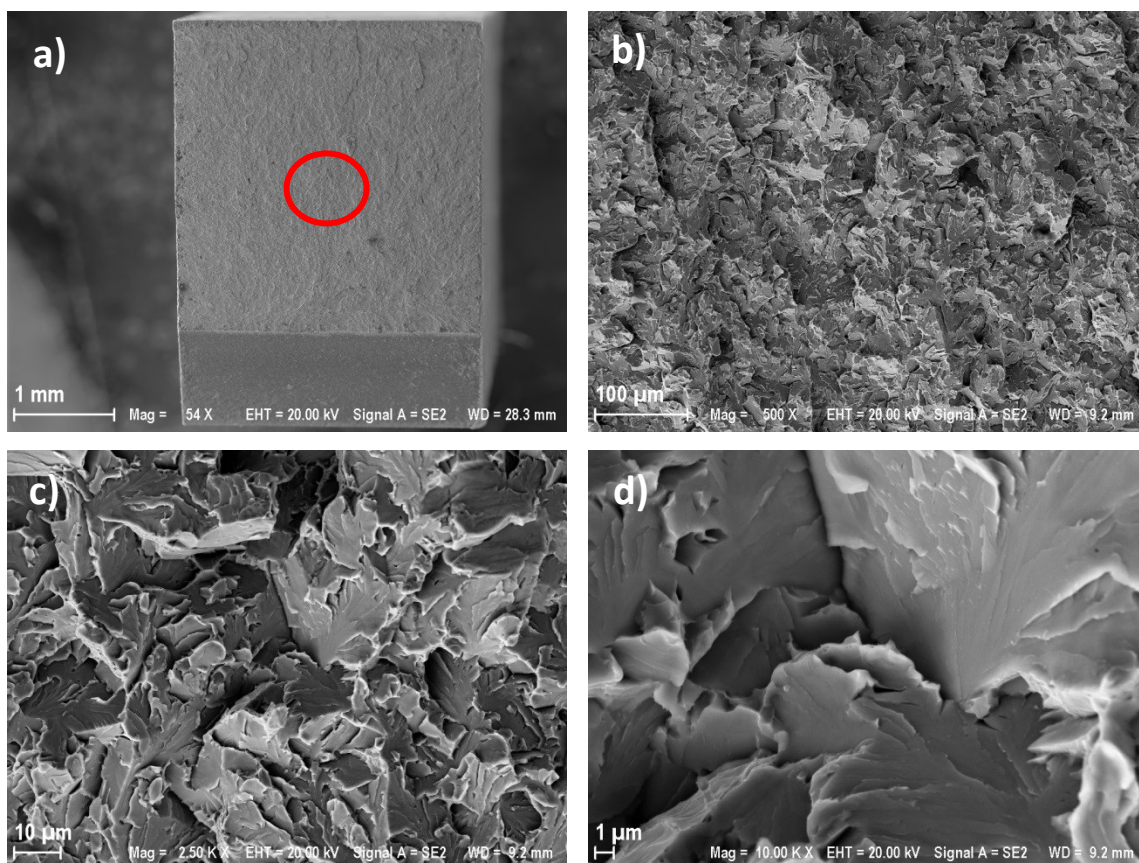


Figura 4.13 – Imagens da fratura da amostra P110-18 ensaiada a $-194,8^{\circ}\text{C}$.

É possível identificar, pelas Figs. 4.11, 4.12 e 4.13 um aspecto de fratura totalmente frágil. Observa-se pelas imagens em menor aumento que a fratura nos corpos de prova resultou em nenhuma expansão lateral ou deformação plástica durante o impacto. Além disso, a superfície da fratura evidencia uma textura facetada ou granulada, devido a variações de orientação dos planos de clivagem.

Em maiores aumentos, nota-se uma superfície típica de quase-clivagem, com alguma deformação plástica a nível microscópico, sem formação de microcavidades. Esse tipo de fratura é típico de estruturas beneficiadas (LANGE, 2001), como a dos aços estudados neste trabalho.

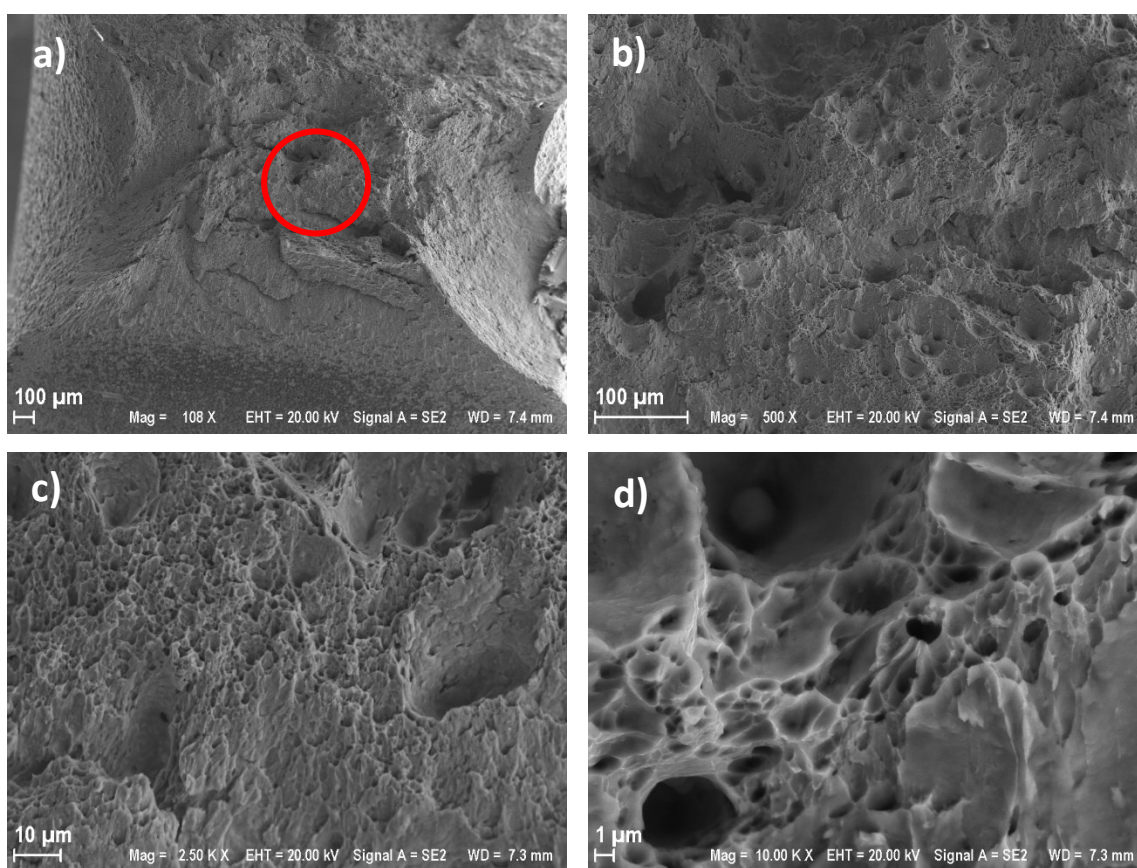


Figura 4.14 – Imagens da fratura da amostra X65-22 ensaiada a -105,3 °C.

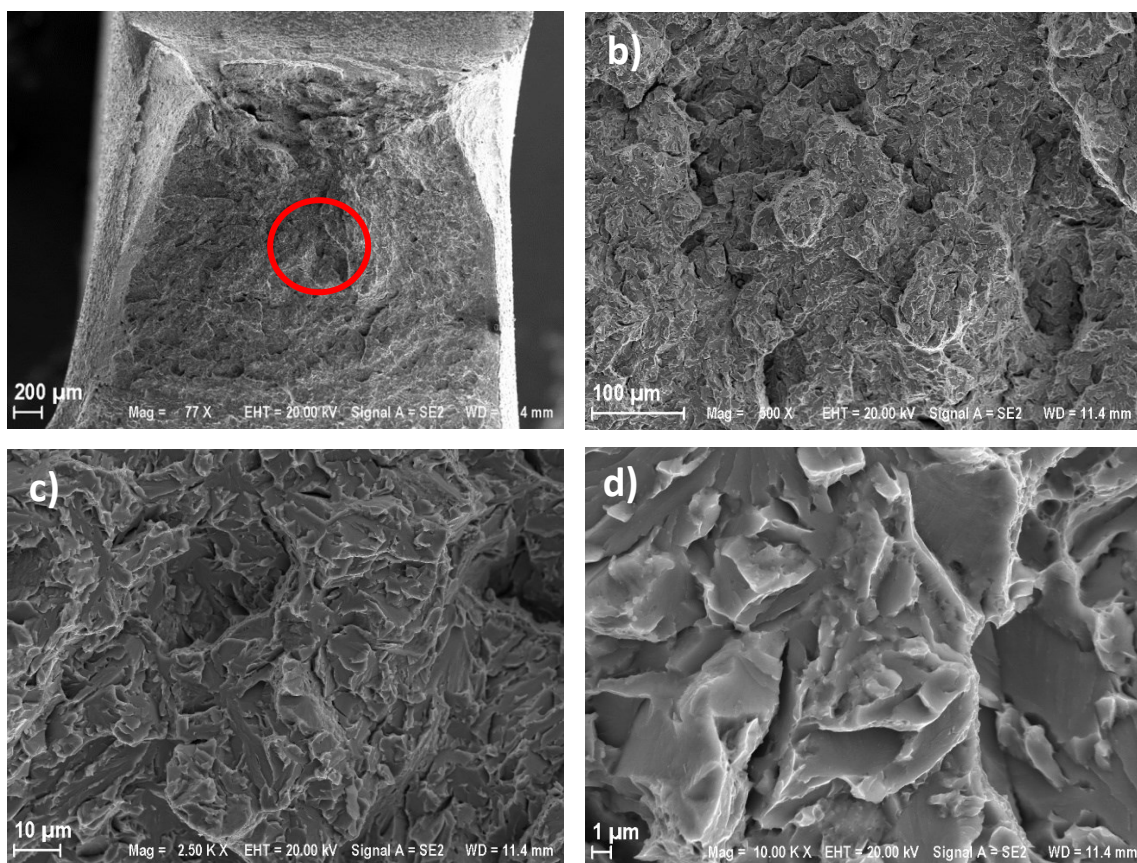


Figura 4.15 – Imagens da fratura da amostra L80-03 ensaiada a -88,4 °C.

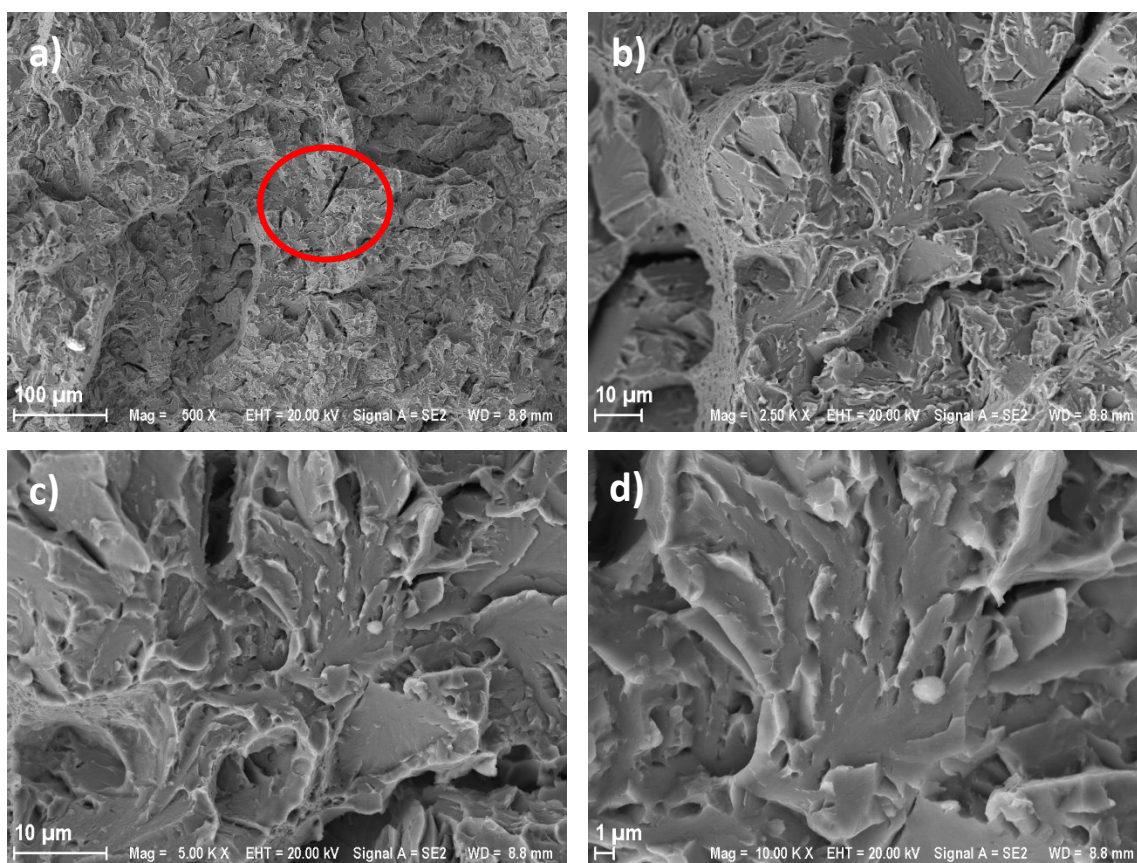


Figura 4.16 – Imagens da fratura da amostra P110-14 ensaiada a -121,0 °C.

As imagens microscópicas do corpo de prova X65-22 (Fig. 4.14), com resultado de ensaio na região de transição destacam a presença de irregularidades na superfície e microcavidades (*dimples*). As microcavidades são formadas a partir de trincas que iniciam em inclusões ou carbonetos. Essas trincas evoluem formando elipsoides, até que se tocam, como mostrado na Fig. 4.14d.

No entanto, para as imagens microscópicas dos aços L80 e P110 (Figs. 4.15 e 4.16), em corpos de prova que também resultaram em fraturas na região de transição dúctil-frágil, foi observado um comportamento semelhante às análises dos corpos de prova na região de fratura frágil, com características típicas de quase clivagem.

Já as vistas gerais (imagens em menor aumento) das Figs. 4.14, 4.15 e 4.16 exibem uma visão geral da superfície do corpo de prova, onde é possível identificar uma considerável deformação plástica e expansão lateral, para os três aços estudados.

As análises da superfície da fratura dos corpos de prova das Figs. 4.17, 4.18 e 4.19 apontam, novamente, características de fratura dúcteis, com a formação de microcavidades. Em contrapartida, observa-se que a expansão lateral e deformação plástica nestes corpos de prova é maior, se comparada aos corpos de prova com resultados de fratura na região de transição.

Deve-se destacar que, apesar de as temperaturas de ensaio das amostras (X65-22 e X65-11) serem bastante próximas, a diferença na energia total de ensaio foi o pretexto para analisar ambas as amostras. Justificado pelo fato de o comportamento de transição do API 5L X65 ser muito curto, com pouca diferença de queda de temperatura entre fratura dúctil e frágil.

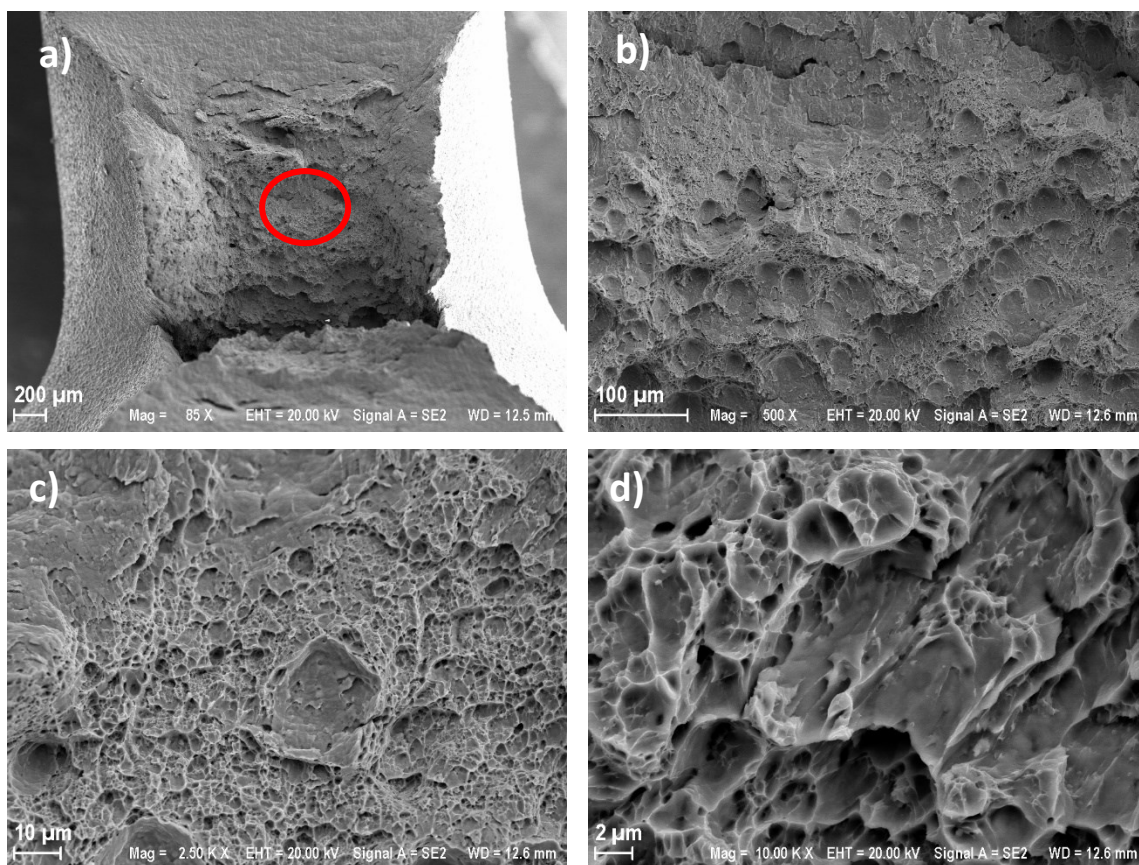


Figura 4.17 – Imagens da fratura da amostra X65-11 ensaiada a -97,6 °C.

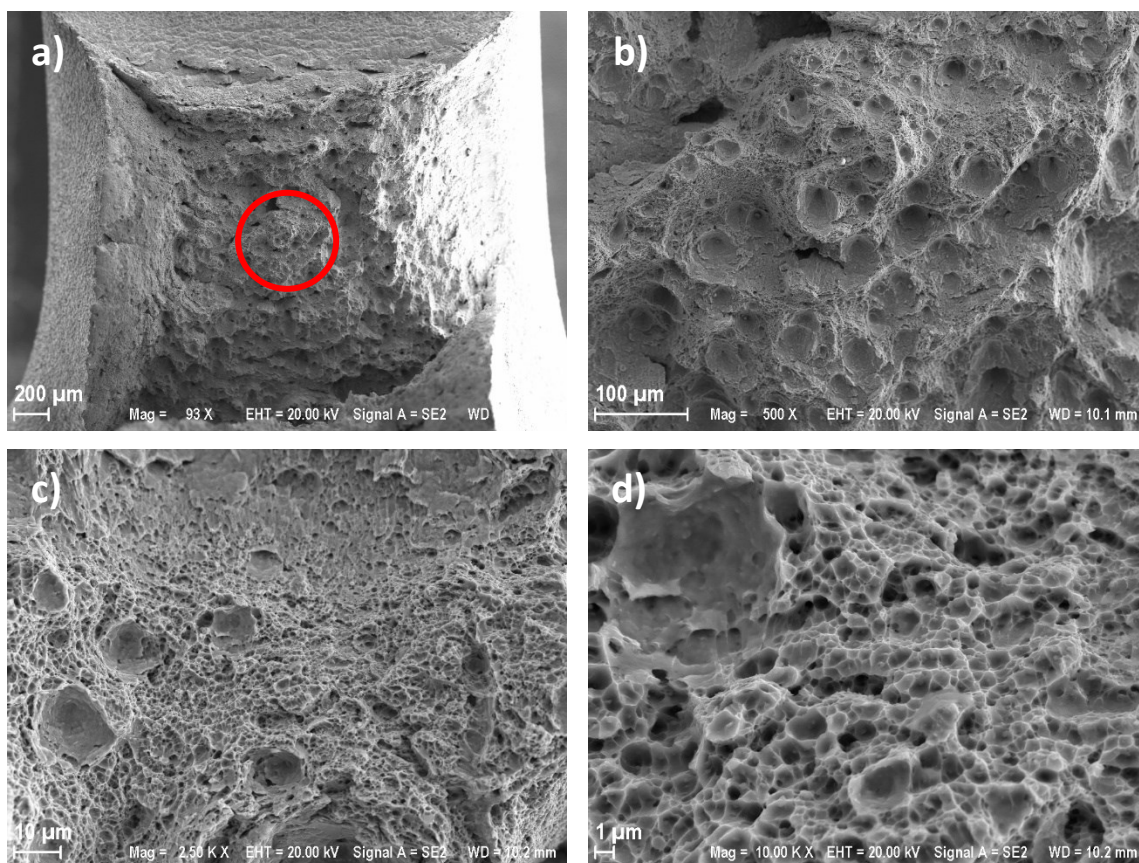


Figura 4.18 – Imagens da fratura da amostra L80-13 ensaiada a 20,0 °C.

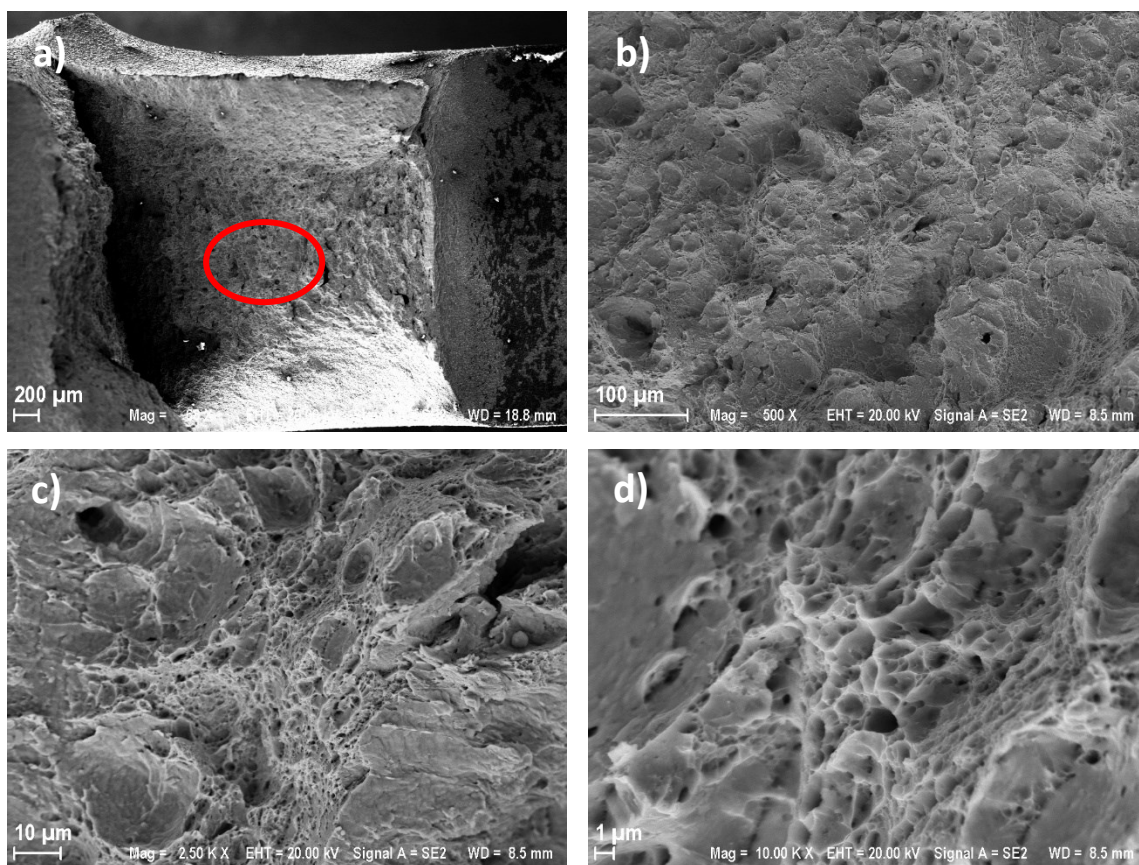


Figura 4.19 – Imagens da fratura da amostra P110-04 ensaiada a $-69,1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

Neste trabalho foram realizados ensaios de impacto Charpy em corpos de prova convencionais e miniaturizados nos aços API 5L X65, L80 e P110, usualmente utilizados na indústria de petróleo e gás. O objetivo dos ensaios foi correlacionar os resultados de temperatura de transição dúctil-frágil entre corpos de prova com dimensões diferentes. Dos resultados obtidos pôde-se concluir que:

- a) Nos ensaios em corpos de prova convencionais ($10 \times 10 \times 55 \text{ mm}^3$), não foi possível calcular a temperatura de transição dúctil-frágil para o aço API 5L X65, uma vez que os resultados de energia se mantiveram na região de fratura dúctil quando testados até $-60 \text{ }^\circ\text{C}$. Para os demais materiais (L80 e P110), testados até $-80 \text{ }^\circ\text{C}$, houve uma queda da energia com a diminuição da temperatura de ensaio, sendo possível calcular a temperatura de transição;
- b) O ajuste dos pontos resultantes do ensaio por meio de uma função de regressão exponencial foi eficaz na determinação da temperatura de transição dúctil-frágil, tanto para corpos de prova convencionais quanto para os miniaturizados. Ainda para os ensaios convencionais, a curva permitiu o cálculo da temperatura de transição mesmo quando não houve fratura totalmente frágil;
- c) As temperaturas de transição dúctil-frágil calculadas, dos aços L80 e P110, em ensaios com corpos de prova convencionais foram de $-73,8 \text{ }^\circ\text{C}$ e $-65,2 \text{ }^\circ\text{C}$, respectivamente;
- d) Para os ensaios em corpos de prova miniaturizados, foram observados resultados de fratura nas três regiões características, com fraturas dúcteis, de transição e frágeis. Portanto, para os três materiais (API 5L X65, L80 e P110),

foi possível calcular a temperatura de transição dúctil-frágil. A temperatura de transição calculada foi igual a $-116,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ para o API 5L X65, $-104,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ para o L80 e $-118,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ para o P110;

- e) Ao passar de ensaios em corpos de prova convencionais para os miniaturizados, houve uma redução média da temperatura de transição dúctil-frágil igual a $-42,3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dessa forma, destaca-se a teoria da redução da temperatura de transição devido à mudança do estado triaxial de tensões no entalhe dos corpos de prova, com a diminuição da seção;
- f) A instrumentação dos ensaios em corpos de prova miniaturizados forneceu resultados que permitem melhor compreender o comportamento mecânico durante o impacto. Com destaque para o valor de força máxima de impacto e o tempo de aplicação da força durante o ensaio;
- g) As fraturas observadas são típicas de ensaios de impacto Charpy, nas três regiões (dúctil, transição e frágil). Os mecanismos de falha predominantes são a deformação plástica com formação de microcavidades (*dimples*) e a clivagem;
- h) As fraturas frágeis nos três materiais podem ser caracterizadas como quase clivagem. Essas fraturas são características de aços beneficiados, como o caso do API 5L X65, L80 e P110 avaliados neste trabalho.

CAPÍTULO 6

TRABALHOS FUTUROS

Com o fim deste estudo, são sugeridas as seguintes observações para pesquisas e trabalhos futuros:

- a. Para os corpos de prova convencionais dos materiais P110 e L80, realizar novos ensaios em temperatura abaixo de $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$, de forma a obter resultados de fraturas totalmente frágeis, complementando e ajustando com a melhor linha de tendência as curvas de temperatura de transição;
- b. Para o material API 5L X65, em amostras convencionais, realizar novos ensaios em temperaturas abaixo de $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ e em um equipamento de capacidade de impacto superior, como o utilizado para os ensaios nos materiais L80 e P110. Além disso, observar se o comportamento da curva de transição é o mesmo se comparado a amostras miniaturizadas, como foi concluído para os outros aços.
- c. Realizar ensaios de impacto Charpy em corpos de prova de dimensões intermediárias, com o objetivo de propor uma equação empírica que possa estimar a redução da temperatura de transição entre amostras de diferentes geometrias. Mesmo que as equações possuam erros para diferentes materiais, como destacado por diferentes autores;
- d. Realizar ensaios de impacto Charpy de amostras convencionais e miniaturizadas para outros materiais, construindo um banco de dados para correlacionar o decaimento da temperatura de transição de forma mais precisa.

CAPÍTULO 7

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- A. Moitra, S. A. Krishnan, G. Sasikala, A. K. Bhaduri & T. Jayakumar. **Effect of specimen size in determining ductile to brittle transition temperature**, *Materials Science and Technology*, 2015, p. 1781-1787.
- API Specification 5L, **Specification for Line Pipe**, American Petroleum Institute, Forty-Third Edition, March 2004.
- ASM 1990 ASM METALS HANDBOOK , **Properties and Selection: Iron Steels and High Performance Alloys.**, ASM International, v. 1, 1990.
- ASTM E2248-13, **Standard Test Method for Impact Testing of Miniaturized Charpy V-Notch Specimens**, ASTM Book of Standards 01.03, 2014.
- ASTM E23-18, **Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018.
- B. S. Loudon, A. S. Kumar, F. A. Garner, M. L. Hamilton, and W. L. Hu, **The Influence of Specimen Size on Charpy Impact Testing of Unirradiated HT-9**, *Journal of Nuclear Materials* 155-157, 1988, p. 662-667.
- Dohi, K., Soneda, N., Onchi, T., and Matsui, H., **Correlation Between Subsize and Full-size Charpy Impact Properties of Neutron-Irradiated Reactor Pressure Vessel Steels**, *Small Specimen Test Techniques: Fourth Volume*, ASTM STP 1418, M.A. Sokolov, J.D. Landes, and G.E. Lucas, Eds., ASTM International, West Conshohocken, PA, 2002.
- GARCIA, Amauri; SPIM, Jaime Alvares; SANTOS, Carlos Alexandre dos. **Ensaios dos materiais**. Rio de Janeiro: LTC, 2000. 247 p.

H. Kayano, H. Kurishia, A. Kimura, M. Narui, M. Yamazaki, and Y. Suzuki, **Charpy Impact Testing Using Miniature Specimens and Its Application to the Study of Irradiation Behavior of Low-Activation Ferritic Steels**, Journal of Nuclear Materials 179-181, 1991, pp. 425-88.

ISO 148-1:2010, **Metallic materials - Charpy pendulum impact test -- Part 1: Test method**, International Standards Organization, 2010.

ISO 14556:2015, **Steel - Charpy V-notch pendulum impact test -- Instrumented Test method**, International Standards Organization, 2015.

LANGE, G., **Systematisch Beurteilung technischer Schadensfälle**, Wiley-VCH, Weinheim, 2001.

KUNDAN KUMAR; MADHUSOODANAN, K.; RUPANI, B.B., **Miniature specimen technique as an NDT tool for estimation of service life of operating pressure equipment**. BARC Newsletter. Chennai, n. 285, pp. 92-102, oct. 2006.

Lucon, E., McCowan, C. N., and Santoyo, R. L., 2015, **Impact Characterization of Line Pipe Steels by Means of Standard, Sub-Size and Miniaturized Charpy Specimens**, NIST Technical Note 1865, NIST, Boulder CO (USA).

NICOLOSI, E. R. **Avaliação de Métodos Analíticos para Determinação de Propriedades Mecânicas de Aços Via Ensaio de Macroidentação Instrumentada**. 2015. 308 p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

SOUZA, S. A., **Ensaaios Mecânicos de Materiais Metálicos, Fundamentos teóricos e práticos**. 5.ed. São Paulo: EDGARD BLÜCHER LTDA, 1982.

W. R. Corwin and A. M. Hougland, **Effect of Specimen Size and Material Condition on the Charpy Impact Properties of 9Cr-1Mo-V-Nb Steel**, in ASTM STP 888, "The Use of Small-scale Specimens for Testing Irradiated Material," W. R. Corwin and G. E. Lucas, Eds., ASTM, Philadelphia, 1986, p. 325-338.

Yamamoto, T., Yabuki, K., Matsui, H., Odette, G. R., and Lucas, G. E., **Evaluation of Standard Charpy Impact Properties with Subsize Specimens**, Small Specimen Test Techniques: Fourth Volume, ASTM STP1418, M. A. Sokolov, J. D. Landes, G. E. Lucas, Eds., ASTM International, West Conshohocken, PA, 2002.

Apêndice 01

Material API 5L X65

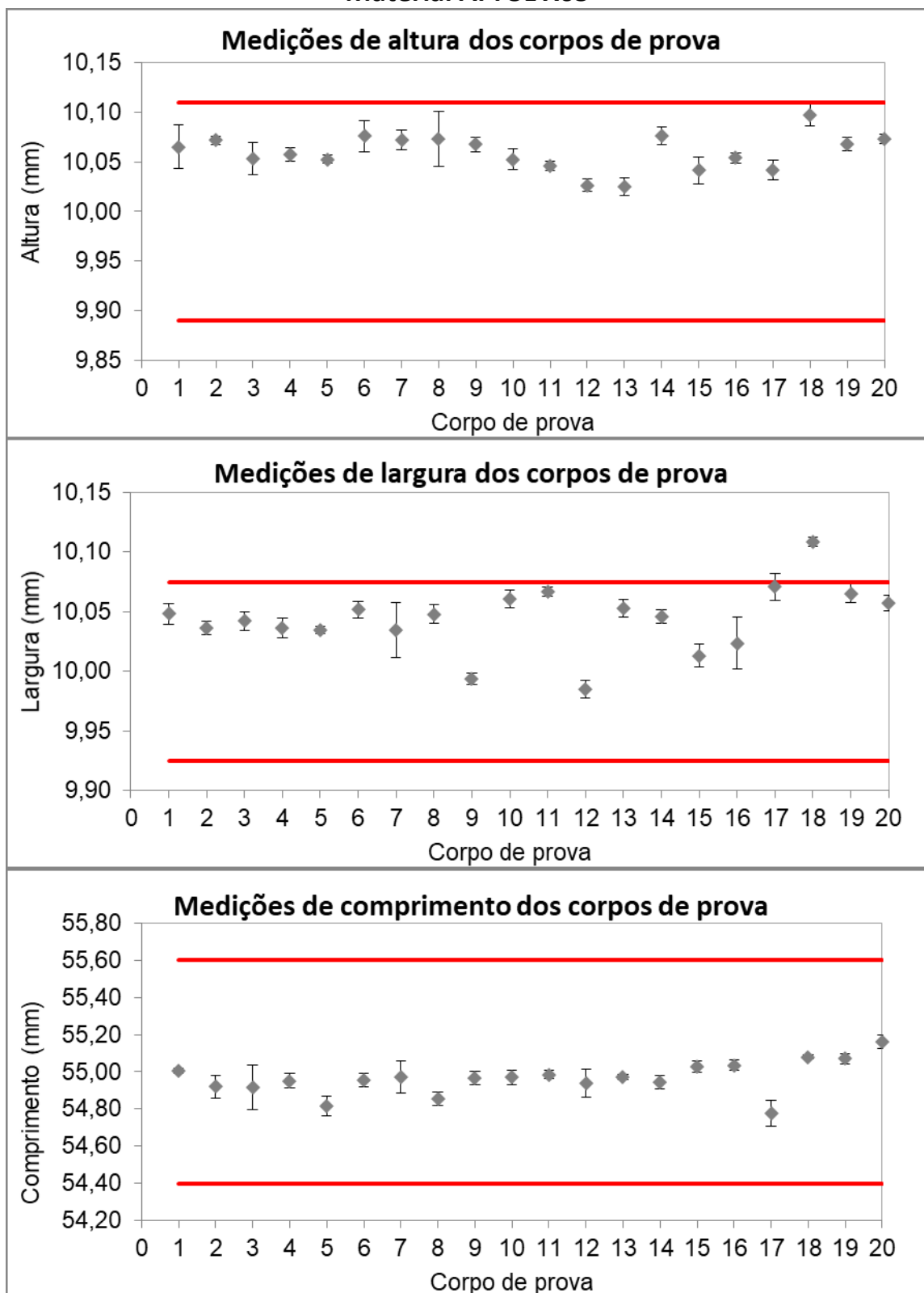


Figura 1 – Resultados da verificação dimensional das amostras convencionais do material API 5L X65.

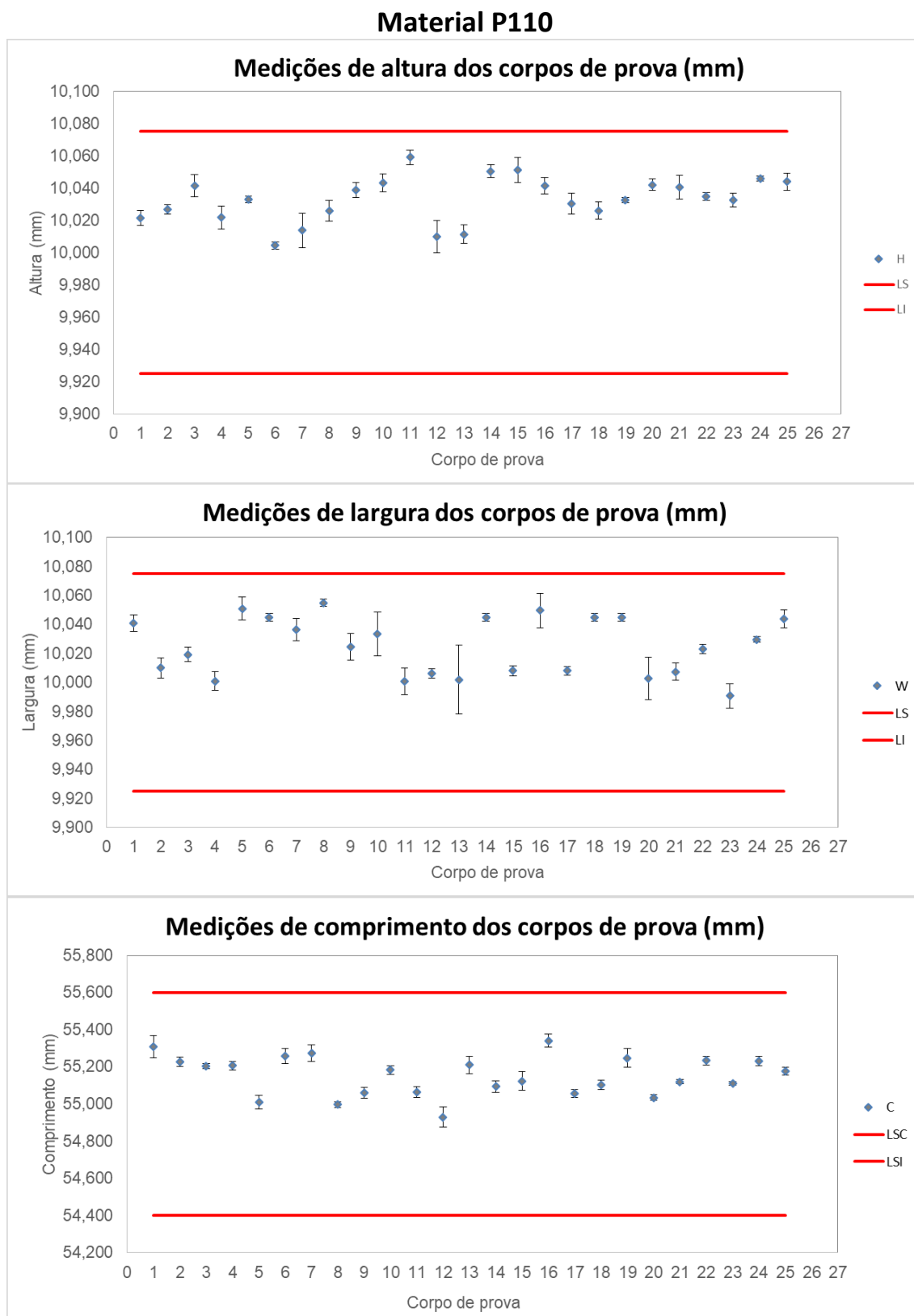


Figura 2 – Resultados da verificação dimensional das amostras convencionais do material P110.

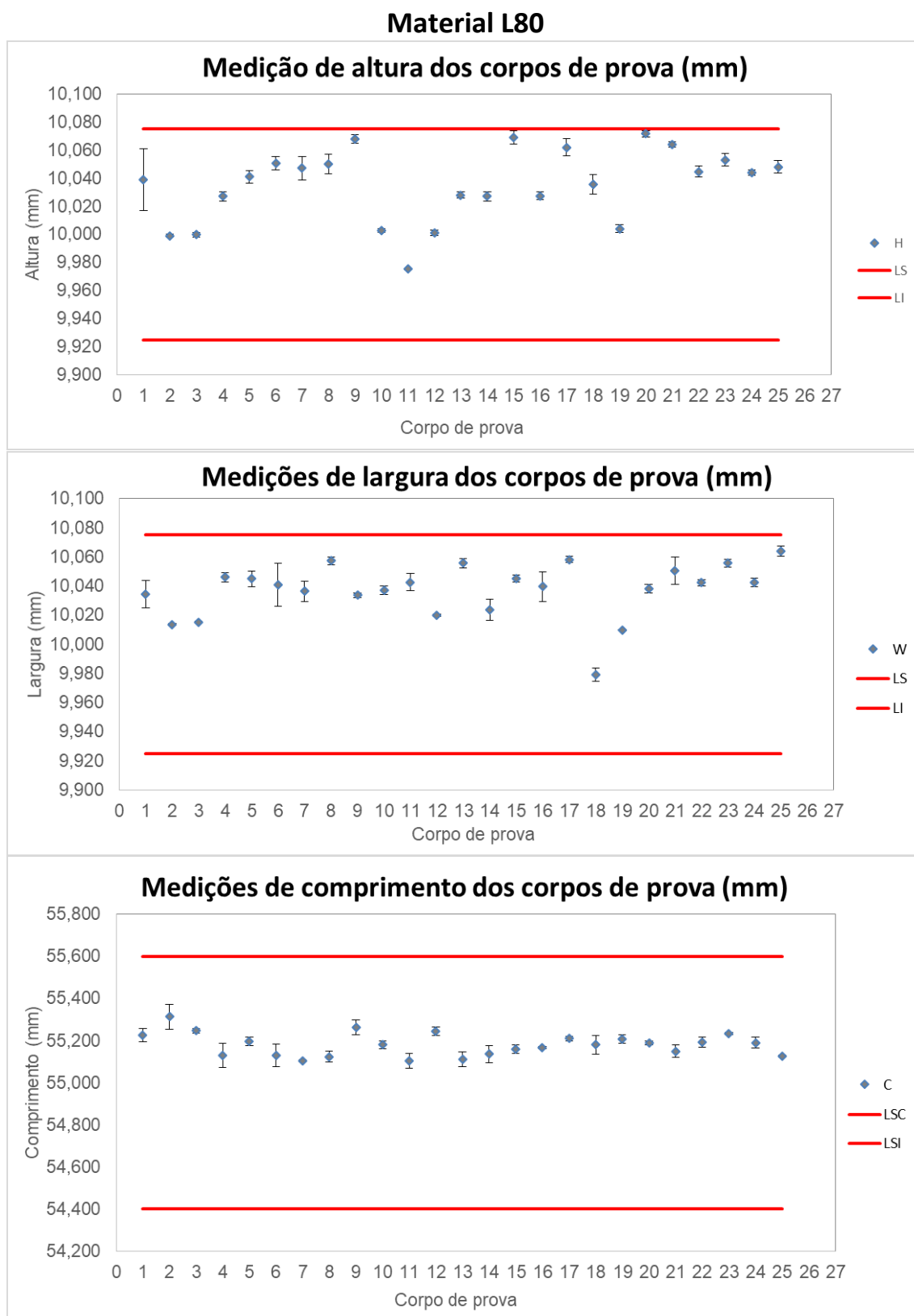


Figura 3 – Resultados da verificação dimensional das amostras convencionais do material L80.

Apêndice 02

Material X65

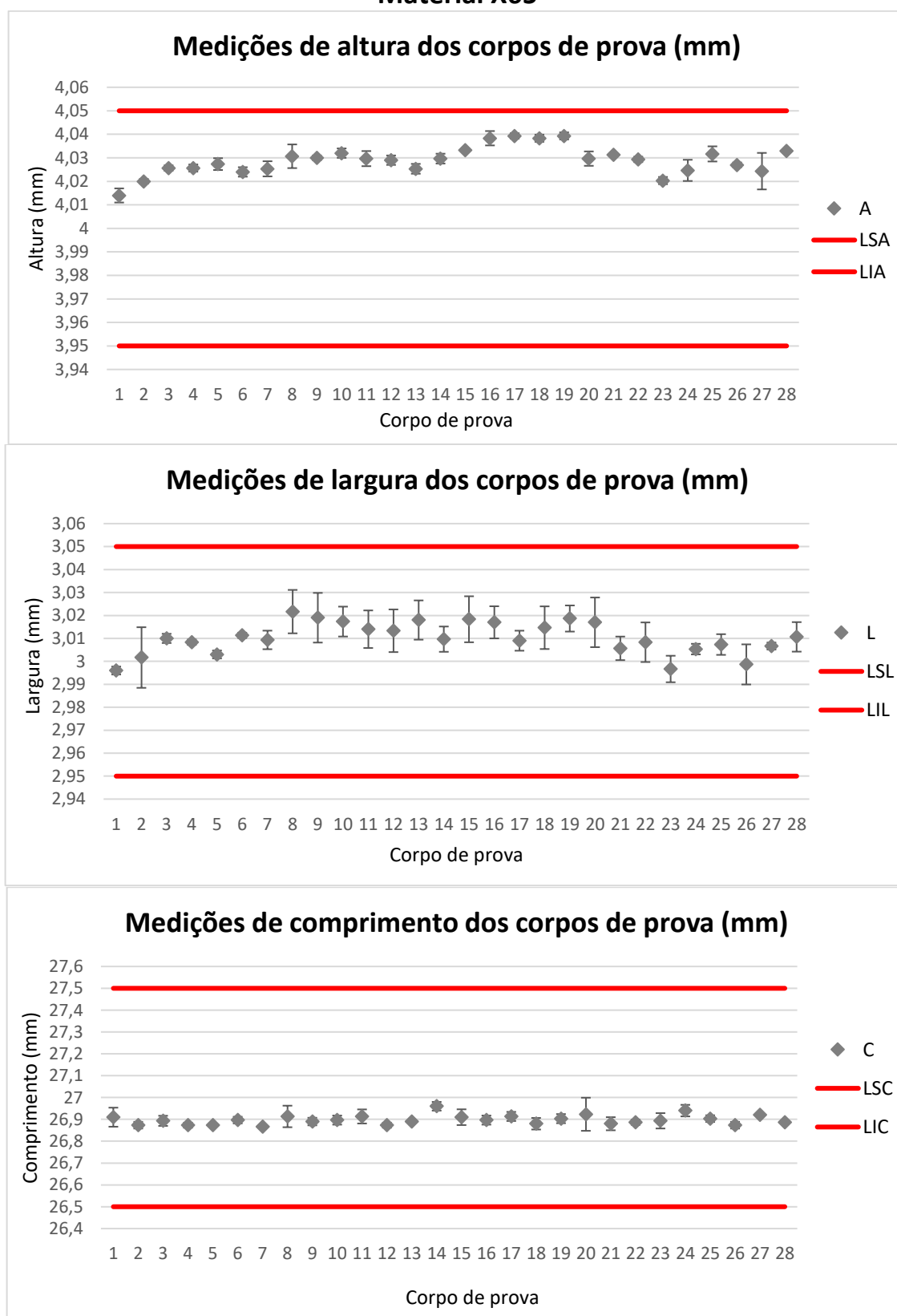


Figura 4 – Resultados da verificação dimensional dos corpos de prova miniaturizados do material API 5L X65.

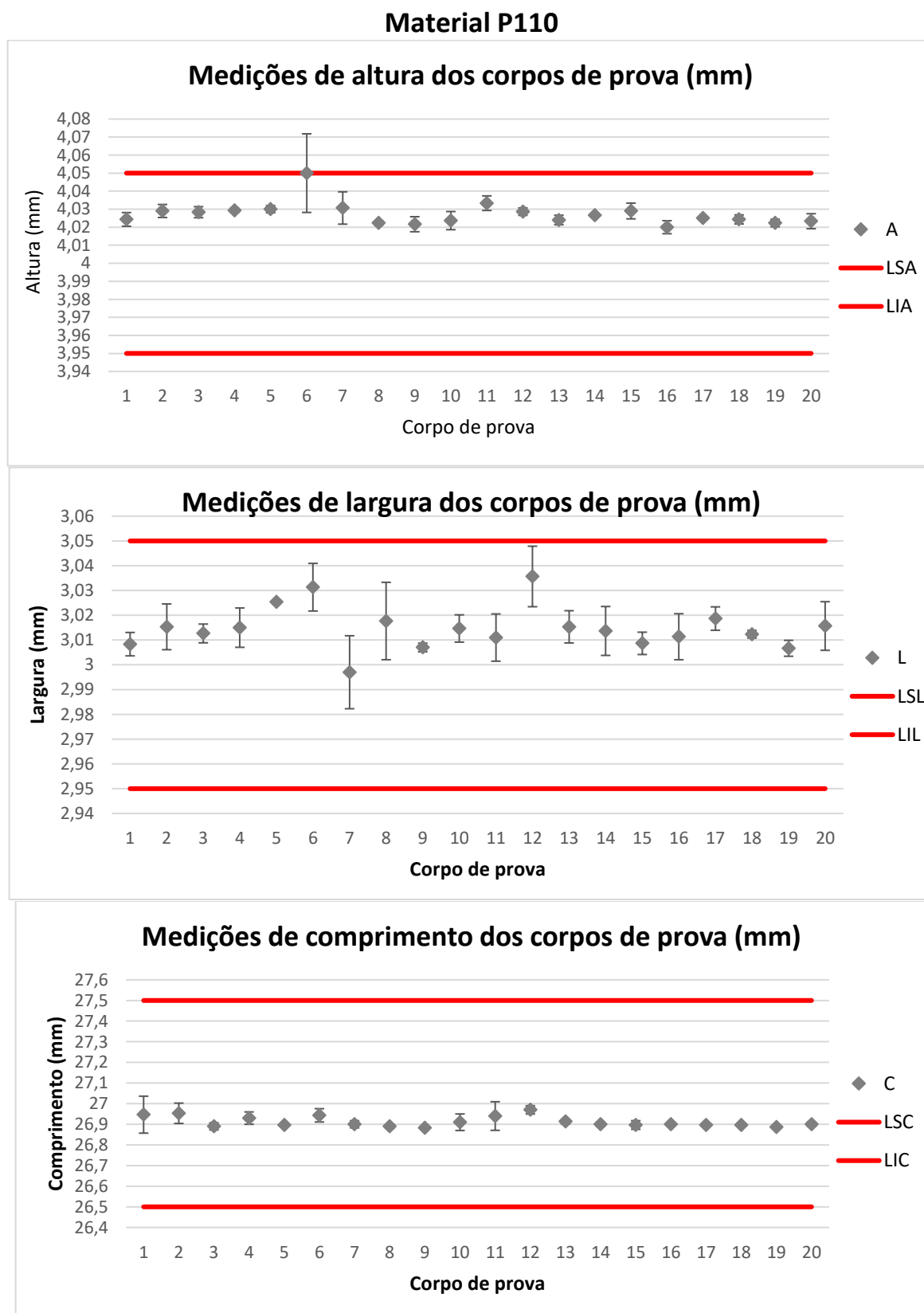


Figura 5 – Resultados da verificação dimensional dos corpos de prova miniaturizados do material P110.

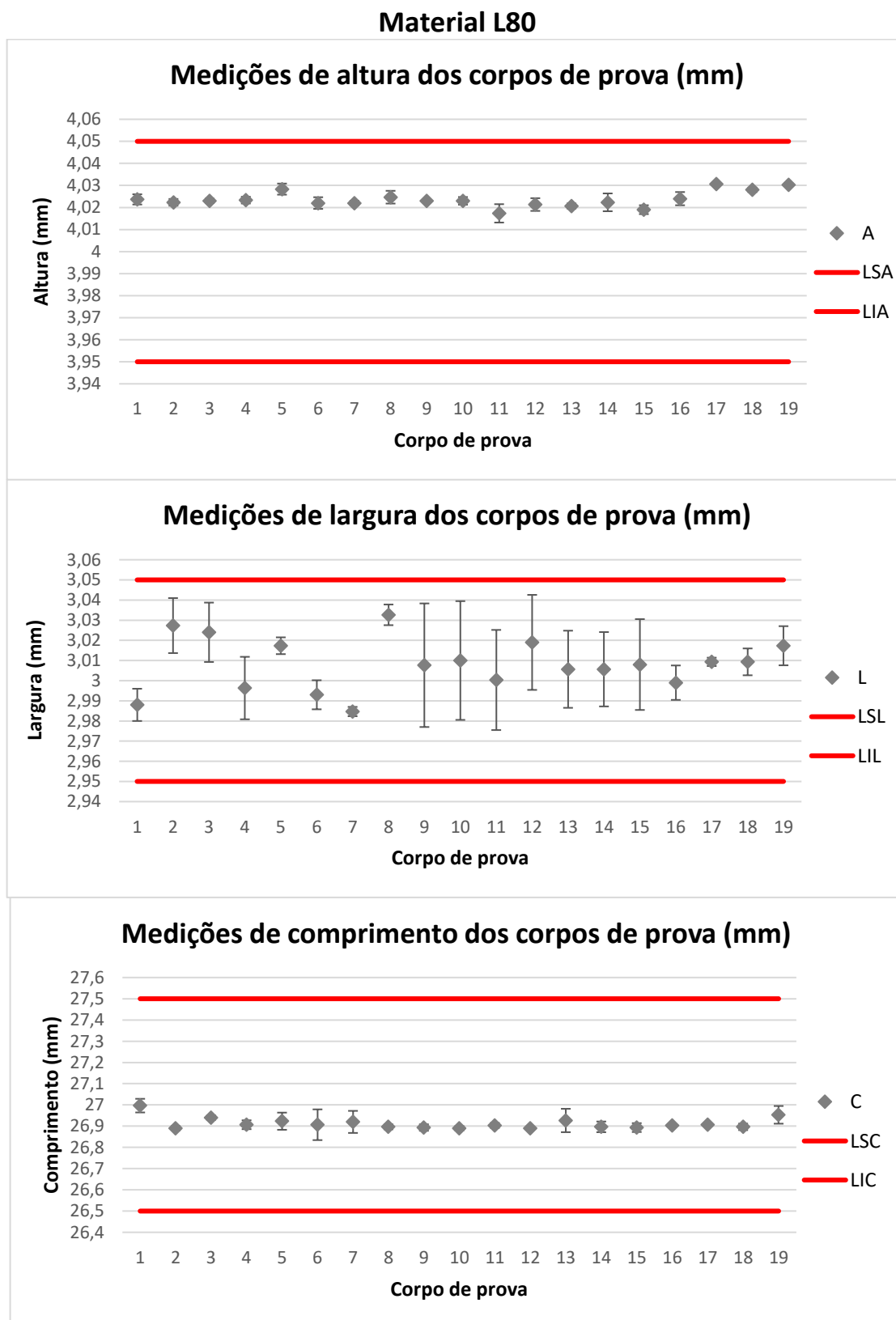


Figura 6 – Resultados da verificação dimensional dos corpos de prova miniaturizados do material L80.

Apêndice 03

Material X65

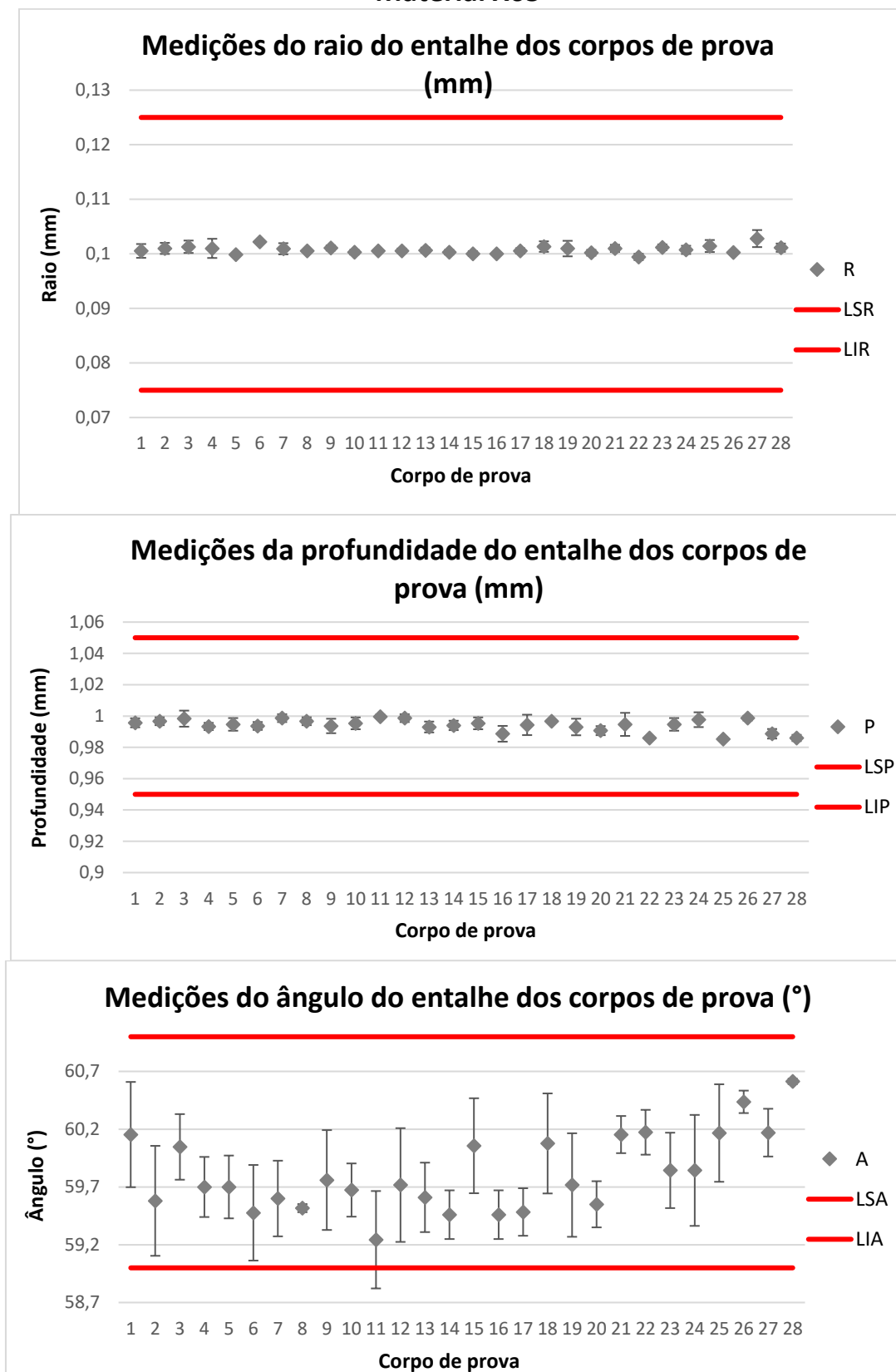


Figura 7 – Resultados da verificação dimensional do entalhe dos corpos de prova miniaturizados do material API 5L X65.

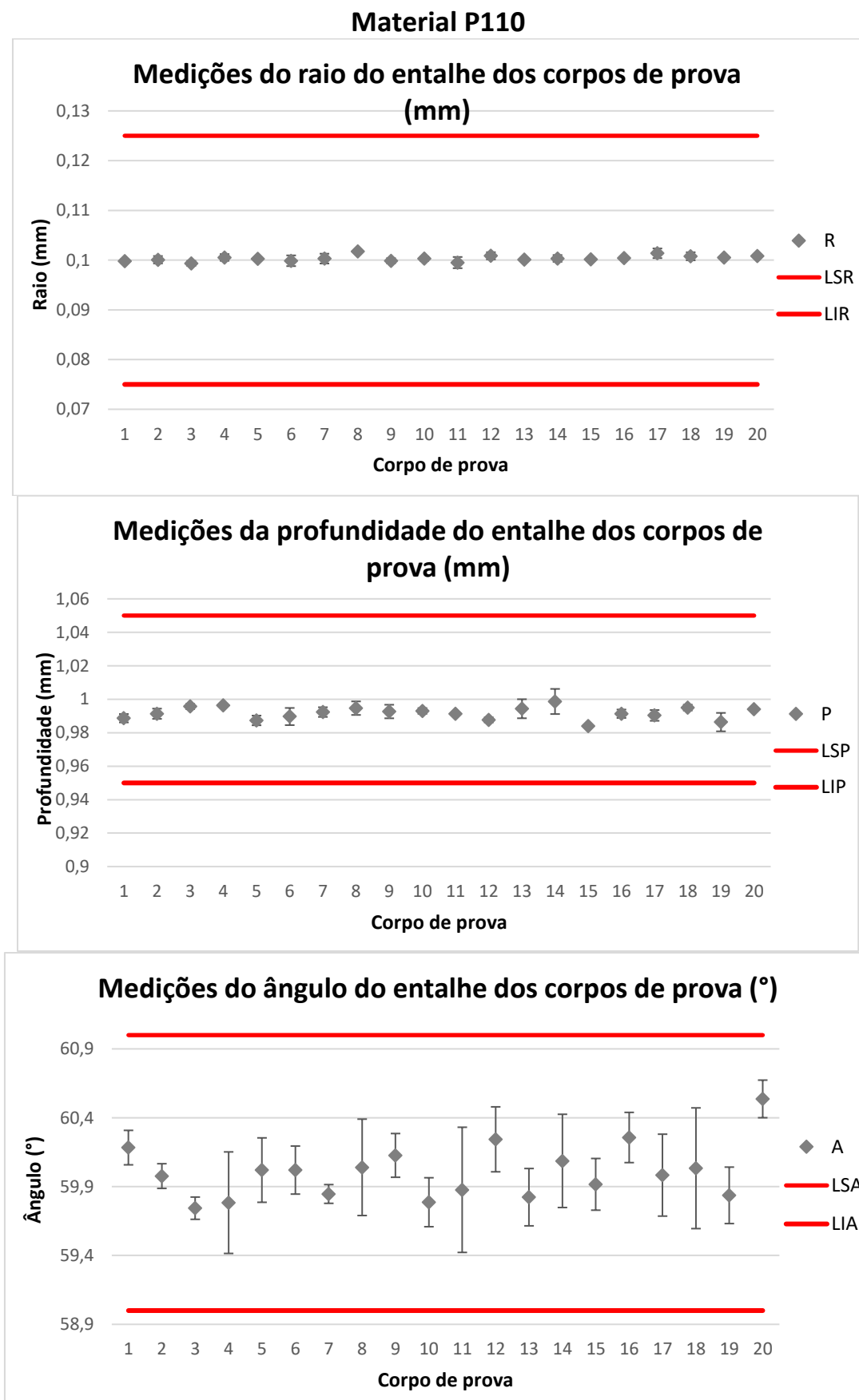


Figura 8 – Resultados da verificação dimensional do entalhe dos corpos de prova miniaturizados do material P110.

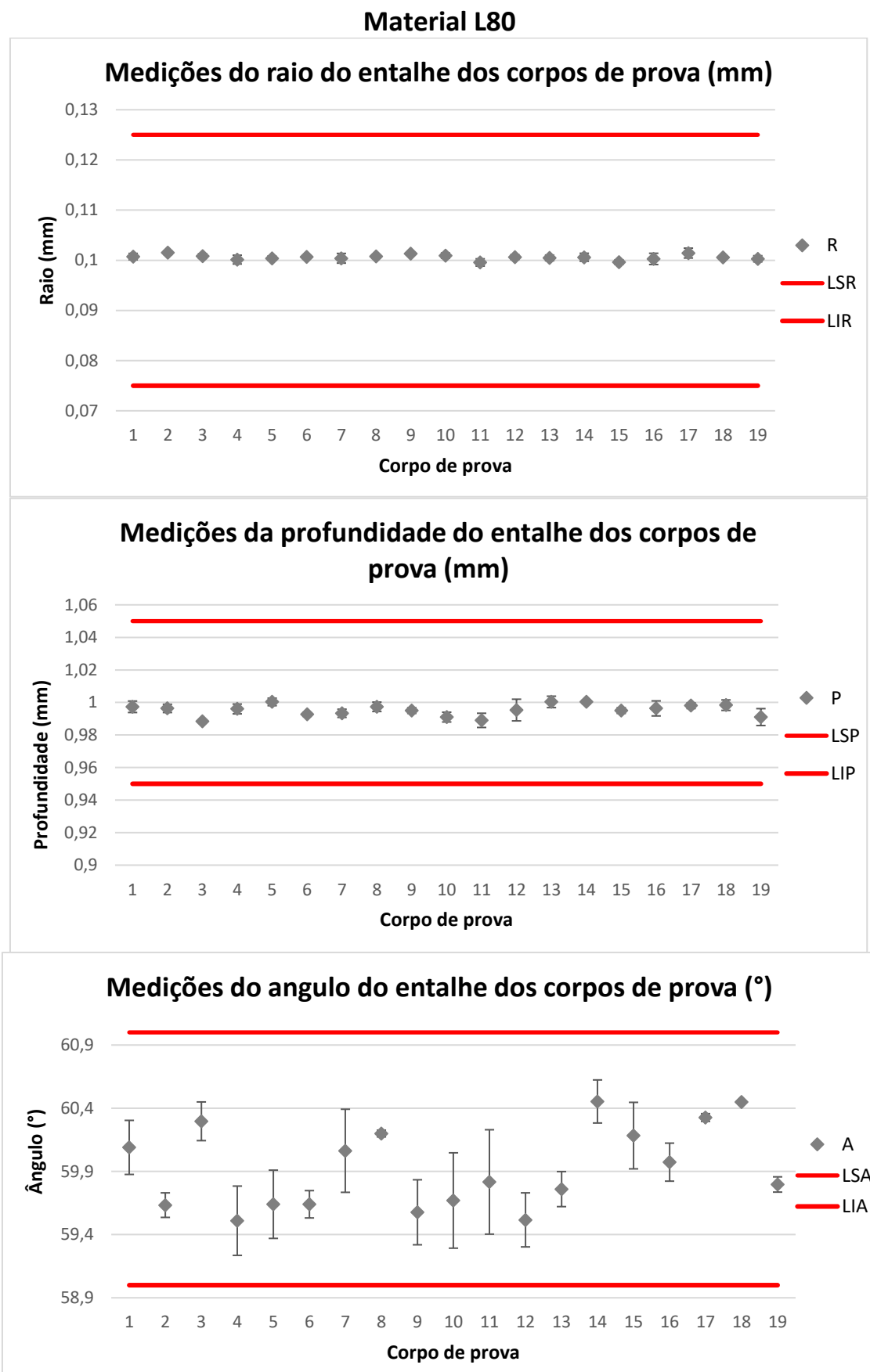


Figura 9 – Resultados da verificação dimensional do entalhe dos corpos de prova miniaturizados do material L80.

Anexo 01



Certificado de Calibração Laboratório Medição Uberlândia

Certificado: 63566/18

Data Calibração: 13/04/2018

OS: 460787-A/2018

1 / 2

Solicitante: FUNDAÇÃO DE APOIO UNIVERSITÁRIO
RUA ENGENHEIRO DINIZ, 1178, UBERLÂNDIA, MG

Contratante: O MESMO

Características do Instrumento

Descrição: **PAQUÍMETRO DIGITAL** Identificação: **PQ-02**
 Marca: MITUTOYO Modelo: CD-8" AX-B
 Nº. Serie: 500-172-30B

Condições Ambientais:

Serviço executado nas instalações permanentes do Laboratório.

Temperatura: **23,7 °C ± 1 °C** Umidade: **48 %ur ± 5%ur**

Procedimentos

Calibração Executada conforme: ITTEC006 Revisão: 3

Padrões

Identificação	Marca	Certificado	Calibrado por	Validade
PTM-0686 JOGO DE BLOCO PADRÃO	STARRETT	00569/17	MITUTOYO	02/2020

Resultados Obtidos

BATENTE

Faixa de Uso: 0,00 a 200,00 mm

Faixa de Indicação: 0,00 a 200,00 mm Resolução: 0,01 mm

V.R	V.I	Erro de Medição	Incerteza Expandida	Incerteza Expandida + Erro	(k)	Veff
mm	mm	mm	mm	mm		
10,3	10,30	0,00	0,01	0,01	2,00	Infinito
25,0	25,00	0,00	0,01	0,01	2,00	Infinito
50,0	50,00	0,00	0,01	0,01	2,00	Infinito
75,0	75,00	0,00	0,01	0,01	2,00	Infinito
100,0	100,00	0,00	0,01	0,01	2,00	Infinito
150,0	150,00	0,00	0,01	0,01	2,00	Infinito

ENCOSTO

Faixa de Uso: 0,00 a 200,00 mm

Faixa de Indicação: 0,00 a 200,00 mm Resolução: 0,01 mm

V.R	V.I	Erro de Medição	Incerteza Expandida	Incerteza Expandida + Erro	(k)	Veff
mm	mm	mm	mm	mm		
50,0	49,99	-0,01	0,01	0,02	2,00	Infinito

ORELHA

Faixa de Uso: 0,00 a 200,00 mm

Faixa de Indicação: 0,00 a 200,00 mm Resolução: 0,01 mm

V.R	V.I	Erro de Medição	Incerteza Expandida	Incerteza Expandida + Erro	(k)	Veff
mm	mm	mm	mm	mm		
50,0	50,00	0,00	0,01	0,01	2,00	Infinito

O CONTEÚDO APRESENTADO NESTE DOCUMENTO/REGISTRO TEM SIGNIFICADO RESTRITO E SE APLICA SOMENTE A ESTA SITUAÇÃO. É PROIBIDA A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DO MESMO SEM A AUTORIZAÇÃO DO EMITENTE.



Certificado de Calibração Laboratório Medição Uberlândia

Certificado: 63566/18

Data Calibração: 13/04/2018

OS: 460787-A/2018

2 / 2

VARETA

Faixa de Uso: 0,00 a 200,00 mm

Faixa de Indicação: 0,00 a 200,00 mm

Resolução: 0,01 mm

V.R	V.I	Erro de Medição	Incerteza Expandida	Incerteza Expandida + Erro	(k)	Veff
mm	mm	mm	mm	mm		
50,0	50,00	0,00	0,01	0,01	2,00	Infinito

Observações Gerais

NÃO HOUVE AJUSTE

- V.R: Valor de Referência na unidade de medição do padrão.
- V.I: Valor médio indicado no instrumento na unidade de medição do mesmo.
- A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência k, o qual para uma distribuição t com Veff graus de liberdade efetivos corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza padrão da medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.
- A condição de Aprovado/Reprovado se restringe apenas as grandezas metroológicas do instrumento, sendo que o limite de erro especificado para esta condição é de responsabilidade do Cliente.
- A operação de ajuste / regulagem não faz parte do escopo dos serviços
- A validade de calibração do instrumento, quando apresentada neste certificado, é de responsabilidade do cliente.

Endereço de Emissão: RUA DIVINO LUCAS MARTINS, 330 - SARAIVA - UBERLÂNDIA - MG
Data de emissão: 19 de abril de 2018

Assinado Eletronicamente
LEANDRO SILVA DE BASTOS
Gerente Técnico



Digitally signed by LEANDRO
SILVA DE BASTOS:09319225699
Date: 2018.04.19 17:08:01 -03:00
Reason: Certificado de Calibração
Location: Laboratorio Medicao
Uberlandia

O CONTEÚDO APRESENTADO NESTE DOCUMENTO/REGISTRO TEM SIGNIFICADO RESTRITO E SE APLICA SOMENTE A ESTA SITUAÇÃO. É PROIBIDA A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DO MESMO SEM A AUTORIZAÇÃO DO EMITENTE.

Anexo 02



Certificado de Calibração Laboratório Medição Uberlândia

Certificado: 70518/18

Data Calibração: 02/05/2018

OS: 468630-A/2018

1 / 2

Solicitante: FUNDAÇÃO DE APOIO UNIVERSITÁRIO
RUA ENGENHEIRO DINIZ, 1178, UBERLÂNDIA, MG

Contratante: O MESMO

Características do Instrumento

Descrição: MICRÔMETRO DIGITAL
Marca: MITUTOYO
Nº. Serie: 63085404

Identificação: MIC-04

Condições Ambientais:

Serviço executado nas instalações permanentes do Laboratório.

Temperatura: 20,8 °C ± 1 °C Umidade: 43 %ur ± 5%ur

Procedimentos

Calibração Executada conforme: ITTEC002

Revisão: 4

Padrões

Identificação
PTM-0685 JOGO DE BLOCO PADRAO

Marca
DIGIMESS

Certificado
01229/17

Calibrado por
MITUTOYOCAL0031

Validade
03/2020

Resultados Obtidos

DIMENSIONAL

Faixa de Uso: 0,000 a 25,000 mm

Faixa de Indicação: 0,000 a 25,000 mm

Resolução: 0,001 mm

V.R	V.I	Erro de Medição	Incerteza Expandida	Incerteza Expandida + Erro	(k)	Veff
mm	mm	mm	mm	mm		
2,5	2,502	0,002	0,001	0,003	2,00	Infinito
5,1	5,106	0,006	0,001	0,007	2,00	Infinito
7,7	7,707	0,007	0,001	0,008	2,00	Infinito
10,3	10,304	0,004	0,001	0,005	2,00	Infinito
12,9	12,904	0,004	0,001	0,005	2,00	Infinito
15,0	15,004	0,004	0,001	0,005	2,00	Infinito
17,6	17,607	0,007	0,001	0,008	2,00	Infinito
20,2	20,201	0,001	0,001	0,002	2,00	Infinito
22,8	22,805	0,005	0,001	0,006	2,00	Infinito
25,0	25,002	0,002	0,001	0,003	2,00	Infinito



Certificado de Calibração Laboratório Medição Uberlândia

Certificado: 70518/18

Data Calibração: 02/05/2018

OS: 468630-A/2018

2 / 2

Observações Gerais

NÃO HOUVE AJUSTE

- V.R: Valor de Referência na unidade de medição do padrão.
- V.I: Valor médio indicado no instrumento na unidade de medição do mesmo.
- A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência k, o qual para uma distribuição t com ν_{eff} graus de liberdade efetivos corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza padrão da medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.
- A condição de Aprovado/Reprovado se restringe apenas as grandezas metrológicas do instrumento, sendo que o limite de erro especificado para esta condição é de responsabilidade do Cliente.
- A operação de ajuste / regulagem não faz parte do escopo dos serviços
- A validade de calibração do instrumento, quando apresentada neste certificado, é de responsabilidade do cliente.

Endereço de Emissão: RUA DIVINO LUCAS MARTINS, 330 - SARAIVA - UBERLÂNDIA - MG

Data de emissão: 02 de maio de 2018

Leandro Silva de Bastos

Assinado Eletronicamente
LEANDRO SILVA DE BASTOS
Gerente Técnico



Digitally signed by LEANDRO
SILVA DE BASTOS;09319225699
Date: 2018.05.03 10:39:18 -03:00
Reason: Certificado de Calibração
Location: Laboratorio Medicao
Uberlandia

O CONTEÚDO APRESENTADO NESTE DOCUMENTO/REGISTRO TEM SIGNIFICADO RESTRITO E SE APLICA SOMENTE A ESTA SITUAÇÃO. É PROIBIDA A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DO MESMO SEM A AUTORIZAÇÃO DO EMITENTE.

