

RICARDO MARTINS SILVA

**AVALIAÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS E
VALIDAÇÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DE
JUNTAS SOLDADAS CONFORME ASME IX 2017**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

2018

RICARDO MARTINS SILVA

**AVALIAÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS E VALIDAÇÃO DA
RESISTÊNCIA MECÂNICA DE JUNTAS SOLDADAS CONFORME
ASME IX 2017**

Dissertação apresentada ao Programa
de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da
Universidade Federal de Uberlândia, como parte
dos requisitos para a obtenção do título de
MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA.

Área de Concentração: Materiais e Processos
de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Louriel Oliveira
Vilarinho

UBERLÂNDIA - MG
2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

S586a
2018

Silva, Ricardo Martins, 1984-
Avaliação de tensões residuais e validação da resistência mecânica
de juntas soldadas conforme ASME IX 2017 [recurso eletrônico] /
Ricardo Martins Silva. - 2018.

Orientador: Louriel Oliveira Vilarinho.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
Modo de acesso: Internet.
Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2018.1230>
Inclui bibliografia.
Inclui ilustrações.

1. Engenharia mecânica. 2. Tensões residuais. 3. Soldagem. 4. Raios
X - Difração. I. Vilarinho, Louriel Oliveira, 1975- (Orient.) II.
Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU: 621

Maria Salete de Freitas Pinheiro - CRB6/1262



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
Av. João Naves de Ávila, nº 2121, Bloco 1M, Sala 212 - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902
Telefone: (34) 3239-4282 - www.posgrad.mecanica.ufu.br - secposmec@mecanica.ufu.br



TERMO

ALUNO: Ricardo Martins Silva

MATRÍCULA: 11622EMC017

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Materiais e Processos de Fabricação **LINHA DE PESQUISA:** Processos de Fabricação (Usinagem e Soldagem)

PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA: NÍVEL MESTRADO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: "Avaliação de Tensões Residuais e Validação da Resistência Mecânica de Juntas Soldadas conforme ASME IX 2017"

ORIENTADOR: Prof. Dr. Louriel Oliveira Vilarinho

A Dissertação foi **APROVADA** em reunião pública, realizada na Sala de Reuniões 1M313 do Bloco 1M, Campus Santa Mônica, em 26 de outubro de 2018, às 09:15 horas, com a seguinte Banca Examinadora:

Prof. Dr. Louriel Oliveira Vilarinho

UFU

Prof. Dr. Ruham Pablo Reis

UFU

Prof. Dr. Admilson Vieira da Costa

CEFET/MG

Uberlândia, 26 de outubro de 2018



Documento assinado eletronicamente por **Admilson Vieira da Costa, Usuário Externo**, em 26/10/2018, às 11:14, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ruham Pablo Reisr, Professor(a) do Magistério Superior**, em 26/10/2018, às 11:15, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Louriel Oliveira Vilarinho, Professor(a) do Magistério Superior**, em 26/10/2018, às 11:16, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0813047** e o código CRC **8145ECED**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Louriel O. Vilarinho pela paciência, dedicação e repasse de conhecimentos durante esta jornada.

Agradeço aos Profs. Américo Scotti e Valtair Ferraresi pelos conhecimentos transmitidos.

Agradeço aos meus pais, João e Maria, pelo constante incentivo e apoio em minha capacitação.

Agradeço à minha namorada, Lívia, pelo incentivo e motivação para que eu iniciasse e concluísse mais essa jornada.

Agradeço aos colegas do Laprosolda, pelas diversas trocas de conhecimento e contribuições, em especial ao Diandro Bailoni, Edmundo Benedetti, Leandro João da Silva e Diego Costa Correia Silva.

Agradeço aos técnicos do Laprosolda Douglas Trindade Mazer e Lazaro Henrique Alves Vieira pelos auxílios.

À Aperam, na pessoa de Wilian Labiapari, pela contribuição neste trabalho.

Agradeço a banca examinadora pela disponibilidade em contribuir com esse trabalho.

Agradeço ao programa de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica e à Universidade Federal de Uberlândia pela oportunidade oferecida.

À CAPES, CNPq e FAPEMIG pelo apoio financeiro.

SILVA, R. M. **Avaliação de Tensões Residuais e Validação da Resistência Mecânica de Juntas Soldadas conforme ASME IX 2017.** 2018. 127 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

RESUMO

O objetivo principal deste trabalho consistiu em verificar quantitativamente e qualitativamente a influência das tensões residuais na resistência mecânica de juntas soldadas baseando-se no processo de qualificação de procedimento de soldagem de acordo com a ASME IX (2017). Para tanto, adotou-se, como critérios comparativos, a mudança de variáveis essenciais (ângulo de chanfro e diâmetro de arame-eletrodo) e não essenciais (gás de proteção e temperatura de pré-aquecimento) para o processo de soldagem a arco GMAW (*Gas Metal Arc Welding*), também conhecido como MIG/MAG (*Metal Inert Gas / Metal Active Gas*). Procurou-se avaliar a influência real dessas variáveis na geração de tensões residuais e, adicionalmente, verificar o quanto afetam a resistência mecânica das juntas por meio de ensaios mecânicos destrutivos, tais como dobramento e tração. Para tais medições foi utilizado a técnica não-destrutiva de Difração de Raios-X (DRX), aliado ao tratamento da superfície por polimento eletrolítico. Com objetivo de intensificar a geração das tensões residuais, utilizou-se da relação inversamente proporcional, entre distorções e tensões residuais, restringindo a movimentação das chapas de teste durante o processo de soldagem. Como premissas de teste, manteve-se a energia de soldagem, a corrente e a deposição por comprimento de solda constantes. Os resultados obtidos para as variáveis não essenciais foram contraditórios com os esperados, de acordo com a literatura. O aumento do ângulo de chanfro diminuiu os valores de tensões residuais, enquanto que o aumento no diâmetro do arame-eletrodo mostrou-se suficientemente influente na geração de tensões residuais. As variáveis essenciais mostram resultados coerentes. A utilização de temperatura de pré-aquecimento diminuiu as tensões residuais, enquanto que o uso de um gás com maior condutividade térmica (CO₂ se comparado à mistura 75% Ar + 25% CO₂) aumenta os valores de tensões residuais. Os ensaios mecânicos mostraram menor dependência em relação as tensões residuais, obtendo valores para o limite de escoamento e tensão máxima, maiores, para a junta soldada, em relação ao metal base.

Palavras Chave: Tensões Residuais, Soldagem, GMAW, MIG/MAG, Difração de Raios-X (DRX), ASME IX, Variáveis essenciais, Variáveis não essenciais.

SILVA, R. M. **Assessment of Residual Stress and Validation of the Mechanical Resistance of Welded Joints in accordance to ASME IX 2017.** 2018. 127 f. M. Sc. Dissertation, Federal University of Uberlândia, Uberlândia.

Abstract

The purpose of this work was to verify quantitatively and qualitatively the influence of the residual stresses of the mechanical resistance of welded joints in accordance to ASME IX (2017). Then, it was adopted as comparative criterion, the essential variables (bevel angle of the Vee-groove and electrode wire diameter) and nonessential variables (shielding gas and preheat temperature) for the Gas Metal Arc Welding (GMAW), also known as MIG / MAG (Metal Inert Gas / Metal Active Gas). It was tried to evaluate the real influence of these variables on the generation of residual stresses and, in addition, to verify how much it affects the mechanical strength of the joints by means of destructive mechanical tests such as tension and bending tests. For such measurements, the non-destructive X-Ray Diffraction (XRD) technique was used, allied to the treatment of the surface by electrolytic polishing. In order to intensify the generation of residual stresses, it was used the inversely proportional ratio between distortions and residual stresses, restricting the movement of test plates during the welding process. As test premises, the heat input, current and deposition by constant welding length remained. The results obtained for the nonessential variables were contradictory with the expected ones, according to the literature. The increase in the bevel angle decreased the residual stresses, whereas the increase in the electrode wire diameter proved to be sufficiently influential in the generation of residual stresses. The essential variables show consistent results. The addition of the preheat temperature decreased the residual stresses, while the use of a gas with higher thermal conductivity (CO₂ compared to the 75% Ar + 25% CO₂ mixture) increases the residual stress values. The mechanical tests showed less dependence on the residual stresses, obtaining values for the Yield Strength and Tensile Strength, greater, for the welded joint, in relation to the base metal.

Keywords: Residual Stress, Welding, GMAW, MIG/MAG, X-Ray Diffraction (XRD), ASME IX, Essential Variables, Nonessential Variables

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Efeito da Energia de soldagem sobre a diluição. Adaptado de Welding Handbook (1998)	6
Figura 2.2 - Distribuição de temperatura no plano xz em torno da poça de fusão para (a) metal com alta condutividade térmica (Cobre) e (b) metal com baixa condutividade térmica (Aço Inoxidável). Fonte: (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2006)	7
Figura 2.3 - Distribuição de temperatura no plano xz em torno da poça de fusão para chapas de aço carbono de (a) 5 mm, (b) 10 mm e (c) 20 mm de espessura. Energia de soldagem: 0,6 kJ/mm. Fonte: (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2006).....	8
Figura 2.4 - Remoção de calor para diferentes tipos de juntas. Fonte: (ARAÚJO, 2012)	8
Figura 2.5 - Velocidades de resfriamento para diferentes Energias de Soldagem com 25 °C de preaquecimento. Fonte: (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2006)	9
Figura 2.6 - Velocidades de resfriamento para diferentes temperaturas de pré-aquecimento com mesma energia de soldagem (0,6 kJ/mm). Fonte: (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2006)	10
Figura 2.7 - Principais tipos de distorções em soldagem. Adaptado de Masubuchi (1980) ..	11
Figura 2.8 - Relação entre o volume do cordão de solda e a distorção causada. Fonte (ARAÚJO, 2012).....	12
Figura 2.9 - Influência da velocidade de soldagem (Vs), energia imposta e penetração (a) na distorção angular. Proposto por Kuz'minov, adaptado de Radaj (2003)	12
Figura 2.10 – Distorção angular em aços, dependendo do calor imposto relacionado com o quadrado da espessura e diferentes dimensões de cordões de solda. Proposto por Okerblom, adaptado de Radaj (2003)	13
Figura 2.11 - Contração transversal durante soldagem e resfriamento para várias espessuras (h) e larguras de chapas (L) em juntas de topo sem travamentos. Adaptado de Masubuchi (1980)	14
Figura 2.12 - Influência da geometria da chapa em relação a deformação por flambagem. Adaptado de Radaj (2003).....	14
Figura 2.13 - Representação esquemática da relação entre distorções e tensões residuais relacionadas ao grau de restrição da junta soldada. Fonte: (ALMEIDA, 2012).....	15
Figura 2.14 - Tensão residual transversal em soldagem causada por (a) travamento da contração transversal e (b) travamento da distorção angular e (c) travamento da contração transversal e distorção angular simultaneamente. Fonte: (RADAJ, 2003).....	16
Figura 2.15 - Diagrama esquemático de tensões (a) Chapa soldada (b) Variação de tensão em diferentes posições e (c) Variação de temperatura em diferentes posições. Adaptado de IDC (2017)	17

Figura 2.16 - Efeito da temperatura na tensão e deformação durante soldagem. Adaptado de IDC (2017)	18
Figura 2.17 - Tipos de tensões segundo suas escalas. Fonte: (WITHERS; BHADESHIA, 2001)	19
Figura 2.18 - Diferenças nas taxas de resfriamento numa junta soldada, superfícies superior e inferior e metal de base. Adaptado de IDC (2017)	20
Figura 2.19- Distribuição de tensões (a) Longitudinais e (b) Transversais. Fonte: (ARAÚJO, 2012)	21
Figura 2.20 - Distribuição de tensões ao longo do cordão de solda. Fonte (ARAÚJO, 2012)	21
Figura 2.21 - Distribuição de tensões ortogonais. Fonte: (ARAÚJO, 2012)	22
Figura 2.22 - Ilustração da localização típica de juntas soldadas das Categorias A, B, C e D. Fonte: (ASME VIII - DIV1, 2017)	23
Figura 2.23 - Tensões de membrana e de flexão em um cilindro submetido a pressão interna. Fonte: (TELLES, 2001)	23
Figura 2.24 - Comparativo entre alguns dos mais utilizados métodos de medição de tensões residuais. Adaptado de Fitzpatrick et al. (2005) apud Schajer (2013)	26
Figura 2.25 - Difração de Raios-X por um cristal. Fonte: (CULLITY; STOCK, 2001)	31
Figura 2.26 - Esquema de difração de uma estrutura cristalina (a) sem tensão aplicada e (b) sob tensão trativa devido a aplicação de uma carga. Adaptado de Schajer (2013)	32
Figura 2.27 - Figura esquemática mostrando os principais ângulos e rotações utilizados para medição de tensão residual por DRX. Adaptado de Fitzpatrick et al. (2005)	32
Figura 2.28 – Modelo elástico do plano de tensões. Fonte: (PREVÉY, 1986)	33
Figura 2.29 - Tipos de gráficos $d_{\psi} \times \text{sen}^2\psi$ comumente encontrados nas medições de tensões residuais. (a) e (b) exibem comportamento regular, explicado pela Eq. (2.2), enquanto (c) exibe um comportamento irregular não valendo a mesma. Fonte: (SCHAJER, 2013)	34
Figura 2.30 - Interação idealizada entre corrente-tensão para polimento eletrolítico. Adaptado de Fitzpatrick et al. (2005)	35
Figura 2.31 - Esquema típico de um equipamento de soldagem GMAW. Fonte: (SCOTTI; PONOMAREV, 2008)	39
Figura 2.32 - Tipos mais usuais de juntas de soldagem. Fonte: (MODENESI, 2008)	47
Figura 2.33 - Alguns tipos de chanfro. Fonte: (MODENESI, 2008)	48
Figura 2.34 - Variação da deformação com a variação do ângulo de chanfro para (a) "meio V" e (b) "V". Adaptado de Reddy; Swamy (2013)	49

Figura 2.35 - Diferenças de distorções transversais com diferentes diâmetros de arames-eletrodo (de) e tipos de chanfros (a) e (b) chanfros em “meio-V” e (c) e (d) chanfros em “V”. Adaptado de Reddy; Swamy (2013)	50
Figura 2.36 - Diagrama esquemático do efeito da energia de soldagem nas Tensões Residuais (TR). Adaptado de: Totten; Howes; Inoue (2002).....	51
Figura 2.37 - Efeito dos parâmetros de soldagem (Corrente e Tensão) na densidade de energia imposta (J/mm ² s). Adaptado de Radaj (1992)	52
Figura 2.38 - Distribuição de tensões residuais transversais, verificando o efeito da energia de soldagem pelo efeito da variação da corrente. Fonte: (OLIVEIRA, 2008)	53
Figura 2.39 - Distribuição de tensões residuais transversais, verificando o efeito da energia de soldagem pelo efeito da variação da velocidade de soldagem. Fonte: (OLIVEIRA, 2008) ...	53
Figura 3.1 - Desenhos de juntas a serem utilizados	59
Figura 3.2 - Sequência esquemática das atividades	60
Figura 3.3 - Imagem do equipamento de polimento eletrolítico (mepBLITz DC i5). Fonte: (“Weldgina”, 2018)	61
Figura 3.4 - Fotos do equipamento de medição de tensão residual. À esquerda a estação de trabalho (<i>Workstation</i>) e à direita o difratômetro	62
Figura 3.5 - Figura do equipamento universal de testes marca Shimadzu AG-X 300kN. Fonte: (“Shimadzu”, 2018)	62
Figura 3.6 - Desenho do suporte de travamento com espessura de 12,7 mm (1/2 in).....	63
Figura 3.7 - Desenho da chapa utilizada como gabarito de furação e como reforço no sistema de travamento com espessura 6,35 mm (1/4 in)	64
Figura 3.8 - Desenho do reforço do sistema de travamento fabricado com cantoneiras	64
Figura 3.9 - Desenho do sistema de travamento.....	65
Figura 3.10 - Sequência de aperto durante travamento das chapas de teste.....	66
Figura 3.11 - Desenho esquemático mostrando as posições de medições para validação do sistema de travamento.....	67
Figura 3.12 – Desenho esquemático mostrando a região onde foi realizado o polimento eletrolítico (região retangular) e locais de medição de tensão residual (círculos).....	69
Figura 3.13 - Desenho com localização dos corpos de teste para ensaios mecânicos	70
Figura 3.14 - Corpo de prova de uma junta soldada, quanto a tração, fabricado conforme ASME IX (2017).....	71
Figura 3.15 - Corpo de prova do metal de base, quanto a tração, fabricado conforme ASTM E8 / E8M-16A (2016)	71
Figura 4.1 - Teste de tração realizado para caracterização do metal base	73

Figura 4.2 - Gráficos mostrando as tensões residuais medidas durante teste preliminar: superior mostra tensão residual medida na face e inferior mostra tensão residual medido na raiz.....	75
Figura 4.3 - Desenho do sistema de travamento utilizando no teste preliminar.....	76
Figura 4.4 - Ilustração do dano no detector do difratômetro	77
Figura 4.5 - Resultado do teste de tração no cordão de solda preliminar, onde as linhas auxiliares mostram a deformação a 0,02% (para encontrar o Limite de Escoamento) e deformação total	79
Figura 4.6 - Imagem dos corpos de prova à tração para o teste preliminar, com destaque para a região da fratura	80
Figura 5.1 - Tela do software Curto, versão 5, com resultados e oscilograma de tensão.....	83
Figura 5.2 - Tela do software Curto, versão 5, com resultados e oscilograma de corrente ..	83
Figura 5.3 - Imagens com diferentes tipos de ruptura no Metal de Solda para diferentes condições de soldagem	88
Figura 5.4 - Macrografias das condições de soldadas (Para escala, utilizar espessura da chapa de 3/16 in ou 4,7625 mm)	90
Figura 5.5 - Gráfico comparativo entre as condições 45-Ø1,0-Tamb-C25 e 60-Ø1,0-Tamb-C25	93
Figura 5.6 - Gráfico comparativo entre as condições 45-Ø1,0-Tamb-C25 e 45-Ø1,2-Tamb-C25	94
Figura 5.7 - Gráfico comparativo entre as condições 45-Ø1,0-Tamb-C25 e 45-Ø1,0-T150-C25	94
Figura 5.8 - Gráfico comparativo entre as condições 45-Ø1,0-Tamb-C25 e 45-Ø1,0-Tamb-CO2	95
Figura 5.9 - Medição das posições superiores das chapas durante verificação de deformação	96
Figura 5.10 - Deslocamentos verticais transversalmente ao cordão de solda	98

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Energia de soldagem segundo QW-409.1. Adaptado de ASME IX (2017)	5
Tabela 2.2 - Equações para cálculo de potências. Fonte: (ARAÚJO, 2012)	5
Tabela 2.3 - Valores de coeficiente de remoção de calor. Fonte: (TUŠEK et al., 2003) apud (ARAÚJO, 2012).....	9
Tabela 2.4 - Força resistente de cálculo em juntas soldadas. Fonte: (ABNT NBR 8800, 2008)	22
Tabela 2.5 - Quadro de combinações de ligas e seus fluidos sensibilizantes, quanto a corrosão sob tensão. Fonte: (WELDING HANDBOOK, 1998)	25
Tabela 2.6 - Quadro comparativo mostrando as principais características de alguns dos métodos mais utilizados para medição de tensões residuais. Fonte: (LU, 1996). apud (ARAÚJO, 2012).....	27
Tabela 2.7 - Quadro com principais vantagens e desvantagens das técnicas mais comuns de medição de tensão residual. Fonte: (ARAÚJO, 2012).....	28
Tabela 2.8 -Quadro indicativo com problemas comuns no polimento eletrolítico, com suas possíveis causas e sugestões corretivas. Adaptado de Fitzpatrick et al. (2005)	36
Tabela 2.9 - Quadro comparativo entre diferentes tipos de transferência metálica. Fonte: (FOGAGNOLO, 2011)	40
Tabela 2.10 - Quadro resumido do agrupamento de materiais de base e P-No.. Adaptado de ASME IX (2013).....	42
Tabela 2.11 - Quadro resumido do agrupamento de materiais de adição e F-No.. Adaptado de ASME IX (2013).....	44
Tabela 2.12 - Classificação para metais de adição ferrosos. Adaptado de ASME IX (2013)	44
Tabela 2.13 - Temperaturas de Preaquecimento e Interpasse Mínimas Especificadas para a Soldagem de Aços Carbono e Aços Carbono-Manganês. Fonte: (N-133, 2015).....	45
Tabela 2.14 – Temperaturas de Preaquecimento e Interpasse para Aços Cromo-Molibdênio e Aços Molibdênio. Fonte: (N-133, 2015).....	45
Tabela 3.1 - Parâmetros de soldagem ajustados	67
Tabela 3.2 - Tabela com parâmetros relativos à deposição de soldagem	68
Tabela 4.1 - Composição química do metal de base.....	72
Tabela 4.2 - Resultados do ensaio de tração realizado no metal base	73
Tabela 4.3 - Parâmetros de soldagem utilizados no teste preliminar	74
Tabela 4.4 - Tabela com valores de tensão residual medidos na face durante teste preliminar	74
Tabela 4.5 - Tabela com valores de tensão residual medidos na raiz durante teste preliminar	74

Tabela 5.1 - Parâmetros de soldagem monitorados durante a soldagem.....	82
Tabela 5.2 - Parâmetros médios de soldagem para todas as condições agrupadas	82
Tabela 5.3 - Resultados para ensaios mecânicos de dobramento de face.....	85
Tabela 5.4 - Resultados para ensaios mecânicos de dobramento de raiz.....	85
Tabela 5.5 - Resultados para ensaios mecânicos de tração	86
Tabela 5.6 - Valores médios, desvio e erro percentual dos ensaios mecânicos aprovados .	87
Tabela 5.7 - Frequências de curto-circuito para as condições realizadas	87
Tabela 5.8 - Dimensionais dos cordões de solda.....	89
Tabela 5.9 - Valores de tensões residuais medidas	90
Tabela 5.10 - Resultados das tensões residuais geradas, com as chapas ainda travadas e após destravamento	91
Tabela 5.11 - Valores médios de desnivelamento, na direção longitudinal da solda, antes e depois de soldar	96
Tabela 5.12 - Valores médios de desnivelamento, na direção transversal, paralelas à solda, antes e depois de soldar.....	96
Tabela 5.13 - Valores da largura de montagem das chapas, medidos antes e depois de soldar	97
Tabela 5.14 - Valores do comprimento de montagem das chapas, medidos antes e depois de soldar.....	97
Tabela 5.15 - Valores médios de desnivelamento, na direção longitudinal solda, sem travamento, antes e depois de se soldar.....	98

Lista de Símbolos

a - Penetração

A – Unidade de medida para corrente elétrica (Ampere)

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AISI - *American Iron and Steel Institute* (Instituto Americano de Ferro e Aços)

ASME – *American Society of Mechanical Engineers* (Sociedade Norte-americana de Engenheiros Mecânicos)

ASTM - *American Society for Testing and Materials* (Sociedade Americana para Testes e Materiais)

AV – Média do inglês *average*

AWS - *American Welding Society*

CEIIW – Carbono equivalente segundo o IIW

C25 – Mistura de gás utilizada, contendo a proporção de 75% de Ar e 25% de CO2

DRX – Difração de Raios-X

EPS – Especificação do Procedimento de Soldagem

d – Distância interplacar (nm)

DBCP – Distância entre Bico de Contato e Peça

DPC – Deslocamento de pontos coordenados

GMAW – Gas Metal Arc Welding

HV – Unidade de medida de dureza *Hardness Vickers*

I – Corrente elétrica (A)

IIW - *International Institute of Welding*

INST – Instantâneo

ISO - *International Organization for Standardization*

J – Unidade de medida para Energia (Joule)

MB – Metal de base

MIG/MAG – Metal Inert Gas / Metal Active Gas

mm – Unidade de medida de distância (milímetro)

RMS – Média quadrática do inglês *root mean square*

RQPS - Registro de Qualificação de Procedimento de Soldagem

SAE - *Society of Automotive Engineers* (Sociedade de Engenheiros Automotivos)

U – Tensão elétrica [V]

Uref – Tensão de referência utilizada para ajuste de fonte de soldagem [V]

V – Unidade de medida para tensão elétrica (Volt)

Va – Velocidade de alimentação do arame-eletrodo

Vs – Velocidade de soldagem

Wn – Largura do cordão de solda

ZAC – Zona Afetada pelo Calor

ZF – Zona Fundida [mm]

δ - Espessura da chapa [mm]

$\Delta\beta$ - Distorção angular [rad]

ε - Deformação [%]

θ - ângulo de incidência do raio-x [°]

λ - Comprimento de onda [nm]

σ_u - Tensão máxima no ensaio de tração [MPa]

σ_x - Tensão na direção X [MPa]

σ_y - Tensão na direção Y [MPa]

σ_y - Tensão no ponto do limite de escoamento [MPa]

ψ - ângulo formado entre as direções normais da superfície da amostra e do feixe de raios-X incidente na amostra [°]

Sumário

AGRADECIMENTOS	iv
CAPÍTULO I	1
1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	1
1.1. Introdução	1
1.2. Objetivos	3
CAPÍTULO II	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. Fluxo de Calor em Soldagem	4
2.2. Efeitos Mecânicos do Ciclo Térmico	10
2.2.1. Distorção em Juntas Soldadas	10
2.2.2. Tensões Residuais em Juntas Soldadas	15
2.2.3. Efeito das tensões residuais	24
2.3. Medição de Tensões Residuais	25
2.3.1. Medição de Tensões Residuais por Difração de Raios-X	29
2.3.2. Preparação das Amostras para Medição da Tensão Residual por Difração de Raios-X	34
2.3.3. Erros comuns durante medição de tensão residual por DRX	37
2.4. Procedimento de Soldagem	38
2.4.1. GMAW (Gas Metal Arc Welding)	38
2.4.2. Variáveis Essenciais	41
2.4.3. Variáveis Não Essenciais	47
2.5. Qualificação de uma Junta Soldada segundo ASME IX	54
2.5.1. Ensaios Mecânicos Destrutivos	55
2.5.2. Ensaios Não Destrutivos (END's)	56
CAPÍTULO III	58
3. METODOLOGIA	58
3.1. Premissas de testes	58
3.2. Aparato experimental	60

3.3. Sistema de travamento	62
3.4. Soldagem.....	67
3.5. Polimento eletrolítico e medição de tensão residual.....	68
3.6. Realização de ensaios mecânicos	70
CAPÍTULO IV	72
4. TESTES PRELIMINARES	72
4.1. Caracterização do metal base.....	72
4.2. Levantamento do perfil de tensão	73
4.3. Avaria no equipamento de medição de tensões residuais.....	76
4.4. Ensaio de tração	78
CAPÍTULO V	81
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	81
5.1. Remoção eletrolítica	81
5.2. Parâmetros de soldagem	81
5.3. Ensaios Mecânicos	84
5.4. Macrografias	88
5.5. Tensões Residuais.....	90
5.6. Validação do sistema de travamento.....	95
CAPÍTULO VI	99
6. CONCLUSÕES	99
CAPÍTULO VII	101
7. TRABALHOS FUTUROS.....	101
CAPÍTULO VIII	102
8. REFERÊNCIAS	102
Anexo A.....	109
Anexo B.....	111
Anexo C	113
Anexo D	116
Anexo E.....	117
Anexo F.....	120
Anexo G	121

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

1.1. Introdução

O processo de soldagem é considerado, pela NBR ISO 9001 (2001), um processo especial, isto quer dizer que a garantia da qualidade final da solda não pode ser atestada mediante inspeção do produto acabado, necessitando, assim, de inspeções por etapas, durante todo o procedimento de soldagem. Para tais inspeções a ABNT NBR-14842 (2015) estabelece os critérios e sistemática para qualificação e certificação de inspetores de soldagem. Diante disso a ISO 3834-1 (2005) prevê critérios necessários para atingir a qualidade necessária, dependendo do nível de qualidade selecionado, seja por critério de exigências do cliente ou critérios técnicos de acordo com a criticidade do produto fabricado.

Os processos de soldagem a arco, induzem grande quantidade de calor nas peças soldadas, e dessa forma, para Feng (2005) induzem significantes tensões residuais e distorções em montagens de estruturas soldadas.

Tensões residuais são aquelas tensões que poderiam existir numa peça se todas as cargas externas fossem removidas. Ocorrem não somente durante a soldagem, mas também em outros processos de fabricação (MASUBUCHI, 1980). Segundo IDC, (2017) estas tensões possuem origem devido à diferença de temperaturas e taxas de resfriamento atingidas durante o ciclo térmico de soldagem. O tipo e intensidade destas tensões variam continuamente durante os diferentes estágios da soldagem (aquecimento, fusão e resfriamento).

Para Radaj (2003) as tensões e distorções são consideradas primordiais para qualidade de junta soldada, pois podem prejudicar a fabricação eficiente, devido aos retrabalhos e reparos. Quando as distorções se tornam comprometedoras dos quesitos dimensionais ou quando as tensões residuais possam comprometer a operação confiável do componente

soldado, pois podem diminuir a vida útil da peça quando submetida à carregamento cíclico (fadiga) e ainda facilitar o aparecimento de corrosão sob tensão.

Além disto, as tensões residuais podem afetar a natureza da ruptura de materiais, tanto em ruptura frágil quanto dúctil (PANONTIN; HILL, 1996). Para Wulpi (1999) é possível, inclusive, ocorrer rompimento de peças, espontaneamente, única e exclusivamente, sob ação destas tensões, ou seja, livre de qualquer carregamento externo. Tais fatos acontecem principalmente quando da ocorrência de tensões residuais trativas, elevando o nível de tensões em regiões de baixa tenacidade e/ou próximo à concentradores de tensão.

As medições de tensões residuais são realizadas por ensaio métodos indiretos, podendo ainda ser subdivididos em ensaios destrutivos e não destrutivos. De forma que os não destrutivos são preferidos durante a fabricação por motivos econômicos de não haver a perda do componente avaliado, além disso, pode ser implementado como alguma forma de monitoramentos futuros durante paradas programadas.

Em alguns casos a exigência e/ou aplicação dos tratamentos térmicos de alívio de tensões, de forma normativamente compulsória, são restritas a aços com maiores percentuais de elementos de liga e/ou maiores espessuras de juntas soldadas. Pois nestes casos há uma maior tendência de transformações metalúrgicas tanto devido ao maior percentual de elementos de liga, quanto devido à maior velocidade de resfriamento experimentada em maiores espessuras. Maiores espessuras de materiais, provoca, também, maiores restrições a movimentação da peça/componente soldado e, consequentemente, maiores valores de tensões residuais.

A maioria dos componentes industriais possuem uniões soldadas, para a garantia da resistência mecânica destas uniões em serviço, é necessário que seja realizada uma avaliação prévia das condições de soldagem em peças de teste. Ao seguir o passo-a-passo previsto em Normas de projeto, fabricação e construção, consegue-se obter a garantia dos critérios mínimos exigidos pelas mesmas. Dessa forma os procedimentos de soldagem contêm os parâmetros a serem utilizados dentro de uma faixa de valores, de forma que se for necessário a extração desta faixa, é necessário outro procedimento.

É importante um estudo sobre tensões residuais em soldagem retrate situações reais fabris, que normalmente são baseadas em procedimentos de soldagem qualificados. A qualificação de um procedimento de soldagem visa atestar que um procedimento específico é adequado a produzir juntas soldadas com qualidade satisfatória.

Qualificações de procedimentos de soldagem são realizadas em peças pequenas, por isso não possuem por si só a capacidade de restringir a movimentação das chapas, por possuírem baixa massa. Sendo assim, a geração de tensões residuais não é potencializada

em magnitude semelhante às soldas operacionais, as quais o procedimento qualificado visa atender.

Por fim, neste trabalho optou-se por estudar a geração de tensões residuais utilizando como referência as variáveis essenciais e não essenciais, conforme a ASME IX (2017), que se trata de um Código normativo direcionado à qualificação de procedimentos de soldagem. Este Código é mandatório na qualificação de procedimentos de soldagem para aplicações tais como projetos, fabricação e montagem de vasos de pressão e tubulações. Adotou-se uma metodologia que pudesse aperfeiçoar os processos de qualificação de juntas soldadas, sem negligenciar o efeito das tensões residuais geradas pela restrição imposta a junta soldada.

1.2. Objetivos

O objetivo principal deste trabalho consiste em verificar quantitativamente e qualitativamente a influência das tensões residuais na resistência mecânica de juntas soldadas baseando-se no processo de qualificação de procedimento de soldagem, de acordo com a ASME IX (2017). Para tanto, adotar-se-á, como critérios comparativos, a mudança de variáveis essenciais e não essenciais, avaliando-se a influência real dessas variáveis na geração de tensões residuais e, adicionalmente, verificar o quanto essas tensões residuais afetam a resistência mecânica das juntas, através de ensaios mecânicos destrutivos, tais como dobramento e tração.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Segundo Araújo (2012), os processos de soldagem a arco são caracterizados pela imposição de calor localizado e de grande intensidade, causando transformações de fase e estado físico, dilatações e contrações localizadas, tensões residuais e deformações.

Tensões residuais de alta intensidade em regiões próximas ao cordão de solda podem causar fraturas frágeis, fadiga ou corrosão sob tensão em certas condições e ainda, tensões residuais e distorções compressivas podem reduzir a resistência a flambagem de elementos estruturais (MASUBUCHI, 1980).

Neste capítulo, através de revisão bibliográfica abrangente, busca-se a consolidação e aglutinação das informações relacionadas às tensões residuais.

2.1. Fluxo de Calor em Soldagem

Durante o processo de soldagem, há altos gradientes de temperatura, devido à grande geração de calor, objetivando a fusão do metal de adição (quando aplicável) e do material de base. A quantidade de energia imposta pelo arco elétrico influencia diretamente, juntamente com a difusividade térmica do material de base, no volume da poça de fusão, o tempo de solidificação, na distribuição de calor ao longo da poça de fusão e material de base e as taxas de aquecimento e resfriamento do material (ARAÚJO, 2012).

Para Masubuchi (1980), o calor imposto pelo arco de soldagem provoca ciclos térmicos complexos na junta soldada que podem causar alterações na microestrutura da Zona Afetada pelo Calor (ZAC), também causam transiente térmico e movimento de metal resultando em tensões residuais e distorções no produto final.

As condições térmicas no metal de solda e proximidades devem ser mantidas dentro de limites específicos para controle da estrutura metalúrgica, propriedades mecânicas, tensões residuais e distorções resultantes de processos de soldagem. Sendo particularmente interessante, neste contexto: taxa de solidificação do metal de solda, distribuição de temperatura de pico na ZAC, taxas de resfriamento no metal de solda e na ZAC e a distribuição de calor entre o metal de solda e a ZAC (WELDING HANDBOOK, 1998).

Uma das formas práticas mais usuais de calcular a energia durante a soldagem e consequentemente o fluxo de calor na junta soldada, é a Energia de Soldagem, que significa a quantidade de energia disponível na fonte de calor por comprimento de solda. Pode ser calculada de diferentes maneiras, conforme QW-409.1 da ASME IX (2017) mostrado na Tabela 2.1 e conforme apresentado no trabalho de Araújo (2012), por meio da Tabela 2.2.

Tabela 2.1 - Energia de soldagem segundo QW-409.1. Adaptado de ASME IX (2017)

Energia de Soldagem	
Dados Médios	$= \frac{Tensão \times Corrente \times 60}{Velocidade_Soldagem [mm/min]} [J/mm]$
Potência Instantânea	$= \frac{Potência [W] \times Tempo_soldagem [s]}{Comprimento_do_cordão [mm]} [J/mm]$
Energia Instantânea	$= \frac{Energia [J]}{Comprimento_do_cordão [mm]} [J/mm]$

Tabela 2.2 - Equações para cálculo de potências. Fonte: (ARAÚJO, 2012)

Potência	Corrente	Tensão
$P_{AV} = I_{AV}U_{AV}$	$I_{AV} = \frac{\sum_{i=1}^n I_i}{n}$	$U_{AV} = \frac{\sum_{i=1}^n U_i}{n}$
$P_{RMS} = I_{RMS}U_{RMS}$	$I_{RMS} = \left(\sum_{i=1}^n \frac{I_i^2}{n} \right)^{1/2}$	$U_{RMS} = \left(\sum_{i=1}^n \frac{U_i^2}{n} \right)^{1/2}$
$P_{INST} = \sum_{i=1}^n \frac{I_{INST}U_{INST}}{n}$	I_{INST}	U_{INST}

Onde:

P_{AV} – Potência Média;

I_{AV} – Corrente Média;

- U_{AV} – Tensão Média;
 P_{RMS} – Potência RMS;
 I_{RMS} – Corrente RMS;
 U_{RMS} – Tensão RMS;
 P_{INST} – Potência Instantânea;
 I_{INST} – Corrente Instantânea;
 U_{INST} – Tensão Instantânea.

Destaca-se que o parâmetro “Energia de Soldagem” deve ser utilizado com alguma cautela para interpretações corretas dos resultados, pois nem sempre existe uma relação direta entre a energia de soldagem e seus efeitos na peça, pois os parâmetros de soldagem (Tensão, Corrente e Velocidade de Soldagem) afetam de forma diferente a intensidade do arco. Assim, embora utilizando mesmos processos e energia de soldagem, é possível obter soldas com formatos completamente diferentes (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2006). A Figura 2.1 ilustra o efeito de mesmos valores de Energia de Soldagem para se obter diferentes diluições.

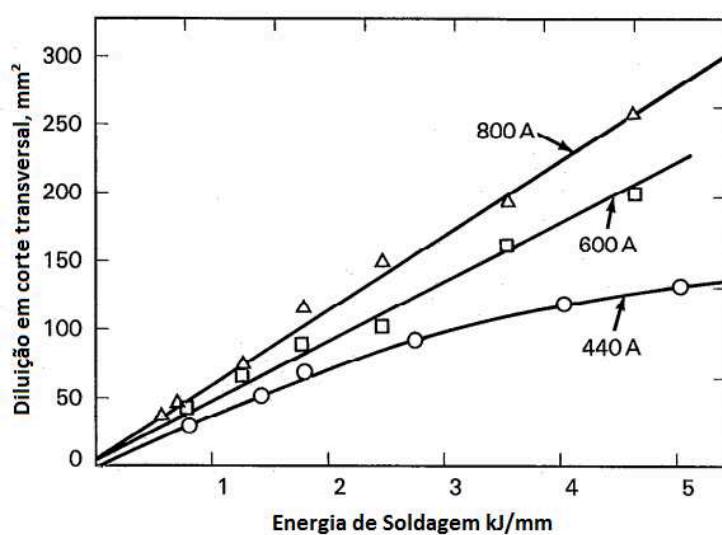


Figura 2.1 - Efeito da Energia de soldagem sobre a diluição. Adaptado de Welding Handbook (1998)

Algumas das muitas variáveis em soldagem, que podem afetar a maneira com que o fluxo de calor aconteça pela junta soldada, serão brevemente abordadas, sendo elas Condutividade Térmica da Peça, Espessura da Junta, Geometria da Junta, Energia de Soldagem e Temperatura de Pré-aquecimento.

Condutividade Térmica é a capacidade de um material em conduzir energia térmica, dessa forma, materiais com baixa condutividade térmica apresentam maiores gradientes de temperatura, sendo mais facilmente soldados por ser mais fácil de atingir sua temperatura de fusão. Na Figura 2.2 mostra-se o efeito dos diferentes fluxos de calor ao se comparar materiais com diferentes condutividades térmicas, realizado por simulação numérica.

Espessura da chapa afeta o fluxo de calor de forma proporcional, ou seja, maior a espessura da chapa maior será a condução de calor da poça de fusão para o restante da peça, com isso maiores taxas de resfriamento são obtidas, a Figura 2.3 mostra esse efeito por simulação numérica.

Tipo de junta é outra variável que afeta a taxa de resfriamento, de forma que determinadas configurações facilitam a retirada de calor da poça de fusão para o restante da peça com mais ou menos facilidade. TUŠEK et al. (2003) apud Araújo (2012) obteve alguns coeficientes de remoção de calor para diferentes configurações de tipos de junta, conforme mostrados na Figura 2.4 e Tabela 2.3.

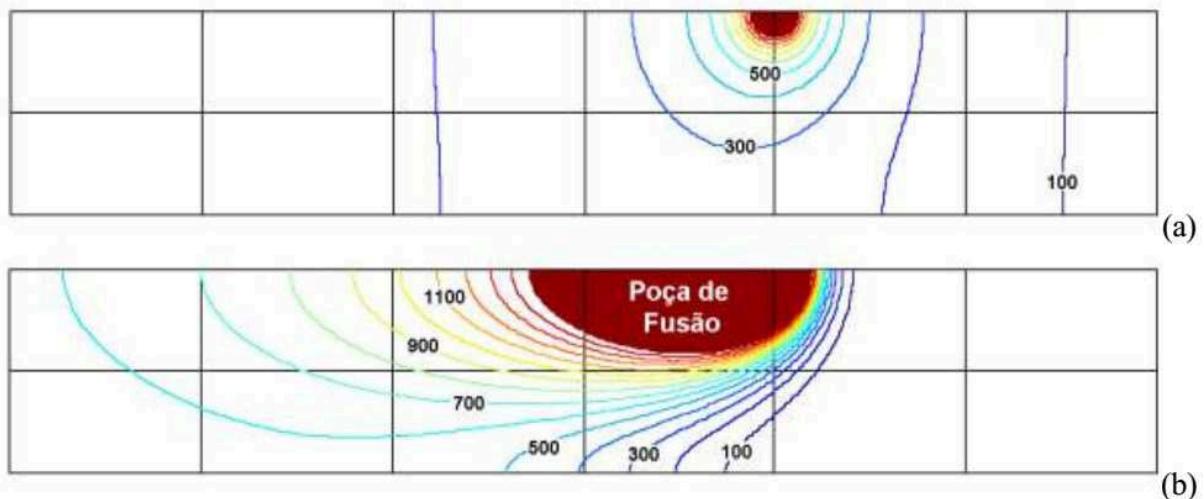


Figura 2.2 - Distribuição de temperatura no plano xz em torno da poça de fusão para (a) metal com alta condutividade térmica (Cobre) e (b) metal com baixa condutividade térmica (Aço Inoxidável). Fonte: (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2006)

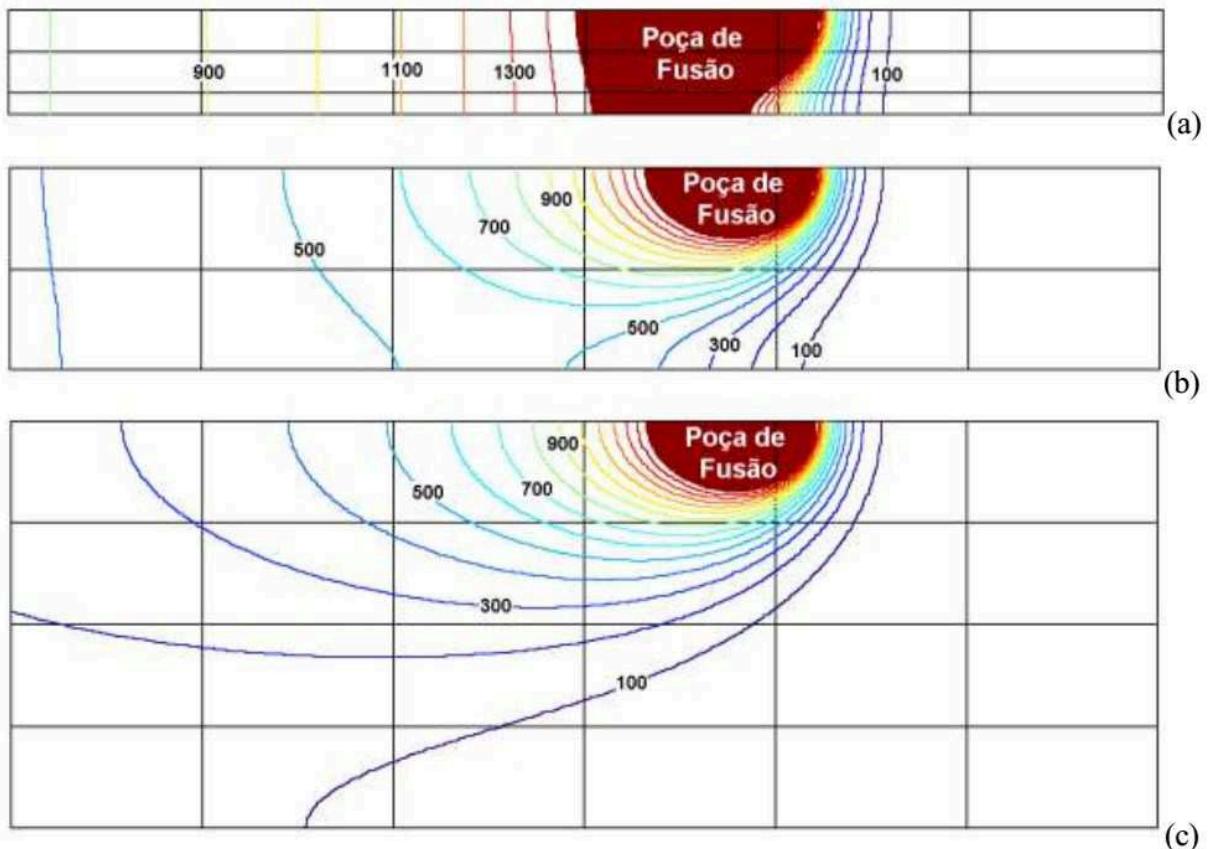


Figura 2.3 - Distribuição de temperatura no plano xz em torno da poça de fusão para chapas de aço carbono de (a) 5 mm, (b) 10 mm e (c) 20 mm de espessura. Energia de soldagem: 0,6 kJ/mm. Fonte: (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2006)

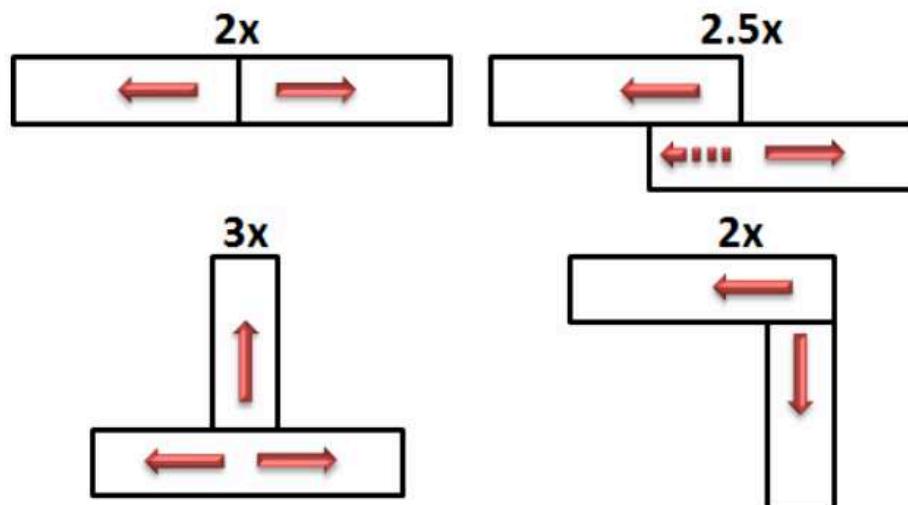


Figura 2.4 - Remoção de calor para diferentes tipos de juntas. Fonte: (ARAÚJO, 2012)

Tabela 2.3 - Valores de coeficiente de remoção de calor. Fonte: (TUŠEK et al., 2003) apud (ARAÚJO, 2012)

Tipo de Juntas	Coeficiente de Remoção de Calor
Junta de Topo	1,00
Junta de Canto	0,87
Junta Sobreposta	1,15
Junta em "T"	1,33

Energia de soldagem afeta o fluxo de calor de forma que se mais energia é imposta à peça mais tempo a mesma levará para dissipar essa energia, com isso, para mesmas configurações geométricas e propriedades físicas do material, menores taxas de resfriamento são obtidas com altas energias. Na Figura 2.5 é mostrada a variação do tempo de resfriamento quando se altera a energia de soldagem.

Temperatura de Pré-Aquecimento é a temperatura inicial em que toda a peça ou parte dela (junta a ser soldada) é submetida antes do processo de soldagem (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2006). Segundo Welding Handbook (1998), pré-aquecimento é frequentemente utilizado com o objetivo de obter menores taxas de resfriamento, pois para cada composição de aço, há uma taxa de resfriamento crítica, taxas acima desta tendem a produzir estruturas martensíticas duras. Na Figura 2.6, são apresentadas diferentes taxas de resfriamento, após diferentes temperaturas de pré-aquecimento, com mesma energia imposta.

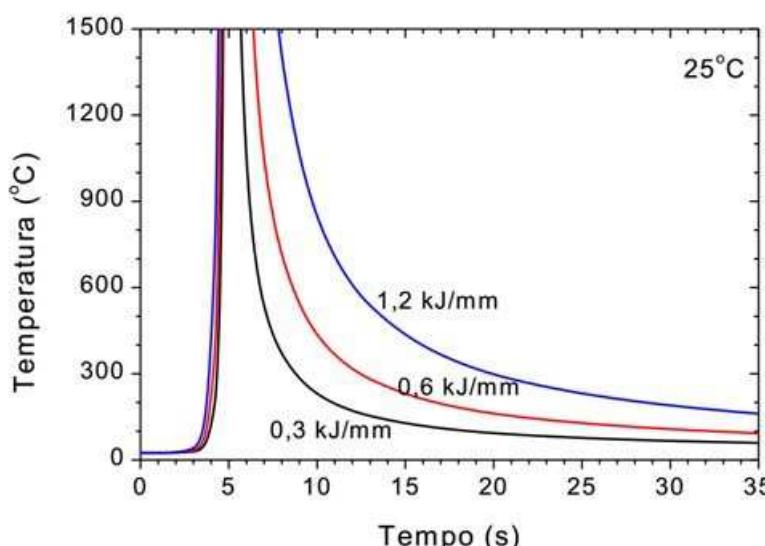


Figura 2.5 - Velocidades de resfriamento para diferentes Energias de Soldagem com 25 °C de preaquecimento. Fonte: (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2006)

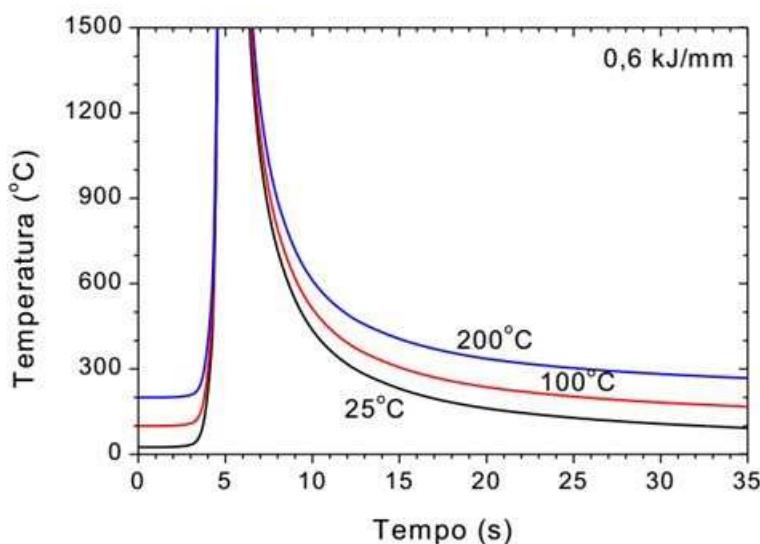


Figura 2.6 - Velocidades de resfriamento para diferentes temperaturas de pré-aquecimento com mesma energia de soldagem (0,6 kJ/mm). Fonte: (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2006)

2.2. Efeitos Mecânicos do Ciclo Térmico

Durante o ciclo térmico de soldagem (aquecimento e resfriamento), a dilatação e contração do metal pode ocorrer de forma não homogênea ao longo da peça (transversal, longitudinal ou ao longo da espessura) causando implicações na peça. Tais implicações podem se manifestar de diferentes maneiras, de acordo com o projeto, forma construtiva, parâmetros de soldagem, etc.

Dentre os efeitos mais comuns advindos do ciclo térmico de soldagem, os mais conhecidos são transformação de fase, distorções e tensões residuais. Será falado mais adiante sobre os dois últimos que possuem origens semelhantes e são tratados como origem de tensões térmicas. Enquanto que as transformações de fase são tratadas como origem metalúrgica.

2.2.1. Distorção em Juntas Soldadas

Tensões residuais e distorções são fenômenos com correlação muito próxima. Durante o aquecimento e resfriamento no ciclo de soldagem, deformações térmicas ocorrem no metal de solda e em regiões do metal de base próximos ao cordão de solda. As deformações

causadas durante o aquecimento são acompanhadas por perturbações plásticas. As tensões resultantes destas deformações combinam e reagem para produzir forças internas que causam empenamento, flambagem e rotação. Estes deslocamentos são chamados de distorção (MASUBUCHI, 1980).

Segundo Masubuchi (1980) os principais tipos de deformação, mostradas na Figura 2.7, são:

- Contração transversal (a);
- Contração longitudinal (b);
- Distorção angular (c);
- Distorção rotacional (d);
- Empenamento longitudinal (e) e;
- Distorção por flambagem (f).

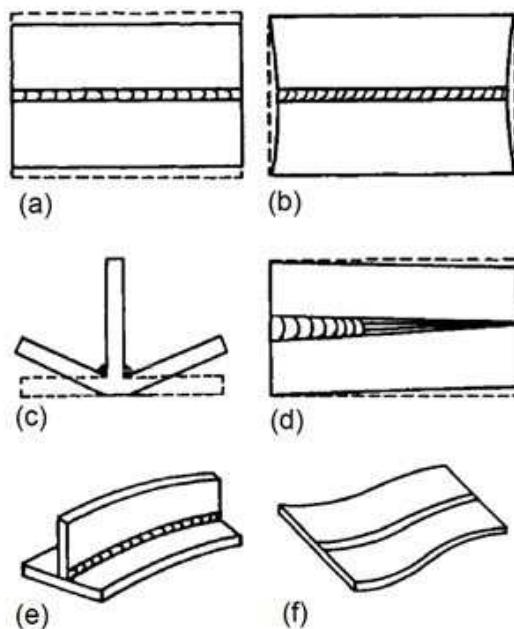


Figura 2.7 - Principais tipos de distorções em soldagem. Adaptado de Masubuchi (1980)

É importante o conhecimento de como alguns parâmetros e ajustes de soldagem influenciam na intensidade das distorções ocasionadas. A Figura 2.8 mostra a relação entre a distorção angular em relação ao ângulo de chanfro, de tal forma que quanto maior o ângulo maior é a tendência de distorção angular. Isto acontece devido ao maior volume da poça de fusão que, consequentemente, no momento da solidificação desta, tende a causar maiores trações no metal de base.

As Figuras 2.9 e 2.10 mostram a relação da distorção angular com a energia imposta. A Figura 2.9 faz relação ainda com a penetração e velocidade de soldagem. A Figura 2.10

apresenta relações da distorção angular, também relacionando com as dimensões do cordão de solda, tais como penetração, espessura da chapa e largura do cordão de solda.

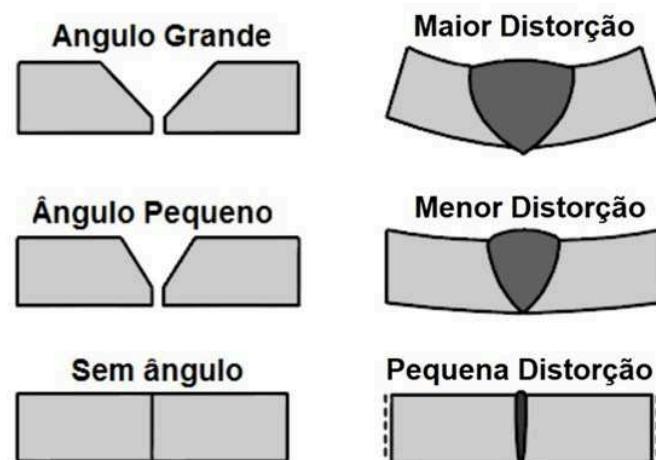


Figura 2.8 - Relação entre o volume do cordão de solda e a distorção causada. Fonte (ARAÚJO, 2012)

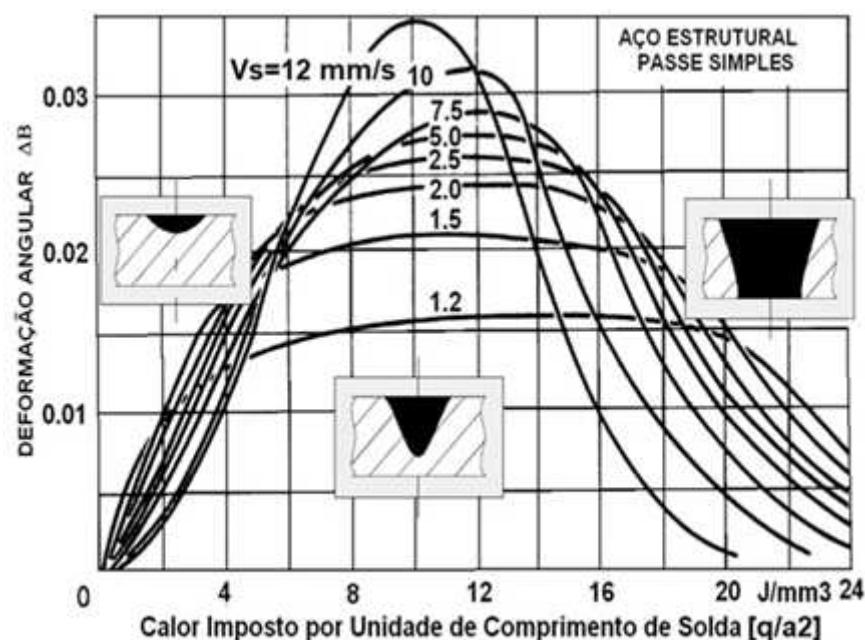


Figura 2.9 - Influência da velocidade de soldagem (Vs), energia imposta e penetração (a) na distorção angular. Proposto por Kuz'minov, adaptado de Radaj (2003)

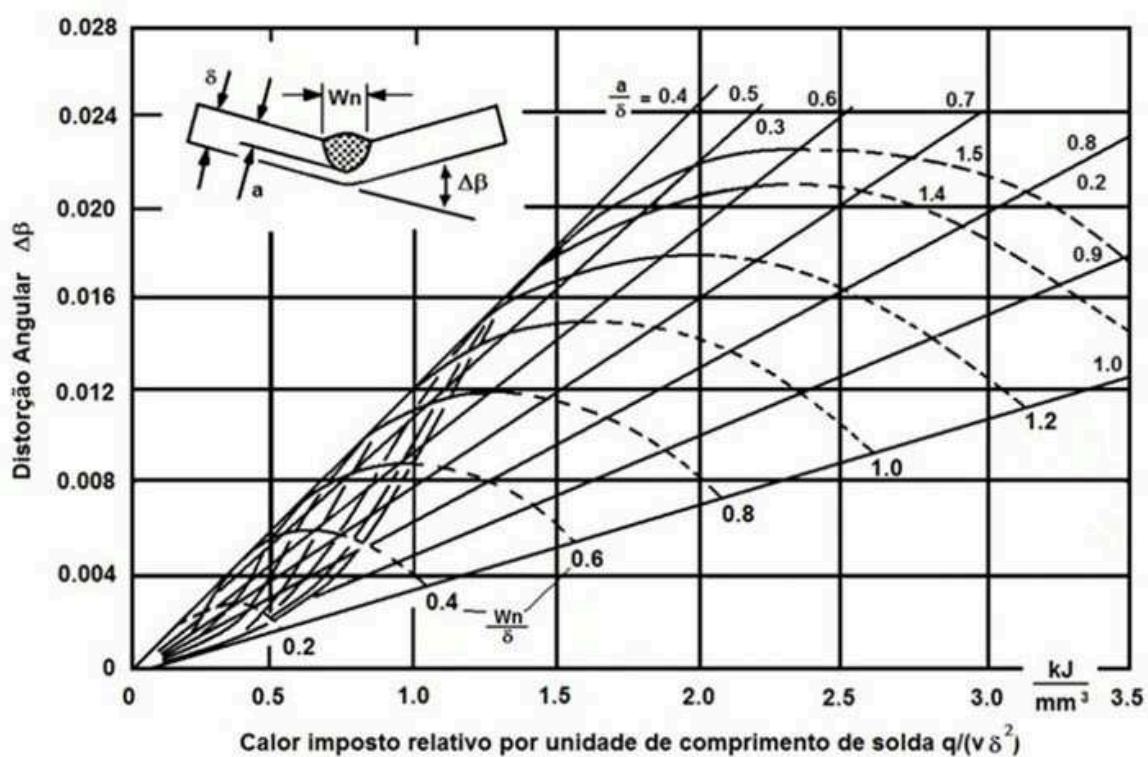


Figura 2.10 – Distorção angular em aços, dependendo do calor imposto relacionado com o quadrado da espessura e diferentes dimensões de cordões de solda. Proposto por Okerblom, adaptado de Radaj (2003)

Há ainda estudos de como prever as contrações transversais em juntas soldadas sem restrição. A Figura 2.11 mostra a variação da temperatura e contração transversal durante e após soldagem, durante tempo de resfriamento. É possível observar que para espessuras maiores a contração se inicia antes, ainda em temperaturas maiores, mas sua contração total é relativamente menor, se comparada às chapas de menores espessuras. Isto porque a restrição imposta pelo próprio material é maior quando se trata de maiores espessuras (peso próprio das chapas). Importante observar que estes dados foram realizados todos com único passe, de forma que em espessuras maiores, pode acontecer de não haver preenchimento total da junta. O efeito de multipasses será abordado adiante no Item 2.4.3.5.

Outro tipo de deformação ao qual é possível ser precavido, por estudos anteriores, é a distorção por flambagem, conforme mostra a Figura 2.12. Nota-se uma relação desta distorção com as dimensões das chapas a serem soldadas, de forma que maiores espessuras oferecem maiores rigidez e, com isso, menor risco de flambagem. Observa-se também que quanto maior a relação entre a largura e o comprimento da chapa apresentam maiores tendências de flambagem.

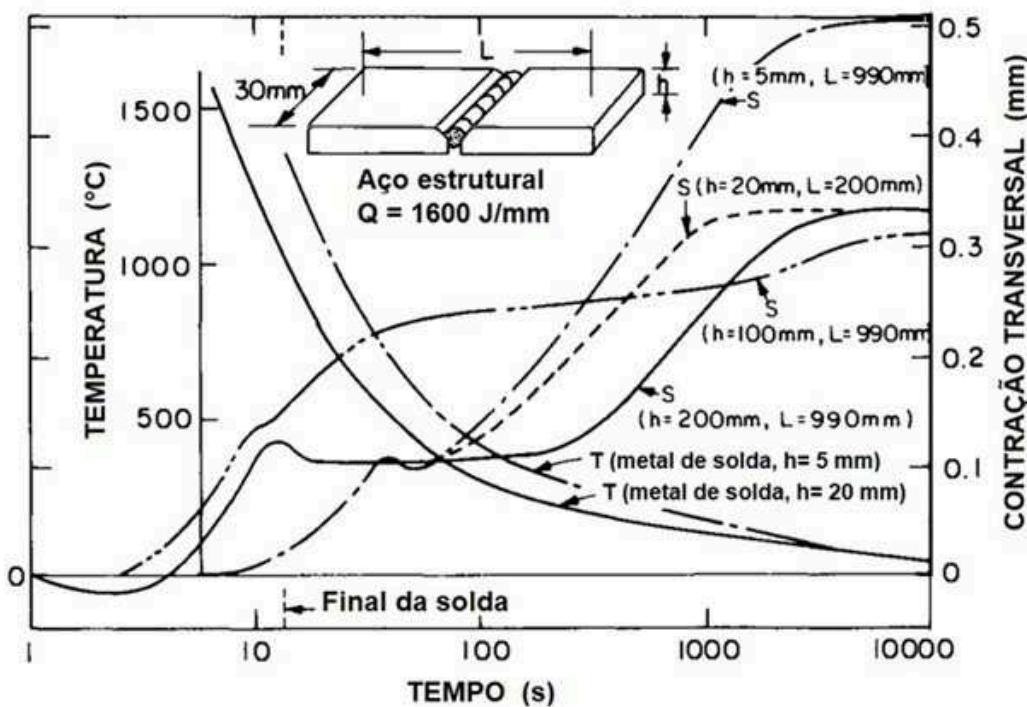


Figura 2.11 - Contração transversal durante soldagem e resfriamento para várias espessuras (h) e larguras de chapas (L) em juntas de topo sem travamentos. Adaptado de Masubuchi (1980)

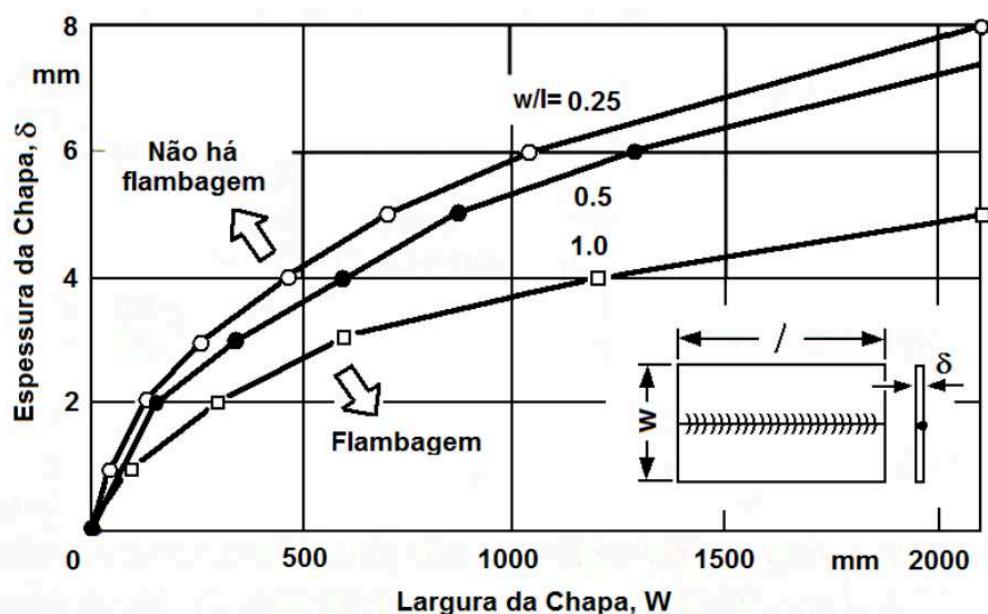


Figura 2.12 - Influência da geometria da chapa em relação a deformação por flambagem. Adaptado de Radaj (2003)

2.2.2. Tensões Residuais em Juntas Soldadas

Tensões residuais são aquelas tensões que poderiam existir numa peça se todas as cargas externas fossem removidas. Ocorrem não somente durante a soldagem, mas também em outros processos de fabricação (MASUBUCHI, 1980).

Como já mencionado anteriormente, a origem das tensões residuais está intimamente correlacionada com a origem das distorções, ou seja, as tensões residuais aparecem quando há restrição de deformações. Almeida (2012) mostrou esquematicamente a relação entre distorção e tensão residual ao variar o grau de restrição da junta soldada, conforme Figura 2.13.

A Figura 2.14 mostra o efeito da restrição das deformações por contração transversal e distorção angular na geração de tensões residuais transversais. Tal efeito acontece pelo fato da restrição impedir os movimentos de dilatação e contração durante o ciclo térmico de aquecimento e resfriamento. É possível ainda observar uma maior tendência de ocorrer a distorção por flambagem em situações muito restritivas.

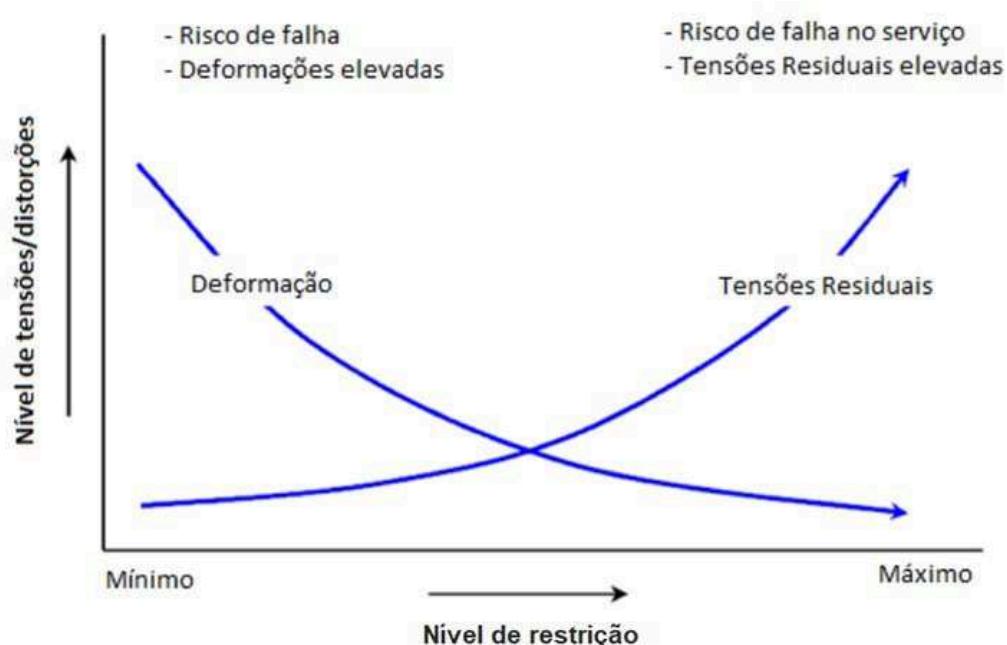


Figura 2.13 - Representação esquemática da relação entre distorções e tensões residuais relacionadas ao grau de restrição da junta soldada. Fonte: (ALMEIDA, 2012)

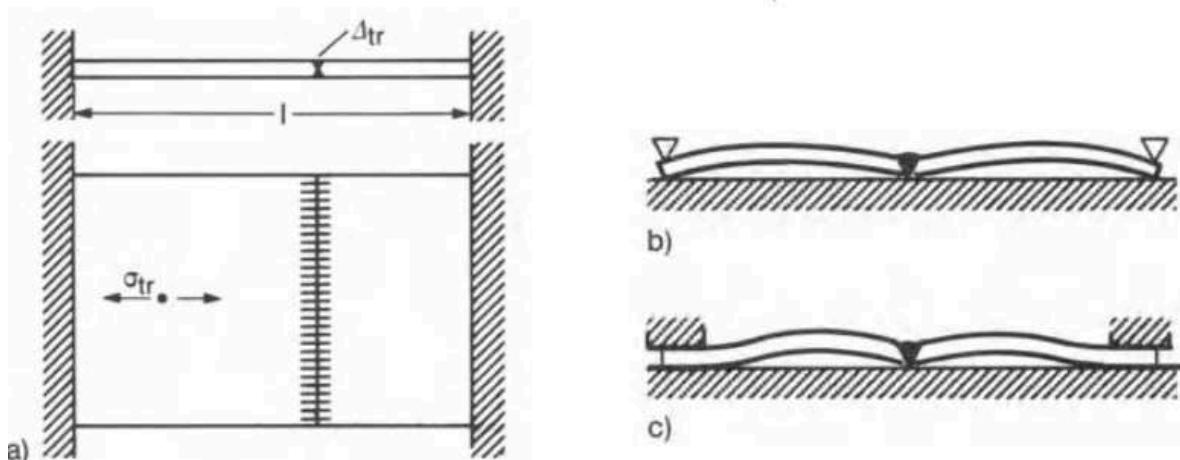


Figura 2.14 - Tensão residual transversal em soldagem causada por (a) travamento da contração transversal e (b) travamento da distorção angular e (c) travamento da contração transversal e distorção angular simultaneamente. Fonte: (RADAJ, 2003)

As tensões residuais numa junta soldada possuem origem devido à diferença de temperaturas e taxas de resfriamento atingidas durante o ciclo térmico de soldagem (IDC, 2017). O tipo e intensidade destas tensões variam continuamente durante os diferentes estágios da soldagem (aquecimento, fusão e resfriamento). Durante aquecimento gera-se tensões compressivas no metal de base devido a dilatação do metal de adição e metal base próximo a poça de fusão, o metal de base mais distante da poça oferece restrição devido a menor temperatura em seu entorno. Conforme a temperatura aumenta, até próximo a temperatura de pico, o limite de escoamento do metal vai diminuindo, diminuindo assim sua resistência e consequentemente a resistência a dilatação do metal aquecido. Dessa forma a tensão compressiva diminui gradualmente até atingir o valor nulo, quando o metal é fundido (metal líquido não possui resistência). Após isso o metal inicia o processo de resfriamento, no qual o metal líquido começa a se solidificar e diminuir sua temperatura, nesse momento duas situações ocorrem simultaneamente, o limite de escoamento do metal volta a aumentar e o metal solidificado passa a se contrair, processo inverso ao do aquecimento. Dessa forma, após deformação durante o estado líquido do metal, a zona fundida agora é submetida a tensões trativas pelo metal de base, já que a zona fundida tende a se contrair e é restringida pelo metal de base. Este fenômeno é sintetizado nas Figura 2.15 e Figura 2.16.

As tensões residuais podem afetar de forma diferente o desempenho de uma junta soldada, de acordo com sua natureza, tensão trativa ou compressiva, podendo facilitar ou dificultar o aparecimento e propagação de falhas devido ao carregamento externo, pois, segundo Donato (2008) *apud* Cofiño (2010), seu efeito é de natureza ordinária. Nesse sentido, tensões residuais compressivas diminuem a tendência de falha de componentes solicitados

sob tração, principalmente devido à redução nos esforços resultantes atuantes (tensão resultante no componente: tensões externas \pm tensões residuais).

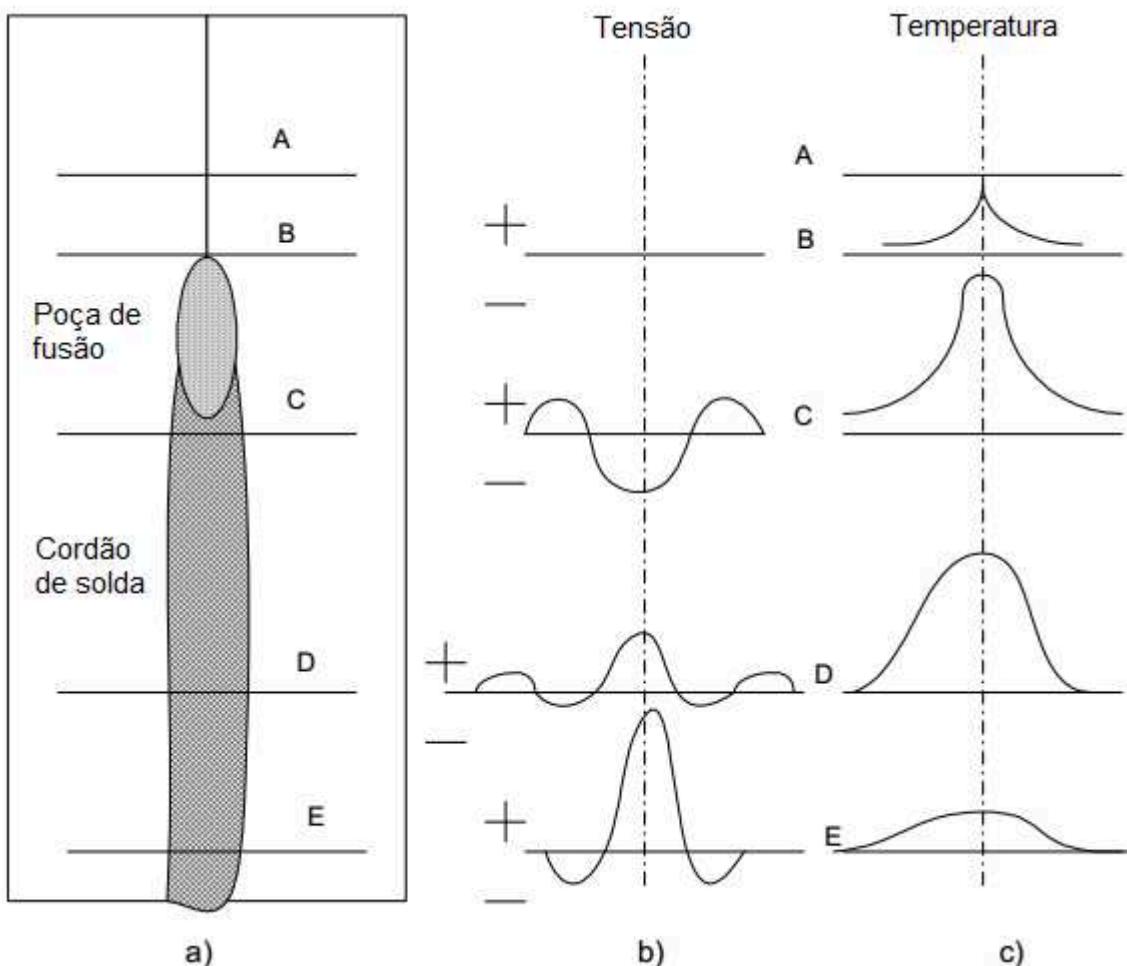


Figura 2.15 - Diagrama esquemático de tensões (a) Chapa soldada (b) Variação de tensão em diferentes posições e (c) Variação de temperatura em diferentes posições. Adaptado de IDC (2017)

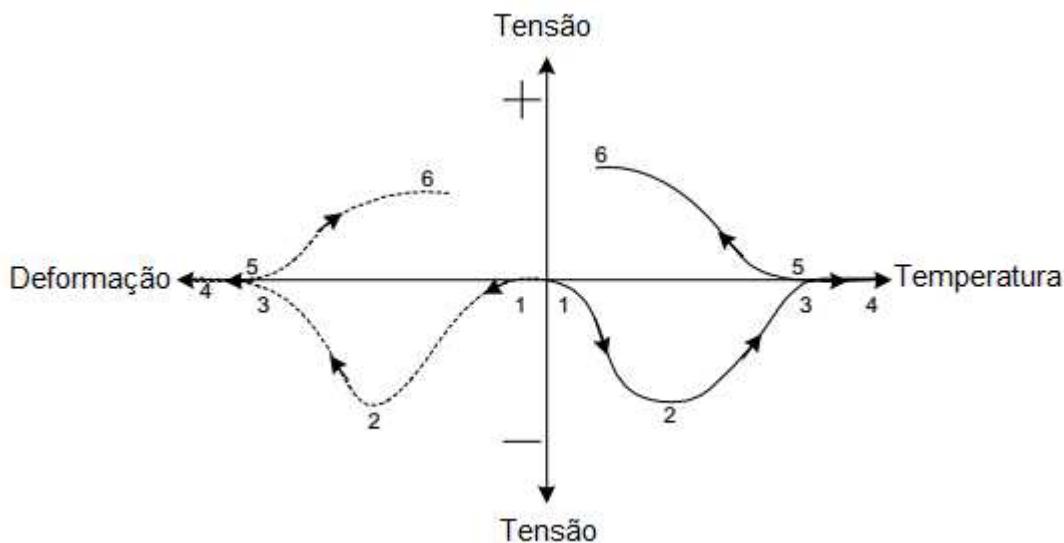


Figura 2.16 - Efeito da temperatura na tensão e deformação durante soldagem. Adaptado de IDC (2017)

Como forma geral na soldagem independente do processo de soldagem, seleção de material e projeto de junta, algumas afirmações são feitas, por Radaj (1992):

- Tensões residuais multiaxiais de alta intensidade ocorrem na Zona Fundida (ZF) ou na ZAC;
- As tensões residuais geralmente atingem no máximo o limite de escoamento do metal de base, embora valores maiores possam ser atingidos em virtude do endurecimento por deformação ou devido a efeitos multiaxiais;
- As tensões residuais podem variar muito de um ponto para outro na ZF ou ZAC, devido aos possíveis efeitos citados anteriormente;
- Grandes diferenças de tensão residual podem ocorrer entre a superfície e interior das partes, particularmente no caso de aços transformáveis;
- Existem diferenças consideráveis em relação às tensões residuais transversais em uma solda longitudinal de uma chapa e a solda circumferencial de um casco cilíndrica ou esférica, como resultado da constrição da solda circumferencial;
- Os estados de tensão residual mais desfavoráveis, geralmente, ocorrem nas extremidades do cordão de solda;
- Há diferença considerável em relação a soldagem de passe único e multipasse. Apenas o primeiro e o último passe se comportam de forma semelhante, os demais passes são pré-aquecidos e pós-tratados pelos passes anteriores e posteriores, respectivamente.

As tensões auto equilibrantes podem ser divididas segundo seus diferentes comprimentos de escala, os principais grupos, segundo Withers, Bhadeshia (2001) são:

- Tipo I ou macrotensões: são aquelas tensões que estão equilibradas ao longo de toda amostra ou peça. Essas tensões variam continuamente ao longo de grandes distâncias, estendendo-se sobre vários grãos dentro do metal;
- Tipo II ou microtensões: são tensões que se equilibram nos limites dos contornos de um grão e seus grãos adjacentes. Este tipo de tensões é mais expressivo na presença de vários constituintes, sejam eles fases ou precipitados;
- Tipo III ou submicrotensões: são aquelas tensões que estão equilibradas nos limites de uma, ou de algumas células unitárias.

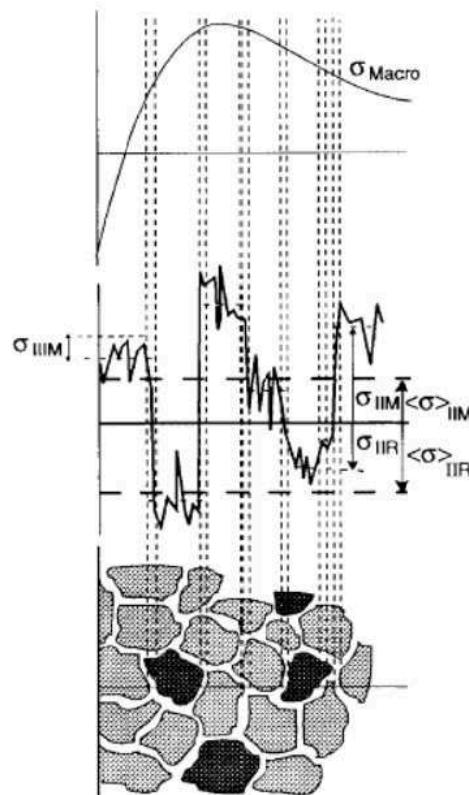


Figura 2.17 - Tipos de tensões segundo suas escalas. Fonte: (WITHERS; BHADESHIA, 2001)

As macrotensões contribuem para a maior parte das tensões acumuladas e são formadas devido ao processo de dilatação e contração durante o ciclo térmico e diferenças nas taxas de resfriamento entre as superfícies superior e inferior da junta soldada e ZAC, Figura 2.18. As microtensões ocorrem principalmente devido a transformações metalúrgicas durante o resfriamento, transformação de austenita em perlita, bainita ou martensita (IDC, 2017).

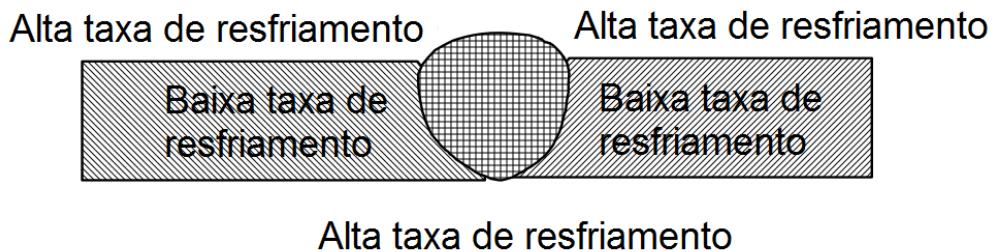


Figura 2.18 - Diferenças nas taxas de resfriamento numa junta soldada, superfícies superior e inferior e metal de base. Adaptado de IDC (2017)

As tensões residuais em soldagem apresentam uma distribuição característica, conforme sua direção, sendo geralmente descritas como:

- Tensões Longitudinais: são aquelas que aparecem na mesma direção do cordão de solda devido a contração do metal de solda durante a solidificação da poça de fusão, Figura 2.19(a);
- Tensões Transversais: são aquelas que aparecem na direção transversal ao cordão de solda durante a solidificação da poça de fusão, Figura 2.19(b);
- Tensões Ortogonais: são aquelas que aparecem ortogonalmente as direções descritas anteriormente, encontradas no interior da peça, podendo se localizar na ZF, ZAC ou Metal de Base (MB), quando esta possui espessura suficiente para oferecer restrição nesta direção.

De forma geral, as tensões residuais transversais são mais significativas, diante das tensões residuais longitudinais, do ponto de vista de projeto. A ABNT NBR 8800 (2008) descreve na Tabela 2.4 que esforços de tração e/ou compressão paralelos ao eixo da solda não precisam ser considerados no dimensionamento do cordão soldado, pois nesse caso a resistência é dada pelo metal de base.

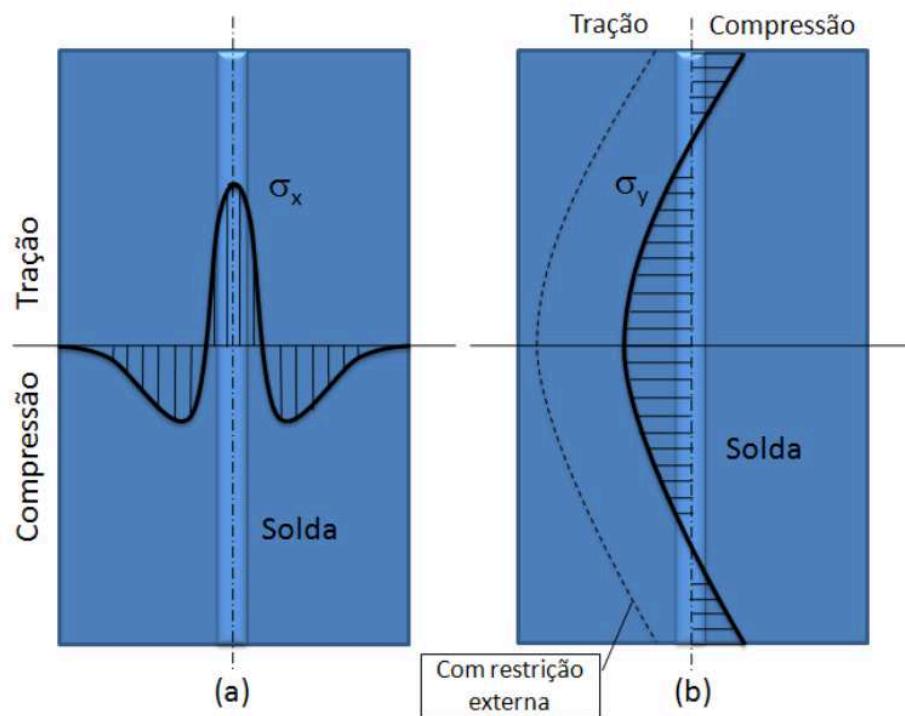


Figura 2.19- Distribuição de tensões (a) Longitudinais e (b) Transversais. Fonte: (ARAÚJO, 2012)

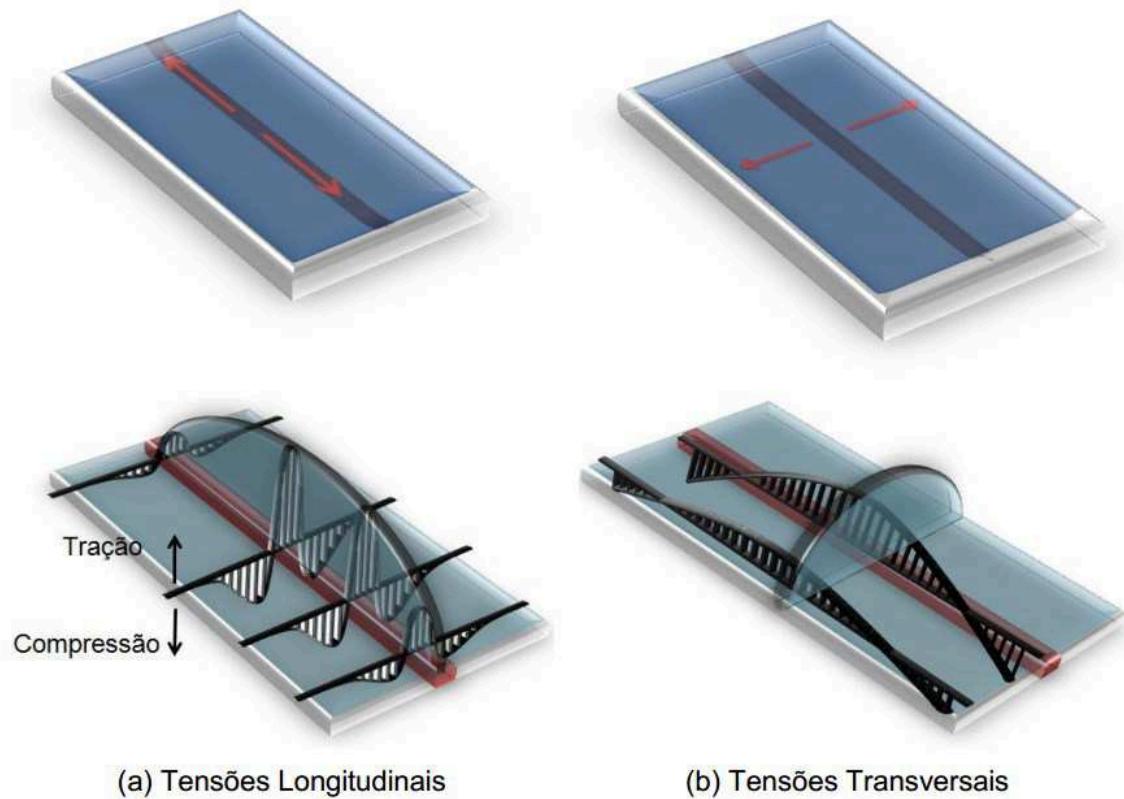


Figura 2.20 - Distribuição de tensões ao longo do cordão de solda. Fonte (ARAÚJO, 2012)

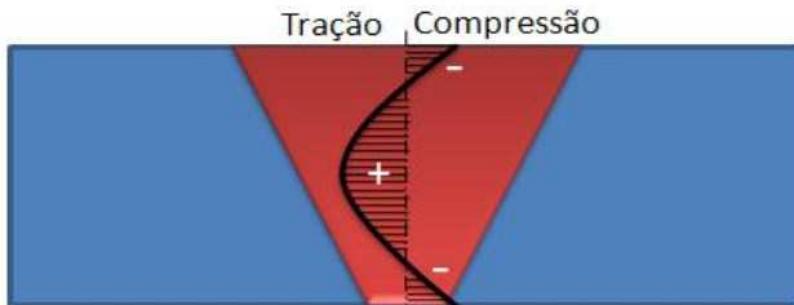


Figura 2.21 - Distribuição de tensões ortogonais. Fonte: (ARAÚJO, 2012)

Tabela 2.4 - Força resistente de cálculo em juntas soldadas. Fonte: (ABNT NBR 8800, 2008)

Tipo de solda	Tipo de solicitação e orientação	Força resistente de cálculo $F_{w,Rd}^{a b d}$
Penetração total ^{g)}	Tração ou compressão paralelas ao eixo da solda	Não precisa ser considerado
	Tração ou compressão normal à seção efetiva da solda	Metal-base: $A_{MB}f_y/\gamma_{a1}^{e f i}$
	Cisalhamento (soma vetorial) na seção efetiva	Metal-base: $0,60 A_{MB}f_y/\gamma_{a1}^i$
Penetração parcial ^{g)}	Tração ou compressão paralelas ao eixo da solda ^c	Não precisa ser considerado
	Tração ou compressão normal à seção efetiva da solda	O menor dos dois valores: a) Metal-base: $A_{MB}f_y/\gamma_{a1}^i$ b) Metal da solda: $0,60 A_w f_w/\gamma_{w1}^{j)$
	Cisalhamento paralelo ao eixo da solda, na seção efetiva	Metal-base deve atender a 6.5 Metal da solda: $0,60 A_w f_w/\gamma_{w2}^k$
Filete	Tração ou compressão paralelas ao eixo da solda ^c	Não precisa ser considerado
	Cisalhamento na seção efetiva (a solicitação de cálculo é igual à resultante vetorial de todas as forças de cálculo na junta que produzam tensões normais ou de cisalhamento na superfície de contato das partes ligadas)	Metal-base deve atender a 6.5 Metal da solda: $0,60 A_w f_w/\gamma_{w2}^{h k}$
Tampão em furos ou rasgos	Cisalhamento paralelo às superfícies em contato, na seção efetiva	Metal-base deve atender a 6.5 Metal da solda: $0,60 A_w f_w/\gamma_{w2}^k$

Em vasos de pressão e tubulações, regidos pelos Códigos de Projetos ASME VIII - DIV1 (2017) e ASME B31 (2017), respectivamente, a utilização da ASME IX é mandatória no que tange a qualificação de procedimentos de soldagem. Nestas aplicações encontra-se soldas de uniões longitudinais e circunferenciais, a Figura 2.22 mostra a categorização das juntas segundo a ASME VIII - DIV1 (2017). Pode-se fazer uma analogia com as juntas em tubulações, que se assemelham as Categorias A e B. Para maiores detalhes sobre as categorias, consultar UW-3 da ASME VIII - DIV1 (2017).

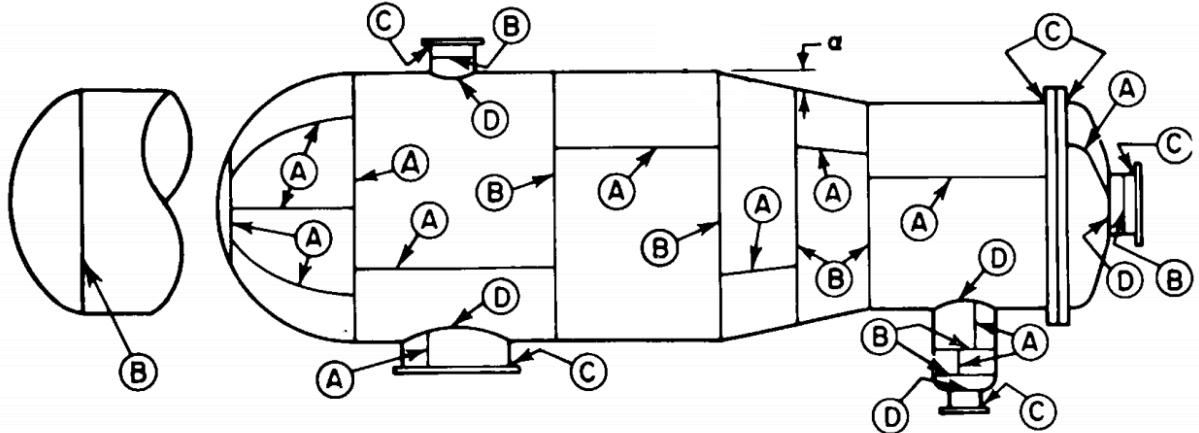


Figura 2.22 - Ilustração da localização típica de juntas soldadas das Categories A, B, C e D.
Fonte: (ASME VIII - DIV1, 2017)

Para Telles (2001) cilindros com grande relação entre diâmetro e espessura é coerente realizar o dimensionamento da espessura do equipamento em questão, relacionando com a tensão de membrana, tensão considerada constante ao longo de toda a espessura do equipamento, Figura 2.23. Fazendo uma comparação entre a área hachurada da Figura 2.23 e um cordão de solda, pode-se, mais uma vez, adotar as tensões residuais transversais, devido a direção perpendicular à solda, afetando mais significativamente o projeto da junta soldada.

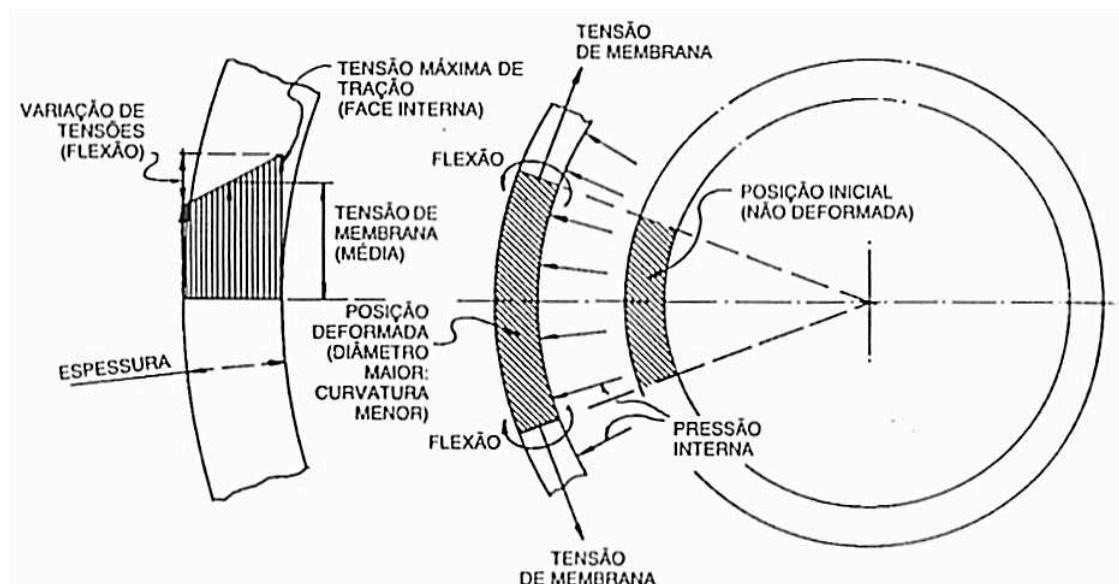


Figura 2.23 - Tensões de membrana e de flexão em um cilindro submetido a pressão interna.
Fonte: (TELLES, 2001)

Segundo Araújo et al. (2013) as tensões transversais são mais importantes quando se trata de fenômenos de fragilização por hidrogênio e corrosão sob tensão. Mais uma justificativa importante para se priorizar as tensões transversais comparado às tensões longitudinais.

2.2.3. Efeito das tensões residuais

As tensões residuais podem afetar de forma diferente o desempenho de uma junta soldada, de acordo com sua natureza, tensão trativa ou compressiva. Podem facilitar ou dificultar o aparecimento e propagação de falhas devido ao carregamento externo, pois seu efeito é de natureza ordinária, como dito no Item 2.2.2. Dessa forma tensões residuais compressivas diminuem a tendência de falha de componentes solicitados sob tração, principalmente devido à redução nos esforços resultantes atuantes (tensão resultante no componente: tensões externas \pm tensões residuais). Dessa forma, tensões residuais de mesma natureza que o carregamento externo favorece a tendência de falha, enquanto que de naturezas opostas reduzem este efeito (IDC, 2017). Ainda segundo IDC (2017), cerca de 90% das falhas mecânicas ocorrem sob tensões trativas por nucleação e sua propagação de trincas. Sendo assim, em algumas situações são impostas tensões residuais compressivas objetivando dificultar esta nucleação e propagação.

Para Masubuchi (1980), após grandes pesquisas experimentais e metalúrgicas com finalidade de investigar trincas em soldas, concluiu-se que estas trincas se dão por um dos ou ambos fatores: O material é frágil e/ou estão presentes tensões de alta tensão (transientes ou permanentes).

Segundo Welding Handbook (1998) os principais efeitos das tensões residuais numa junta soldada são:

- Fratura sobre Tensão Trativa: pode ocorrer fratura tipicamente frágil quando há tensões residuais de natureza trativa na presença de descontinuidades. Estas descontinuidades funcionam como concentradores de tensão, principalmente nas pontas das mesmas, nucleando trincas nestes pontos, que podem não se propagar ou propagarem de forma rápida, dependendo da intensidade das tensões residuais;

- Flambagem sob Carregamento Compressivo: em estruturas compostas por vigas esbeltas, chapas finas ou colunas sujeitas a carregamento compressivo devido a carga axial, momento fletor ou torsional, tensões residuais de natureza compressiva diminuem a resistência do componente a esse tipo de carregamento (MASUBUCHI, 1980).
- Resistência a Fadiga: a resistência a fadiga de um componente, submetido a carregamento cíclico, aumenta a medida que haja tensões residuais de natureza compressiva, especialmente na superfície do mesmo. É possível, também, que o carregamento cíclico alivie a tensão residual, tornando seu efeito insignificante. Outro fator de extrema importância de componentes soldados se refere ao acabamento superficial, de maneira que a ausência de reforço e mordeduras aumenta significativamente a resistência a fadiga, pelo motivo da retirada de concentradores de tensão.
- Efeitos do Meio Ambiente: mesmo sem qualquer carregamento externo, em ambientes hostis, é possível haver corrosão sob tensão, somente pelo efeito das tensões residuais em materiais ferrosos e não ferrosos. A Tabela 2.5 mostra a combinação de material e fluido ao qual este material é sensível a corrosão sob tensão.

Tabela 2.5 - Quadro de combinações de ligas e seus fluidos sensibilizantes, quanto a corrosão sob tensão. Fonte: (WELDING HANDBOOK, 1998)

Liga	Fluido sensibilizante
Aço carbono de baixa liga	Nitratos, Hidróxidos e Sulfeto de Hidrogênio
Aço inoxidável (mais que 12% Cr)	Haletos, Sulfetos de Hidrogênio e Vapor
Aço inoxidável austenítico (12 Cr, 8 Ni)	Cloreto e Hidróxidos
Ligas de Alumínio	Cloreto de sódio e ambientes tropicais
Ligas de Titânio	Ácido nítrico fumegante vermelho e Hidrocarbonetos clorados

2.3. Medição de Tensões Residuais

A presença e o efeito de tensões aprisionadas em um material qualquer, seja qual for o método de fabricação, faz com que sua medição e validação sejam um desafio por qualquer que seja a técnica utilizada. Já que mesmo medições de tensões causadas por cargas

externas são realizadas por métodos indiretos, através da relação com a deformação (SCHAJER, 2013).

É comum classificar os métodos de medição como: Destrutivos e Não Destrutivos. Desta forma separam-se da seguinte forma:

- Destrutivos: são aquelas técnicas que de uma forma ou outra inutilizam estruturalmente a peça analisada. Por exemplo: Furo Cego, Seccionamento, Deflexão e Remoção de Camadas;
- Não destrutivos: são aquelas técnicas que não inutilizam estruturalmente a peça analisada. Por exemplo: Ultrassom, Difração de Raios-X, Difração de Nêutrons, Magnético e Corrente Parasita.

A Figura 2.24 e Tabela 2.6 trazem comparativos entre as principais técnicas mais comumente utilizadas para medição de tensões residuais. Já a Tabela 2.7, traz a comparação realizada por Araújo (2012) entre as principais vantagens e desvantagens das técnicas mais comuns de medição de tensão residual.

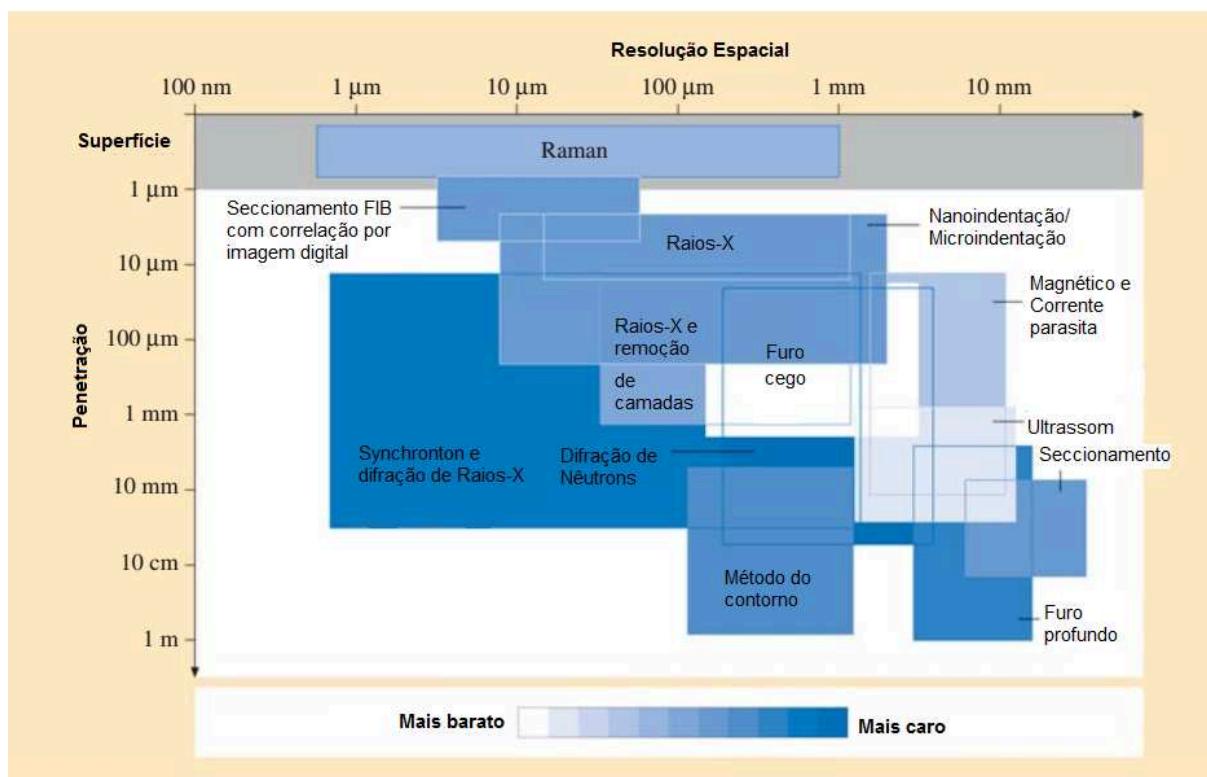


Figura 2.24 - Comparativo entre alguns dos mais utilizados métodos de medição de tensões residuais. Adaptado de Fitzpatrick et al. (2005) apud Schajer (2013)

Tabela 2.6 - Quadro comparativo mostrando as principais características de alguns dos métodos mais utilizados para medição de tensões residuais. Fonte: (LU, 1996). apud (ARAÚJO, 2012)

Descrição	Furo Cego	Deflexão	Seccionamento	Raios-X	Difração de Nêutrons	Ultrassom	Magnético
Condição	Tensão biaxial e uniforme na superfície do furo	Tensão biaxial e uniforme de um retângulo	Campos de tensões 3D	Padrão: Material policristalino, poliscristalino, de grão fino, isotrópico e homogêneo	Material policristalino, isotrópico e homogêneo	Material isotrópico e homogêneo no caminho acústico entre o transmissor e o receptor	Material ferromagnético
Tipo de tensões residuais	Macroscópica	Macroscópica	Macroscópica	Macroscópica e Microscópica	Macroscópica e Microscópica	Macroscópica, Microscópica e Submicroscópica	Macroscópica, Microscópica e Submicroscópica
Parâmetros medidos	Deformação ou Deslocamento Superficial	Deformação ou Deslocamento Superficial	Deformação ou Deslocamento Superficial	Mudança no espaçamento interplanar do material policristalino	Mudança no espaçamento interplanar do material policristalino	Variação da velocidade da onda ultrassônica	Amplitude de ruído Barkhausen ou Permeabilidade magnética
Área de análise mínima [mm ²]	0,5	1000/100 ("strain gages")	100	0,5	4	0,1 (método de alta frequência) /30 (método convencional)	1 (método Barkhausen) /100 (método de permeabilidade magnética)
Mínima profundidade de análise	20 µm	20 µm	1 a 2 mm	Dezenas de µm	1 mm	15 µm a 300 µm	100 µm
Custo do Equipamento [U\$]	10000 a 50000	1000	15000	100000 a 200000	Poucas centenas de milhões	40000 a 200000	10000 a 60000
Sistema portátil de medição	Sim	Não	Sim	Sim	Não	Sim	Sim
Incerteza Típica [MPa]	± 20	± 30	± 10	± 20	± 30	± 10 a 20	± 10 a 20
Tempo de preparação	2 hr	8 hr	5 a 200 hr	8hr	1 semana	20 min	10 min
Tempo de Medição	40 min	30 min	40 min	20 min	2 hr	Alguns minutos	Instantâneo
Profundidade de de Inspeção	0,02 a 15 mm	0,1 a 3 mm	Todas profundidades dentro de 1 mm	1 a 50 µm	2 a 50 mm	0,15 a 3 mm	0,1 a 1 mm

Tabela 2.7 - Quadro com principais vantagens e desvantagens das técnicas mais comuns de medição de tensão residual. Fonte: (ARAÚJO, 2012)

Técnica	Vantagens	Desvantagens
Método do Furo	<ul style="list-style-type: none"> - Rápido e simples; - Extensamente disponível; - Possibilidade de furos profundos para aplicação em componentes com secção espessa. 	<ul style="list-style-type: none"> - Interpretação dos dados; - Destrutivo; - Limitada sensibilidade e resolução.
Difração de Raios-X	<ul style="list-style-type: none"> - Versátil e extensamente disponível; - Grande gama de materiais (cristalinos); - Sistemas portáteis; - Rápido; - Possibilidade de medição de micro e macro tensões. 	<ul style="list-style-type: none"> - Medições básicas; - Sistemas baseados em laboratório; - Medição de pequenos componentes.
Synchrotron	<ul style="list-style-type: none"> - Melhoria da penetração e resolução relativamente à difração de raios-X; - Possibilidade de perfis de tensão em profundidade; - Rápido; - Possibilidade de medição de micro e macro tensões. 	<ul style="list-style-type: none"> - Apenas em laboratórios especializados; - Baseado em laboratório.
Difração de Nêutrons	<ul style="list-style-type: none"> - Excelente penetração e resolução; - Mapas de tensões 3D; - Possibilidade de medição de micro e macro tensões. 	<ul style="list-style-type: none"> - Apenas em laboratórios especializados; - Baseados em laboratórios.
Remoção de camadas e curvatura	<ul style="list-style-type: none"> - Relativamente simples; - Grande gama de materiais; - Pode ser combinado com outras técnicas para se obter o perfil das tensões. 	<ul style="list-style-type: none"> - Limitado a formas simples; - Destrutivo; - Baseado em laboratório.
Técnicas Magnéticas	<ul style="list-style-type: none"> - Muito rápido; - Grande variedade de técnicas magnéticas; - Portátil. 	<ul style="list-style-type: none"> - Só pode ser aplicado a materiais magnéticos; - Necessidade de separar o sinal devido a microestrutura do provocado pelas tensões.
Ultrassons	<ul style="list-style-type: none"> - Geralmente disponível; - Muito rápido; - Baixo custo; - Portátil. 	<ul style="list-style-type: none"> - Resolução limitada.
Raman/Fluorescente	<ul style="list-style-type: none"> - Elevada resolução; - Disponibilidade de sistemas portáteis. 	<ul style="list-style-type: none"> - Medições superficiais; - Interpretação; - Calibração;

	- Gama de materiais limitados.
--	--------------------------------

2.3.1. Medição de Tensões Residuais por Difração de Raios-X

Todos os materiais sólidos se deformam quando submetidos a cargas externas. A deformação se manifesta através de deslocamentos na peça que está sob carregamento em relação a sua posição original (sem cargas). Se as forças forem menores que um certo limite, a deformação é recuperável, ou seja, ao se remover a carga o corpo volta à mesma posição que estava quando sem carregamento. Este fato é conhecido como deformação em regime elástico. No entanto, caso este limite seja ultrapassado, ao remover a carga imposta ao corpo, alguma deformação será observada após descarregamento, esta é conhecida como deformação plástica (NOYAN; COHEN, 1987).

Pela Lei de Hooke é estabelecido que, na faixa elástica, a deformação é diretamente proporcional a carga. Esta constante de proporcionalidade é similar a outras constantes que são características do material ensaiado, como exemplo condutividade elétrica, térmica entre outras. Se esta característica não varia com a direção, de forma que o mesmo deslocamento é observado para uma mesma carga, independente da direção, o material é dito como isotrópico (NOYAN; COHEN, 1987). Material policristalino é aquele formado por uma sequência longa de muitos cristais ou grãos. Cristal é a forma em que os átomos se agrupam de forma repetitiva, ou de forma periódica, ao longo de muitas distâncias atômicas, de forma que ao se solidificar ocorre um padrão tridimensional repetitivo (CALLISTER; RETHWISCH, 2007).

Para Cullity e Stock (2001), medições por Difração de Raios-X (DRX) também é um método indireto e utiliza a variação da distância interplanar para um dado material. Para que sejam realizadas tais medições a Lei de Bragg deve ser satisfeita. Para tal assume-se que em alguns planos ocorre interferência construtiva das ondas de Raios-X, a este fenômeno é dado o nome de difração. Sua formulação é mostrada na Eq. (2.1)

$$n\lambda = 2d \cdot \sin\theta \quad (2.1)$$

Onde:

- n é um número inteiro;
- λ é o comprimento de onda;
- d é a distância interplanar e;
- θ é ângulo de incidência.

A Lei de Bragg utiliza duas condições geométricas, mostradas na Figura 2.25:

- As direções do feixe incidente, a direção normal à superfície e o feixe difratado são sempre coplanares;
- O ângulo entre o feixe difratado e o feixe transmitido é sempre 2θ . Isto é conhecido como o ângulo de difração, e é este ângulo, em vez de θ , que é normalmente medido experimentalmente.

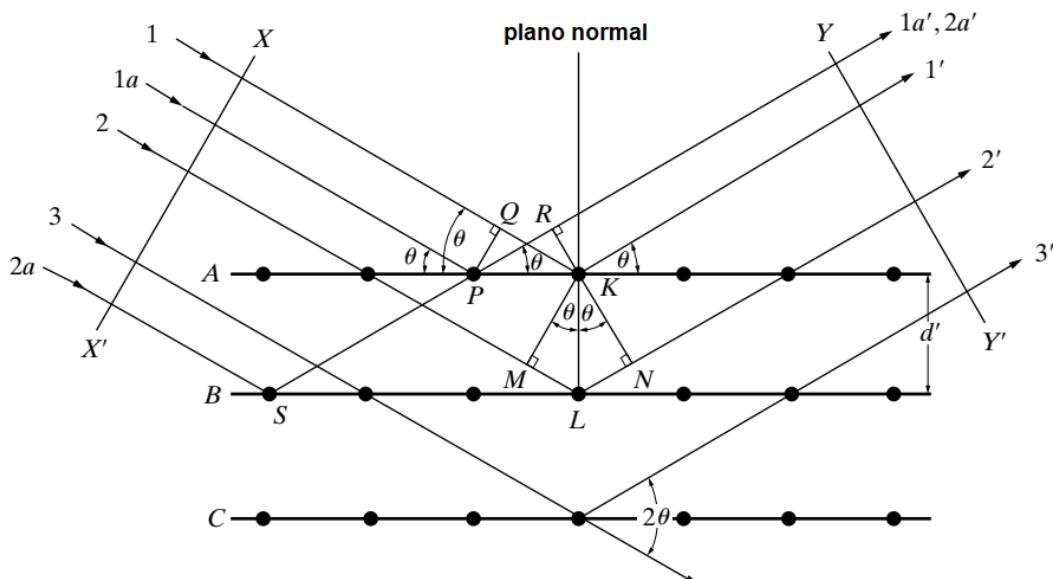


Figura 2.25 - Difração de Raios-X por um cristal. Fonte: (CULLITY; STOCK, 2001)

A Figura 2.26 mostra um exemplo esquemático de como uma tensão aplicada afeta a medição, demonstrando o princípio do método indireto através da DRX, onde uma tensão é aplicada, deslocando o pico de difração, onde este pico consiste na somatória de raios captados do detector durante o tempo de emissão do feixe incidente. Utiliza-se uma substituição na lei de Hook, alterado a variável deformação por uma variante da distância interplanar (lei de Bragg) e, após manipulações algébricas chega-se a um equacionamento da tensão variando com a distância interplanar e o ângulo ψ (ângulo formado entre as direções normais da superfície da amostra e do feixe de raios-X incidente na amostra), como mostra a Figura 2.27.

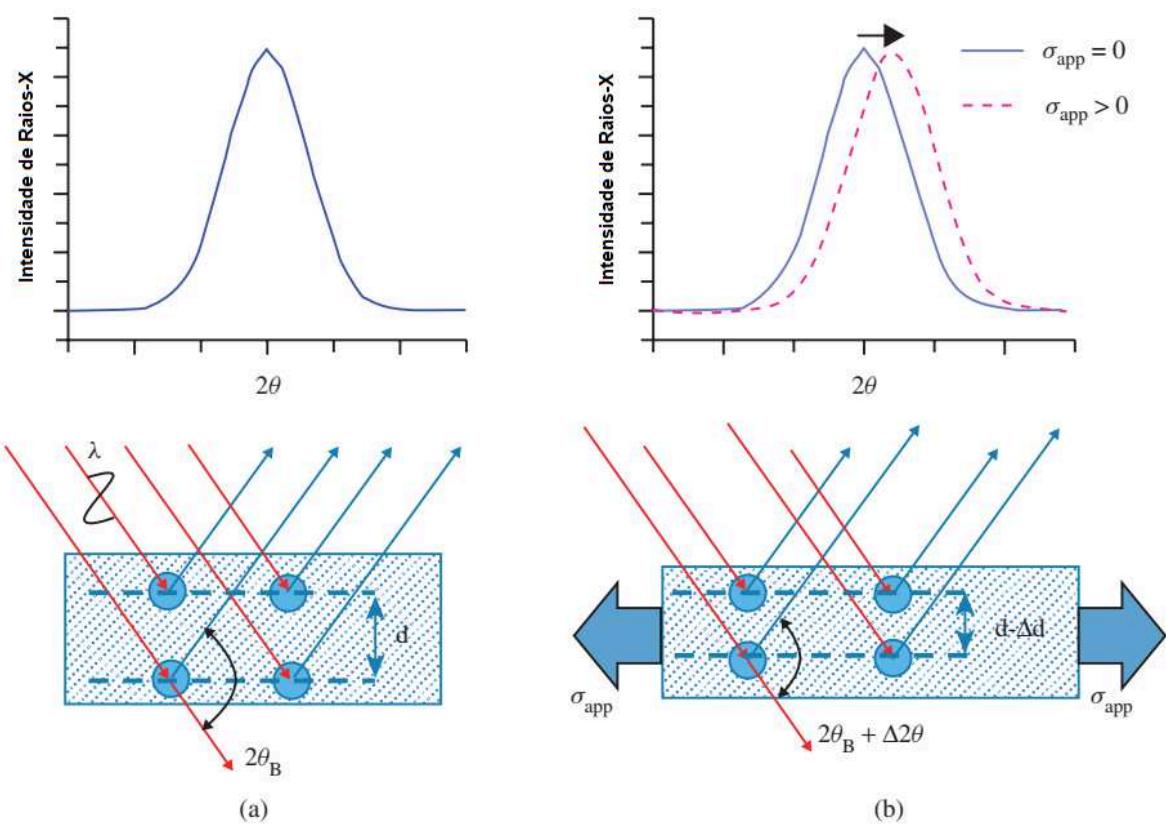


Figura 2.26 - Esquema de difração de uma estrutura cristalina (a) sem tensão aplicada e (b) sob tensão trativa devida a aplicação de uma carga. Adaptado de Schajer (2013)

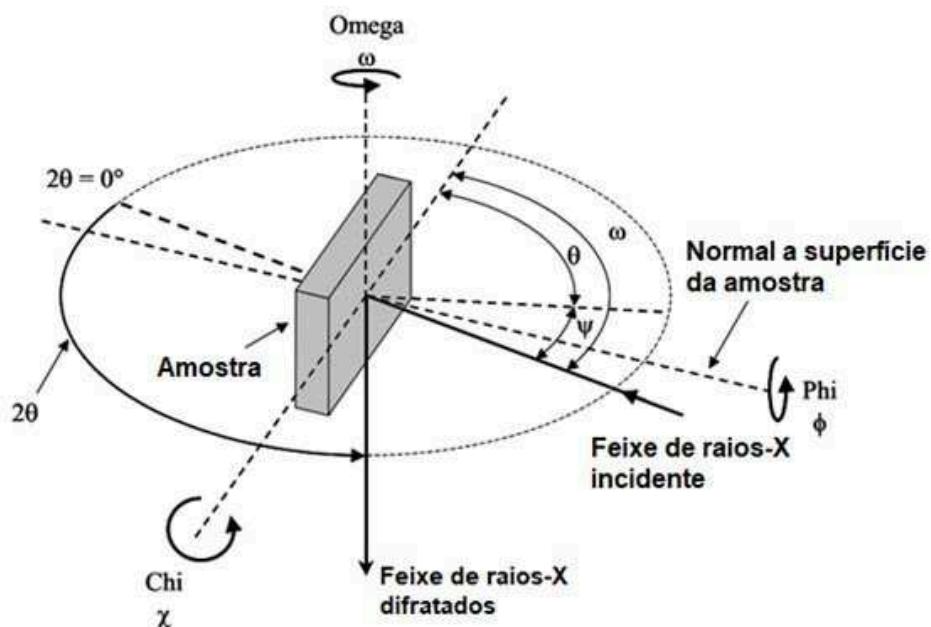


Figura 2.27 - Figura esquemática mostrando os principais ângulos e rotações utilizados para medição de tensão residual por DRX. Adaptado de Fitzpatrick et al. (2005)

A Eq. (2.2) mostra esta relação, que pode ser melhor entendida com auxílio da Figura 2.28. Para maiores detalhes sobre as manipulações algébricas, recomenda-se consultar literatura específica, como por exemplo (PREVÉY, 1986; NOYAN; COHEN, 1987; CULLITY; STOCK, 2001; FITZPATRICK et al., 2005; SCHAJER, 2013).

$$\sigma_{\phi} = \left(\frac{E}{1+\nu} \right)_{hkl} \frac{1}{d_0} \left(\frac{\partial d_{\phi\psi}}{\partial \sin^2 \psi} \right) \quad (2.2)$$

Onde:

- σ_{ϕ} é a tensão em uma direção qualquer
- E é o Módulo de Elasticidade;
- ν é coeficiente de Poisson;
- hkl é um plano cristalográfico genérico;
- d_0 é a distância interplanar de referência, livre de tensões;
- $d_{\phi\psi}$ é a distância interplanar medida.

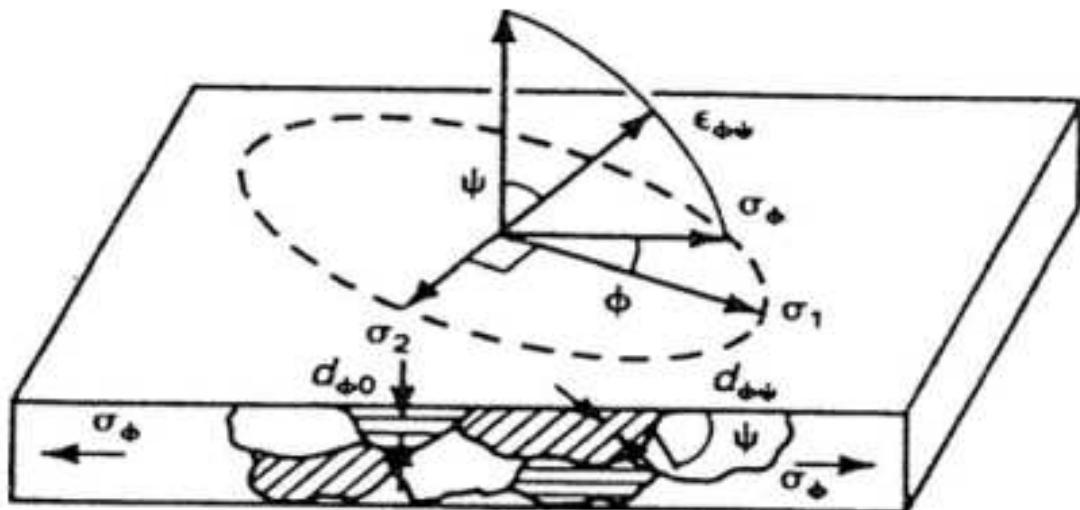


Figura 2.28 – Modelo elástico do plano de tensões. Fonte: (PREVÉY, 1986)

Dessa forma, a cada ângulo ψ é medido uma distância interplanar equivalente. De forma que o coeficiente angular da reta que liga estes pontos é o valor da tensão medida. A Figura 2.29 mostra o arranjo típico destes pontos.

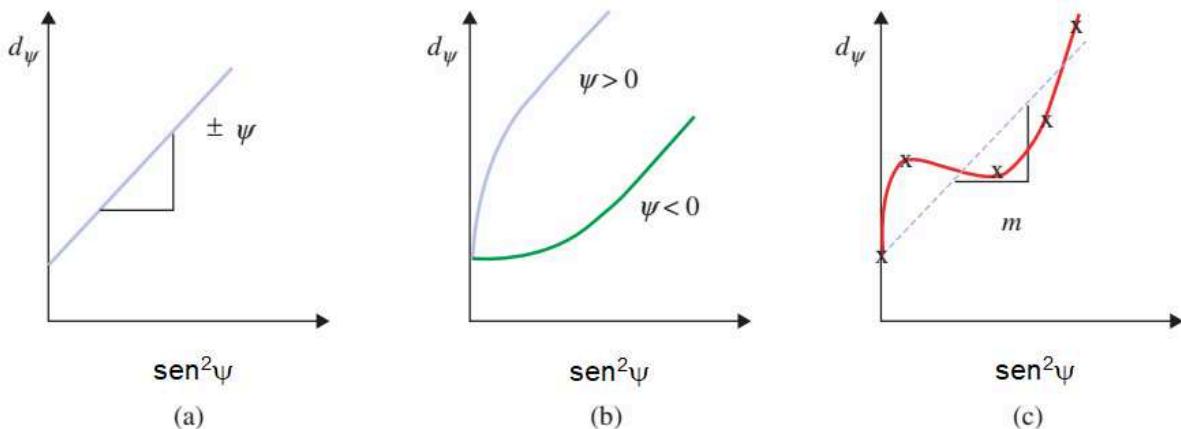


Figura 2.29 - Tipos de gráficos $d_\psi \times \text{sen}^2\psi$ comumente encontrados nas medições de tensões residuais. (a) e (b) exibem comportamento regular, explicado pela Eq. (2.2), enquanto (c) exibe um comportamento irregular não valendo a mesma. Fonte: (SCHAJER, 2013)

2.3.2. Preparação das Amostras para Medição da Tensão Residual por Difração de Raios-X

A medição de tensões residuais por difração de Raios-X é realizada pela comparação do espaçamento da rede cristalina do corpo sem tensão residual com o mesmo espaçamento após o processo de soldagem e, consequentemente com tensão residual (SCHAJER, 2013). Por isso é um processo de medição extremamente sensível que requer uma preparação das amostras muito cuidadosa com intuito de evitar erros de medição. Para Fitzpatrick et al. (2005) a preparação das amostras consiste primeiramente na remoção de óleo e graxas por meio de enxague ou por uso de solventes adequados para esta finalidade. Métodos mecânicos como usinagem, esmerilhamento, escovamento devem ser evitados, pois os mesmos induzem tensão residual, mascarando assim o resultado ao qual se desejava medir. Prevéy (1986) relata que as tensões residuais pelos processos de usinagem, esmerilhamento e jateamento induzem tensões em até 500 μm na superfície da amostra. Como segundo Fitzpatrick et al. (2005) e conforme mostrado na Tabela 2.6, a máxima penetração em medições por difração de Raios-X está limitada a 50 μm , fica claro a tamanha influência dos métodos mecânicos de limpeza previamente à medição das tensões residuais.

Outras fontes de erros evitáveis e consideráveis como preparação de amostra são: Efeito da rugosidade (PREVÉY, 1986; FITZPATRICK et al., 2005), onde medidas com superfícies ásperas podem ser realizadas, mas os dados devem ser cuidadosamente interpretados, sendo assim, há melhores resultados com superfícies menos ásperas; Efeito da temperatura

(FITZPATRICK et al., 2005), a temperatura deve ser mantida constante durante a medição de forma a evitar modificações no parâmetro de rede (contração ou dilatação) durante a medição e; Efeito de borda e forma (PREVÉY, 1986; FITZPATRICK et al., 2005), deve se evitar medições próximas às bordas (~1 a 2 mm) para evitar efeito de relaxamento das tensões e uma superfície plana é mais bem adequada para medições mais precisas. Ainda segundo Fitzpatrick et al. (2005) quando da necessidade de corte para avaliação de perfis de tensões residuais, o mesmo deve ser através do processo de Eletro-Erosão, tomando devidos cuidados com aquecimento da peça e efeitos de relaxamento após corte.

É consenso na literatura que o melhor processo para adequação da superfície, seja ela com fins de limpeza, melhoria da rugosidade ou até mesmo remoção de camadas é o polimento eletrolítico (MASUBUCHI, 1980; PREVÉY, 1986; NOYAN; COHEN, 1987; BECK; DENIS; SIMON, 1989; TOTTEN; HOWES; INOUE, 2002; FITZPATRICK et al., 2005; SCHAJER, 2013).

Para Fitzpatrick et al. (2005), o caminho para se conseguir bons resultados de polimento eletrolítico consiste em boas seleções do eletrólito e condições de polimento, determinadas principalmente pela corrente e tensão. Estes parâmetros, eletrólito, corrente e tensão são dependentes do material a ser polido. No geral há uma faixa ótima de tensão e corrente de forma a otimizar os resultados finais. A Figura 2.30 mostra de forma esquemática a interação corrente-tensão e sua relação com a qualidade de superfície obtida. Em baixas tensões não há polimento, ocorre apenas ataque eletrolítico, em altas correntes e tensões há ataque de corrosão por Pites e numa faixa intermediária ocorre o polimento propriamente dito e desejado.

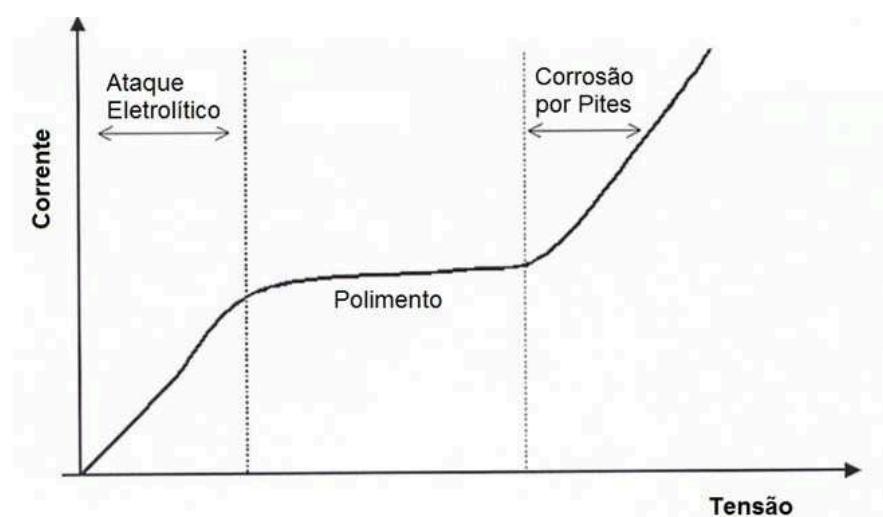


Figura 2.30 - Interação idealizada entre corrente-tensão para polimento eletrolítico. Adaptado de Fitzpatrick et al. (2005)

Mishchenko; Oliveira; Scotti (2016) estudaram parâmetros ótimos para a remoção de até 300 µm em aço ABNT 1020 e AISI 304. Obtiveram uma composição do eletrólito de 19% em H₃PO₄, 9%, em H₂SO₄ e o restante em Água Destilada. Com uma corrente de 65 A conseguiram uma taxa de remoção de 100 µm/min.

Assim, é notável a potencialidade do polimento eletrolítico para preparação de amostras com finalidade de medição de tensões residuais, no entanto durante o processamento do polimento alguns problemas podem ocorrer. A Tabela 2.8 mostra alguns dos mais comuns, a possível causa e sugestões para contornar os mesmos.

Tabela 2.8 -Quadro indicativo com problemas comuns no polimento eletrolítico, com suas possíveis causas e sugestões corretivas. Adaptado de Fitzpatrick et al. (2005)

Problema	Possível causa	Sugestões
Ataque profundo no centro da região atacada	O filme de polimento não se formou no centro da área desejada	Aumentar a tensão; Reduzir a agitação; Utilizar fluido eletrolítico mais viscoso.
Corrosão por Pites e ataque químico na superfície da amostra	O filme de polimento é muito viscoso ou muito fino	Diminuir a tensão; Aumentar a agitação; Utilizar fluido eletrolítico menos viscoso.
Formação de depósitos na superfície da amostra	Os produtos formados no anodo são insolúveis	Mudar o fluido eletrolítico para um que não forme produtos insolúveis Aumentar a temperatura do sistema; Aumentar a tensão.
Superfície da amostra está áspera ou sem brilho	O filme de polimento é inadequado	Aumentar a tensão; Utilizar fluido eletrolítico mais viscoso.
Superfície da amostra apresentando arranhões	Tempo incorreto de polimento Agitação Inadequada Preparação inadequada	Aumentar a agitação; Melhorar o procedimento de preparação; Aumentar a tensão e diminuir o tempo de polimento.
Há deformações na superfície polida	Houve ataque químico após a corrente ser desligada	Remover a amostra imediatamente após o desligamento da corrente; Escolher um ataque menos agressivo.

Regiões da superfície sem o polimento	Presença de bolhas de gás protegendo a superfície	Aumentar a agitação; Diminuir a tensão.
Diferentes fases aliviadas	O filme de polimento é inadequado	Aumentar a tensão; Melhorar o procedimento de preparação; Reducir o tempo de polimento.
Corrosão por Pites	Polimento muito longo A tensão muito alta	Melhorar o procedimento de preparação; Diminuir o tempo de polimento; Tentar outros fluidos eletrolíticos.

2.3.3. Erros comuns durante medição de tensão residual por DRX

Como todo processo de medição, a medição por DRX também apresenta erros durante as medições realizadas. Aqui serão listadas as principais fontes de erro, bem como a melhor forma de mitigá-las:

- Nivelamento da amostra: como dito no Item 2.3.1, o principal ângulo utilizado nas medições de tensões residuais é o ψ , que utiliza como referência o plano normal a superfície a amostra, com isso é essencialmente fundamental um bom nivelamento da amostra em duas direções;
- Efeito da geometria da amostra: superfícies rugosas ou curvadas geram erros sistemáticos durante medição pelo efeito semelhante ao do tópico anterior, pois pode afetar a referência de medição, direção normal da superfície da amostra (PREVÉY, 1986), diante disso, a ação recomendada para minimizar o efeito da rugosidade é o polimento eletrolítico, abordado anteriormente no Item 2.3.2;
- Tamanho e Orientação preferencial de Grãos: grãos grosseiros podem restringir a medição a uma menor quantidade deles, tornando a medição menos significativa. Orientação preferencial dos grãos pode causar uma configuração irregular no gráfico $d_\psi \times \text{sen}^2\psi$, semelhante ao mostrando na Figura 2.29(c). A medida para minimizar este efeito é inserir um ângulo de oscilação tipicamente de $\pm 2^\circ$ (FITZPATRICK et al., 2005).

2.4. Procedimento de Soldagem

Um procedimento de soldagem consiste em detalhar os métodos e técnicas utilizadas durante a soldagem, visando obter repetibilidade das propriedades mecânicas da união soldada, quando executada por profissionais devidamente treinados (WELDING HANDBOOK, 1998). Para isso é emitida a Especificação do Procedimento de Soldagem (EPS), um documento contendo todas as variáveis requeridas pelo Código de projeto, fabricação ou inspeção (ASME IX, 2017).

Para ASME IX (2017), essas variáveis são divididas em três tipos principais, de acordo com seu grau de restrição para cada processo de soldagem: VARIÁVEIS ESSENCIAIS são aquelas cujas alterações, além dos limites permissíveis, afetarão as propriedades mecânicas da junta soldada e requer nova qualificação da EPS; VARIÁVEIS ESSENCIAIS SUPLEMENTARES são aquelas cuja mudança nas condições de soldagem afetarão as propriedades da resistência ao impacto da junta soldada e a alteração destas variáveis, além do limite permissível e quando aplicável, também requer nova qualificação da EPS; e VARIÁVEIS NÃO ESSENCIAIS que são aquelas cuja mudança nas condições de soldagem não afetam as propriedades mecânicas da junta soldada e, portanto, não requerem nova qualificação de EPS.

Uma vez que neste trabalho optou-se por utilizar o processo de soldagem *Gas Metal Arc Welding* (GMAW), também conhecido como *Metal Inert Gas / Metal Active Gas* (MIG/MAG), devido sua grande e ainda crescente utilização impulsionado por maior produtividade quando comparado com outros processos usuais, apresenta-se no Anexo A todas as variáveis necessárias ao processo em questão de acordo com ASME IX (2017).

2.4.1. GMAW (Gas Metal Arc Welding)

O processo GMAW (também comumente conhecido por MIG/MAG) é um processo de soldagem cujo princípio consiste numa fonte de calor baseada num arco elétrico mantido entre a ponta do arame-eletrodo (eletrodo nu) e poça de fusão (peça a ser soldada). A proteção da região da solda é feita por um fluxo de gás e quando este gás é inerte o processo recebe o nome de MIG (*Metal Inert Gas*) e quando por gás ativo recebe nome de MAG (*Metal Active Gas*) (WAINER; BRANDI; MELLO, 2004). O conjunto de equipamentos utilizados na soldagem GMAW é mostrado na Figura 2.31.

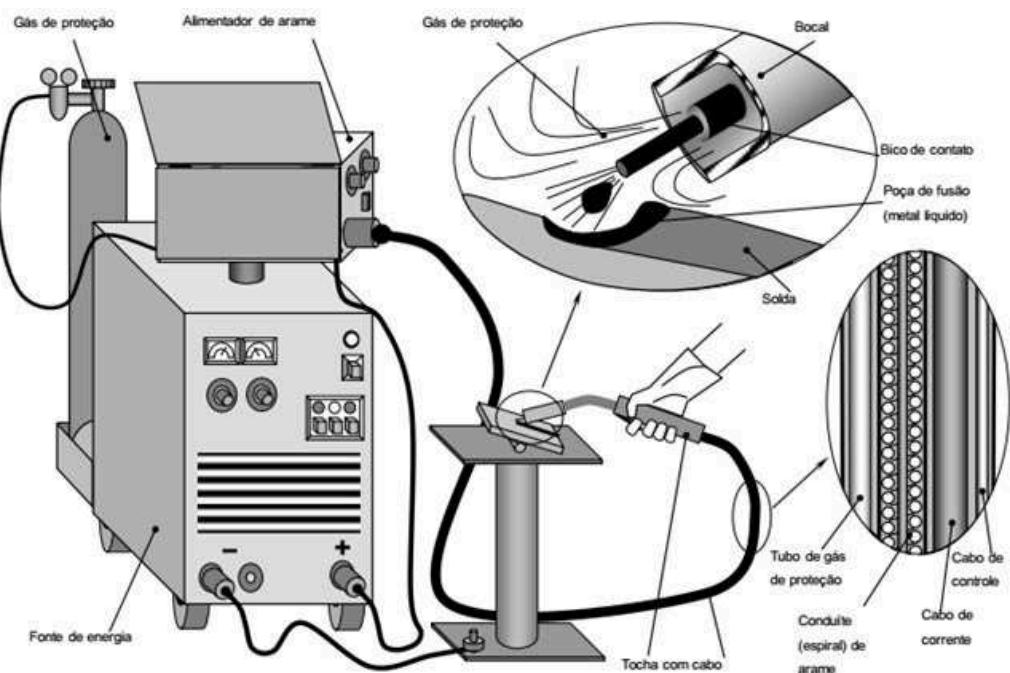


Figura 2.31 - Esquema típico de um equipamento de soldagem GMAW. Fonte: (SCOTTI; PONOMAREV, 2008)

A alimentação do arame ocorre de forma mecanizada e continua através do alimentador de arame (o equipamento, por si só, mantém a velocidade de alimentação e comprimento do arco constantes). Dessa forma ocorrem duas situações de funcionamento em se tratando da condução da tocha e consequentemente sendo responsável pela velocidade de soldagem: quando a tocha é conduzida por um sistema mecanizado, costuma-se nomear o processo como automático; quando a tocha é conduzida manualmente, costuma-se nomear o processo como semiautomático, já que a alimentação sempre é mecanizada (SCOTTI; PONOMAREV, 2008).

Segundo Wainer; Brandi; Mello (2004), as principais vantagens do processo são:

- Processo semiautomático bastante versátil, podendo ser adaptado facilmente para a soldagem automática;
- O eletrodo nu é alimentado continuamente;
- A soldagem pode ser executada em todas as posições;
- A velocidade de soldagem é elevada;
- A taxa de deposição é elevada devido à alta densidade de corrente na ponta do arame-eletrodo;
- Não há formação de escoria e, consequente, não se perde tempo na sua remoção, nem se corre o risco de inclusão de escoria na soldagem multipasse;
- Penetração de raiz mais uniforme se comparado ao processo SMAW;

- Processo com baixo teor de hidrogênio que, no caso de eletrodos nus, fica ao redor de 5 ppm/100 g de metal;
- Problemas de distorção e tensões residuais são diminuídos;
- Soldagem com visibilidade total da poça de fusão;
- Possibilidade de controlar a penetração e a diluição durante a soldagem;
- Facilidade de execução da soldagem;
- O soldador pode ser facilmente treinado a soldar em todas as posições.

Já com relação às limitações, tem-se:

- Maior velocidade de resfriamento por não haver escória, o que aumenta a ocorrência de trincas, principalmente em aços temperáveis;
- A soldagem deve ser protegida de correntes de ar;
- Como o bocal da tocha precisa estar próximo do metal de base, a operação não é fácil em locais de difícil acesso;
- Projeções de gotas de metal líquido durante a soldagem;
- Grande emissão de raios ultravioleta;
- Equipamento de soldagem mais caro e complexo, comparado ao SMAW;
- Equipamento menos portátil, se comparado ao do SMAW.

O processo GMAW é caracterizado pela transferência de metal (gotas de metal fundido geradas na ponta do arame-eletrodo) do eletrodo nu à poça de fusão, através do arco. As dimensões e frequência que são transferidas são influenciadas por fatores tais quais o diâmetro e material do eletrodo, gás de proteção, intensidade e tipo de polaridade da corrente de soldagem, comprimento do arco entre outros. O modo de transferência metálica afeta diretamente a estabilidade do processo e afeta diretamente na quantidade de respingos gerados, posições de soldagem possíveis de serem realizadas, qualidade e geometria da solda e aparência superficial do cordão de solda (SCOTTI; PONOMAREV, 2008). Um resumo de alguns dos modos de transferência metálica é mostrado na Tabela 2.9, tomando o modo de transferência por curto-círcuito como padrão de comparação (recebendo o valor 1).

Tabela 2.9 - Quadro comparativo entre diferentes tipos de transferência metálica. Fonte: (FOGAGNOLO, 2011)

Tipo de transferência metálica	Gás de Proteção	Posição de soldagem	Energia de soldagem	Penetração	Estabilidade do arco
Globular	Todos	Plana	1,2	1,2	Intermediário

Curto circuito	Todos	Todas	1,0	1,0	Ruim
Pulverização axial	Argônio e misturas ricas em Argônio	Plana / Horizontal (em ângulo)	1,8	1,8	Boa
		Todas	1,2 – 1,6	1,2 – 1,6	Boa

Neste trabalho não serão utilizadas as variáveis essenciais suplementares, tais como tratamento térmico pós soldagem, energia de soldagem, tipo de corrente e polaridade, entre outras, haja vista que não serão avaliadas questões relacionadas à tenacidade ao impacto. Sendo assim, será descrito sobre as principais variáveis essenciais e não essenciais, das quais algumas delas serão investigadas como objetivo final da dissertação.

2.4.2. Variáveis Essenciais

Como as variáveis essenciais requerem nova qualificação do procedimento com testes que atestam sua resistência mecânica, deixou-se de fazer revisão bibliográfica a respeito do quanto e como alterações destas variáveis podem afetar os níveis de tensão residual. Uma exceção para isto é a respeito do QW-403 que trata de metal de base, no qual há a possibilidade de alterar tanto os materiais selecionados através do grupo de materiais (P-No., QW-403.11 explicado mais detalhadamente adiante) e pela faixa de espessura (QW403.8 a seguir).

2.4.2.1. Metal base

O metal de base é definido pela ASME IX (2017) como o material a ser soldado ou brasado. É selecionado a partir do Código de projeto de acordo com as variáveis envolvidas: cargas aplicadas, temperaturas de projeto e de operação, compatibilidade química com o ambiente e etc. Segundo Modenesi (2008), dentro das possibilidades é preferível a escolha do material que apresente melhor soldabilidade (facilidade de ser soldado)

Dentro do parágrafo de metal de base (QW-403) é possível detalhar as descrições tidas como essenciais:

- QW-403.8, modificação da espessura do metal de base fora da faixa qualificada através de QW-451.1 (Anexo B), exceto quando permitido pelo QW-202.4(b). Em resumo esse parágrafo diz que pode ser utilizado uma combinação de RQPS

(Registro de Qualificação de Procedimento de Soldagem) com intuito de atender uma espessura maior do metal de base;

- QW-403.9, na soldagem de passe simples ou multipasses que houver qualquer cordão de solda maior que 13 mm de espessura, a faixa máxima qualificada de deposição de material é de 1,1 vezes a espessura depositada;
- QW-403.10, para o modo de transferência por Curto-Círculo pelo processo GMAW (MIG/MAG) chapas de teste com espessura menor que 13 mm qualificam no máximo uma faixa de 1,1 vezes a espessura do metal de base. Para espessuras de 13 mm ou maiores, vale o QW-451;
- QW-403.11, qualquer modificação no metal de base, segundo seu P-No. (agrupamento de materiais baseado nas propriedades mecânicas, composição química e soldabilidade do material com intuito de flexibilizar a utilização das EPS, esse agrupamento pode ser melhor visualizado no QW/QB-222 do próprio Código), qualificado na EPS deve ser novamente qualificado de acordo com QW-424. Em resumo esse QW mostra qual (is) P-No. será (ão) qualificado (s) por uma determinada RQPS. Como o objetivo da Dissertação não compreende a modificação no metal base como parâmetro comparativo, fica a critério mais detalhes a respeito no próprio Código ASME IX (2017).

Tabela 2.10 - Quadro resumido do agrupamento de materiais de base e P-No.. Adaptado de ASME IX (2013)

Material do Metal de Base	P-No. para Soldagem
Aços e suas ligas (Incluindo Aços Inoxidáveis)	1 a 15F
Alumínio e suas Ligas	21 a 26
Cobre e suas Ligas	31 a 35
Níquel e suas Ligas	41 a 49
Titânio e suas Ligas	51 a 53
Zircônio e suas Ligas	61 a 62

2.4.2.2. Metal de adição

Metal de adição é definido pela ASME IX (2017) como sendo o metal ou liga a ser adicionado quando se realiza a soldagem ou brasagem. Para Modenesi (2008), é o material adicionado, no estado líquido, durante o processo de soldagem ou brasagem, devendo ser

selecionado de acordo com suas compatibilidades químicas e mecânicas mais próximas possível do metal de base.

A especificação destes materiais (Aços Carbono e Aços de baixa liga) é realizada principalmente pela ASME II-C (2017) ou pela AWS 5.18 (2005); AWS 5.28 (2005), respectivamente.

Dentro do parágrafo de metal de adição (QW-404) é possível detalhar as descrições tidas como essenciais:

- QW-404.4, modificação do F-No. (agrupamento de eletrodo, vareta ou arame-eletrodo baseado essencialmente em sua usabilidade) requer nova qualificação de procedimento. Isto não implica que se possa utilizar indiscriminadamente qualquer metal de adição dentro de um mesmo F-No., deixando de considerar compatibilidade dos metais de base e metal de adição do ponto de vista de propriedades mecânicas, tratamento térmico, requisitos de serviço e propriedades mecânicas. O motivo para isto se trata do fato de outra variável essencial, que será mostrada a seguir;
- QW-404.5, modificação do A-No. (identificação da composição química do metal de solda, aplicável somente a metais ferrosos) para qualquer outro A-No. requer nova qualificação de procedimento, exceto os A-No. 1 e 2 que se qualificam um ao outro;
- QW-404.23, modificação da forma produtiva do metal de adição requer nova qualificação. Por exemplo: arame sólido (“nú” ou recoberto), arame tubular (nú ou recoberto) ou arame tubular auto protegido;
- QW-404.24, aumento, diminuição ou alteração em mais de 10% em metais de adição suplementares requer nova qualificação;
- QW-404.27, modificação do teor de elementos de liga provindos do metal de adição, quando estes são fator determinante da composição química do cordão de solda, requer nova qualificação;
- QW-404.30, modificações na espessura do cordão de solda deve estar de acordo com QW-451;
- QW-404.32, para o modo de transferência por Curto-Círcuito pelo processo GMAW (MIG/MAG) cordão de solda com espessura menor que 13 mm qualificam no máximo uma faixa de 1,1 vezes a espessura do cordão de solda. Para cordões de solda iguais ou maiores que 13 mm, vale o QW-451.

Tabela 2.11 - Quadro resumido do agrupamento de materiais de adição e F-No.. Adaptado de ASME IX (2013)

Material do Metal de Adição	F-No. para Soldagem
Aços e suas ligas (Incluindo Aços Inoxidáveis)	1 a 6
Alumínio e suas Ligas	21 a 25
Cobre e suas Ligas	31 a 37
Níquel e suas Ligas	41 a 49
Titânio e suas Ligas	51 a 55
Zircônio e suas Ligas	61
Revestimento resistente ao desgaste	71 e 72

Tabela 2.12 - Classificação para metais de adição ferrosos. Adaptado de ASME IX (2013)

A-No.	Tipo de metal de adição	Análise [%]					
		C	Cr	Mo	Ni	Mn	Si
1	Aço carbono	0,20	0,20	0,30	0,50	1,60	1,00
2	C-Mo	0,15	0,50	0,40 – 0,65	0,50	1,60	1,00
3	Cr (0,4% a 2%)-Mo	0,15	0,40 – 2,00	0,40 – 0,65	0,50	1,60	1,00
4	Cr (2% a 4%)-Mo	0,15	2,00 – 4,00	0,40 – 1,50	0,50	1,60	2,00
5	Cr (4% a 10,5%)-Mo	0,15	4,00 – 10,50	0,40 – 1,50	0,80	1,20	2,00
6	Cr-Martensítico	0,15	11,00 – 15,00	0,70	0,80	2,00	1,00
7	Cr-Ferrítico	0,15	11,00 – 30,00	1,00	0,80	1,00	3,00
8	Cr-Ni	0,15	14,50 – 30,00	4,00	7,50 – 15,00	2,50	1,00
9	Cr-Ni	0,30	19,00 – 30,00	6,00	15,00 – 37,00	2,50	1,00
10	Ni até 4%	0,15	0,50	0,55	0,80 – 4,00	1,70	1,00
11	Mn-Mo	0,17	0,50	0,25 – 0,75	0,85	1,25 – 2,25	1,00
12	Ni-Cr-Mo	0,15	1,50	0,25 – 0,30	1,25 – 2,80	0,75 – 2,25	1,00

2.4.2.3. Pré-aquecimento

Pré-aquecimento é definido pela ASME IX (2017) como sendo a temperatura mínima e imediatamente precedente a soldagem. Para soldagem multipasses é definida como sendo a temperatura interpasse.

Segundo a N-133 (2015) o requisito de pré-aquecimento e temperatura interpasse para os Aços Carbono e Aços Cabono-Manganês são mostrado na Tabela 2.13, onde CEIIW é dado como o cálculo do Carbono Equivalente segundo o *International Institute of Welding* (IIW) baseados nos valores obtidos nos certificados de fabricação (análise química), através das quantidades percentuais dos elementos químicos presentes (por exemplo, %C significa a quantidade em percentual de massa do elemento químico Carbono presente no material). A

fórmula para o cálculo do CEIIW é dada na Eq.(2.3). Valores de temperaturas para Aços Ligados (Cr-Mo e C-Mo) são mostrados na Tabela 2.14.

$$CE_{IIW} = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%Cu + \%Ni}{15} \quad (2.3)$$

Segundo a (ASME IX, 2017) a variável essencial relacionada ao pré-aquecimento para o processo GMAW, é:

- QW-404.1, a diminuição na temperatura de pré-aquecimento em mais de 55 °C requer nova qualificação. Devendo ser especificado na EPS a temperatura mínima de pré-aquecimento.

Adedayo e Adeyemi (2000) concluíram que um pré-aquecimento na ordem de 200°C pode diminuir as tensões residuais em aços numa faixa de até 65%.

Tabela 2.13 - Temperaturas de Preaquecimento e Interpasso Mínimas Especificadas para a Soldagem de Aços Carbono e Aços Carbono-Manganês. Fonte: (N-133, 2015)

Carbono Equivalente – CEIIW	Temperaturas mínimas de Preaquecimento e (Interpasso)		
	Espessura da junta – e [mm]		
	e ≤ 20	20 ≤ e ≤ 30	e ≥ 30
CEIIW ≤ 0,41 %	10 °C (min.)	10 °C (min.)	10 °C (min.)
0,41 % < CEIIW ≤ 0,43 %	10 °C (min.)	10 °C (min.)	100 °C
0,43 % < CEIIW ≤ 0,45 %	10 °C (min.)	10 °C (min.)	100 °C
0,45 % < CEIIW ≤ 0,47 %	10 °C (min.)	100 °C	125 °C
0,47 % < CEIIW ≤ 0,50 %	100 °C	125 °C	150 °C

Tabela 2.14 – Temperaturas de Preaquecimento e Interpasso para Aços Cromo-Molibdênio e Aços Molibdênio. Fonte: (N-133, 2015)

Temperaturas de preaquecimento e interpasso mínima		Temperatura máxima de interpasso	
Material (P-No.)	Espessura da junta – e [mm]		Todas espessuras
	e ≤ 12	e > 12	
C-0,5Mo (P-No.3) 0,5Cr-0,5Mo (P-No.3)	Não Requerido	150 °C	250 °C
1Cr-0,5Mo (P-No.4) 1,25Cr-0,5Mo (P-No.4) 2Cr-0,5Mo (P-No.4)	150 °C	200 °C	300 °C
2,25Cr-1Mo (P-No.5A)	200 °C	250 °C	350 °C

2,25-3Cr-Mo-V (P-No.5C) 3Cr-1Mo (P-No.5A)			
5Cr-0,5Mo (P-No.5B) 7Cr-0,5Mo (P-No.5B) 9Cr-1Mo (P-No.5B)	200 °C	250 °C	350 °C
9Cr-1Mo-V-Nb (P-No.5E)	200 °C	250 °C	330 °C

2.4.2.4. Gás de proteção

Para Scotti e Ponomarev (2008), o processo GMAW requer uma proteção entre o metal de base e o arame-eletrodo, essa proteção é dada pelo fluxo de gás, por isso o nome gás de proteção. Algumas outras funções afetadas pelo tipo de gás utilizado são: controlar a operacionalidade e transferência metálica, propriedades mecânicas e características metalúrgicas da solda (SCOTTI; PONOMAREV, 2008).

Segundo ASME IX (2017), a norma de especificação da composição dos gases de proteção é feita pela AWS 5.32 (2011). As variáveis essências relacionadas aos gases de proteção são melhor abordadas a seguir:

- QW-408.2, modificações em qualquer que seja os itens a seguir requerem novas qualificações:
 - Alterar de um tipo de gás simples para qualquer outro tipo de gás simples;
 - Alterar de um gás simples para uma mistura de gases ou vice-versa;
 - Modificação na porcentagem de mistura de gases;
 - Adição ou retirada de gás de proteção.
- QW-408.9, para soldas de topo dos P-Nos.41 ao 49 e P-Nos. 10I, 10J, 10K, P-No. 51 ao 53 e P-No. 61 a 62, a retirada de gás de purga ou modificação de sua composição de gás inerte com inclusão de gás ativo requer nova qualificação;
- QW-408.10, para P-Nos. 10I, 10J, 10K, P-No. 51 ao 53 e P-Nos. 61 a 62 a remoção do gás de proteção adicional ou modificação de sua composição de gás inerte com inclusão de gás ativo requer nova qualificação.

2.4.2.5. Modos de transferência metálica

Para ASME IX (2017), o modo de transferência metálica é a forma com a qual o metal fundido se desloca do arame-eletrodo até o metal base.

O modo de transferência metálica é abordado pelo QW-409.2 de forma que alguma modificação dos modos de transferência metálica tipo globular (voo livre), spray ou spray pulsado para transferência metálica por curto circuito ou vice-versa requer nova qualificação de EPS.

2.4.3. Variáveis Não Essenciais

As variáveis não essenciais dão maior flexibilidade e usabilidade às EPS, de forma a tornar uma EPS utilizável a um número maior de arranjos de soldagem. Neste estudo, como as variáveis não essenciais, são em maior número, se comparadas às variáveis essenciais, opta-se por não abordar todas referentes ao processo GMAW. Assim sendo, será abordado, a seguir, algumas que podem ser consideradas como mais importantes, dentre as variáveis não essenciais, do ponto de vista de tensão residual.

2.4.3.1. Juntas de soldagem

Segundo ASME IX (2017), junta é definida como a união de componentes ou superfícies de componentes aos quais serão unidos. Para Modenesi (2008), junta é tida como a região entre as peças que serão unidas. A Figura 2.32 mostra os tipos de junta mais usuais, segundo Modenesi (2008). Chanfro é o corte efeituado nas peças a serem unidas (ASME IX, 2017), alguns tipos são mostrado na Figura 2.33. Para mais detalhes a respeito dos tipos de juntas e chanfros, recomenda-se a leitura das normas (AWS A2.4, 2012; ISO 2553, 2018).

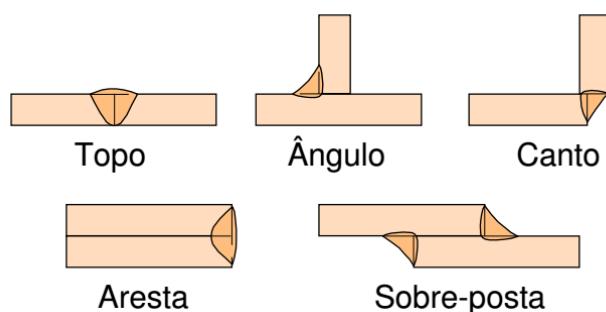


Figura 2.32 - Tipos mais usuais de juntas de soldagem. Fonte: (MODENESI, 2008)

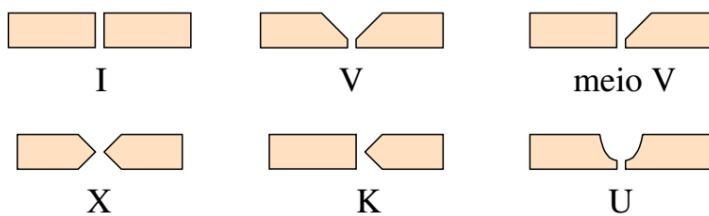


Figura 2.33 - Alguns tipos de chanfro. Fonte: (MODENESI, 2008)

Dentre as quatro variáveis não essenciais contidas nesse parágrafo (QW-402), será abordado as seguintes:

- QW-402.1, modificação no tipo de chanfro (sem preparação, “meio V”, em “V”, em “X”, em “U” e etc, ou ângulo de bisel, não requer nova qualificação).
- QW-402.10, modificação na abertura de raiz também não se torna necessário nova qualificação.

De Melo et al.(2016) concluíram que o aumento do ângulo de bisel diminui a tensão residual na soldagem de aço naval ASTM A131 grau AH-36 pelo processo GMAW, ao manter os demais parâmetros constantes. Uma possível justificativa dada pelos autores é que esta queda de tensão residual seja devido ao maior número de passes (necessário para preenchimento completo da junta de soldagem), que poderia funcionar como alívio de tensões. A medição de tensão residual no trabalho deles fora feita pelo método de Deslocamento de Pontos Coordenados (DPC). A variação da tensão residual encontrada foi da ordem de 145 MPa para 25° e 30 MPa para 35°. Salientando que esses valores foram obtidos após Tratamento Térmico de Alívio de Tensões à 740 °C, dessa forma a tensão residual obtida foi então calculada pelo escoamento reverso.

Partindo do pressuposto que foi abordado anteriormente (Item 2.2.1), que quando a distorção é impedida por algum meio de travamento, pode aparecer tensões residuais. Coraini; Kobayashi; Gonçalves (2011) verificaram durante a soldagem da liga de Alumínio AA 5052 H34, pelo processo GMAW-p (MIG/MAG pulsado) automatizado para as condições de juntas de topo montadas sem chanfro e com chanfro de 60°, dispostas tanto transversais quanto longitudinais ao sentido de conformação da chapa. A medição das deformações foi realizada por um braço tridimensional, antes e após a soldagem, em três regiões distintas nas placas de teste. Chegando à conclusão que as juntas com 60° apresentaram maior distorção. Pereira; Bracarense (2016) compararam as deformações obtidas em dois tipos de chanfros (“V” e “X”) durante soldagem de anéis segmentados a partir de chapas de aço de baixo carbono, ASTM A572 GR.50, pelo processo GMAW. A medição das distorções fora realizada

utilizando a metodologia de monitoramento contínuo da evolução das distorções de soldagem com sensores a laser. Concluíram que chanfro em “X” apresentam menores distorções que chanfro em “V”.

Reddy; Swamy (2013) mostraram que tanto o aumento do ângulo de chanfro (em chanfros “meio V” e V”) quanto uma maior abertura de raiz, aumentam a deformação transversal, quando soldaram chapas de aço estrutural pelo processo GMAW utilizando CO₂ como gás de proteção. Foi mantido a energia de soldagem constante (Tensão= 22 V, Corrente= 110 A, e Velocidade de Soldagem= 6m/min) e medido as deformações antes e depois da soldagem por paquímetro digital e relógio comparador. Resultados são mostrados na Figura 2.34.

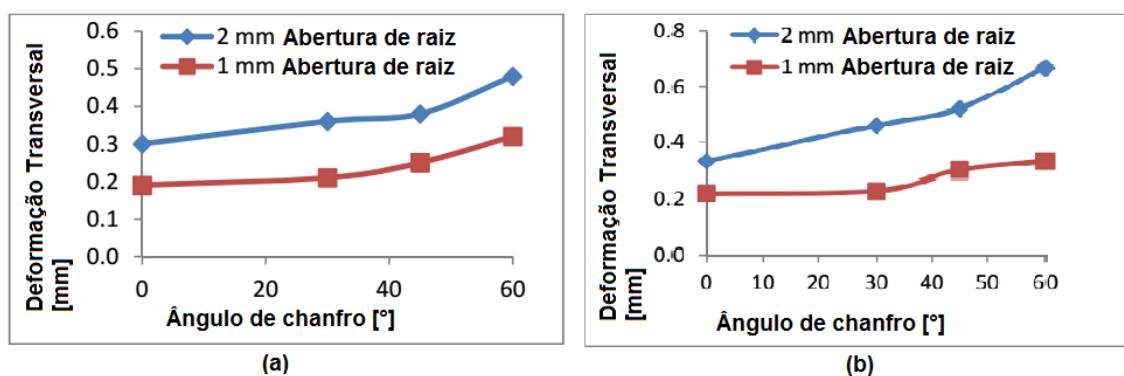


Figura 2.34 - Variação da deformação com a variação do angulo de chanfro para (a) “meio V” e (b) “V”. Adaptado de Reddy; Swamy (2013)

2.4.3.2. Diâmetro do arame-eletrodo

Referente ao processo GMAW, o QW-404.6 trata do diâmetro do arame-eletrodo, o qual descreve que uma modificação do diâmetro nominal do arame-eletrodo não requer nova qualificação de EPS.

Reddy; Swamy (2013) também realizam comparativo entre diferentes diâmetros de arames-eletrodo, mantendo-se todos os parâmetros de energia (tensão, corrente e velocidade de soldagem) constantes. Neste caso não encontraram diferenças significativas com esta variação, como pode ser visto na Figura 2.35.

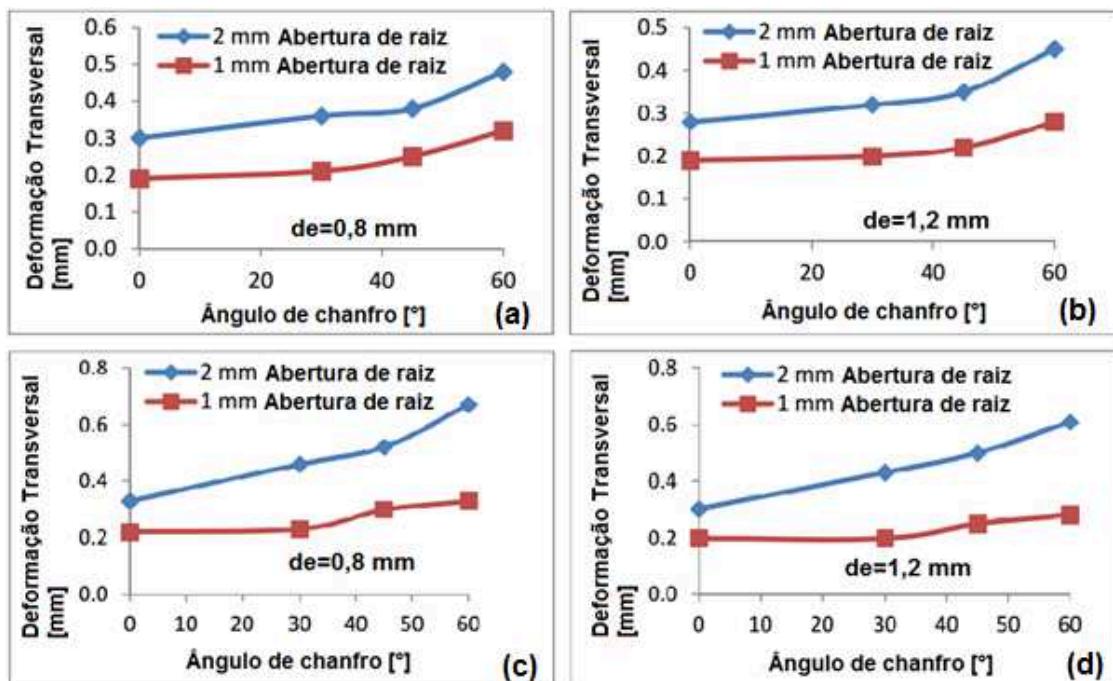


Figura 2.35 - Diferenças de distorções transversais com diferentes diâmetros de arames-eletrodo (de) e tipos de chanfros (a) e (b) chanfros em “meio-V” e (c) e (d) chanfros em “V”. Adaptado de Reddy; Swamy (2013)

2.4.3.3. Energia de Soldagem

A energia de soldagem é uma variável essencial suplementar, que pode ser calculada conforme Tabela 2.1 (QW-409.1). Optou-se por abordá-la juntamente com as variáveis não essenciais devido ao fato de que a junta a ser testada não terá requisitos de impacto, dessa forma esta variável não seria aplicável. Como a energia de soldagem é um parâmetro bastante utilizado pela sua forma simples de medida, mas que numericamente não representa uma relação direta com os efeitos gerados na peça, por ser dependente de três parâmetros não ortogonalmente dependentes, ou seja, afetam de forma diferente o comportamento do arco (MODENESI, P., MARQUES, P., SANTOS, 2012).

Para Masubuchi (1980), quando se utiliza de aços de Alta Resistência e Baixa Liga (ARBL) é sempre importante considerar os efeitos da energia de soldagem nas

transformações metalúrgicas, com intuito de obter microestruturas melhores na ZAC. As principais causas e efeitos são: Evitar rápido resfriamento de forma a minimizar, diminuir ou anular a formação de martensita dura e frágil, com maiores possibilidades de trincas; Evitar resfriamento lento de forma a minimizar a formação de microestruturas muito dúteis. A Figura 2.36 mostra um diagrama esquemático representando o efeito da energia de soldagem na intensidade da tensão residual transversal, onde a curva 1 representa alta energia de soldagem e a curva 3 representa baixa energia de soldagem.

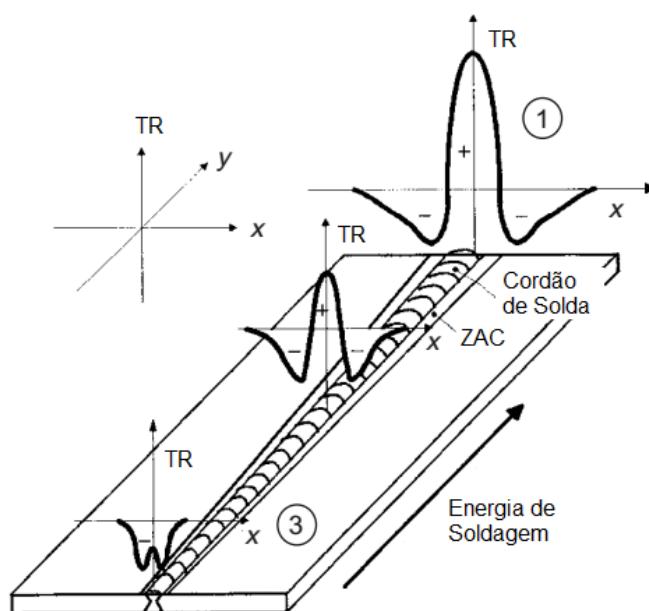


Figura 2.36 - Diagrama esquemático do efeito da energia de soldagem nas Tensões Residuais (TR). Adaptado de: Totten; Howes; Inoue (2002)

2.4.3.4. Faixa de corrente e tensão

Esta variável é abordada pelo QW-409.8, o qual retrata que uma modificação na faixa de corrente, ou forma controlada de onda de soldagem, modificação na faixa de tensão não requerem nova qualificação de EPS.

Estes parâmetros podem influenciar de forma diferente na forma de introduzir energia na peça, afetando diferentemente o fluxo de calor durante e após soldagem (ver Item 2.1). Sendo assim suas influências nas tensões residuais podem, também, ser influenciadas de diferentes formas. A Figura 2.37 mostra como a densidade de energia (J/mm^2s) varia com a influência de cada desses parâmetros.

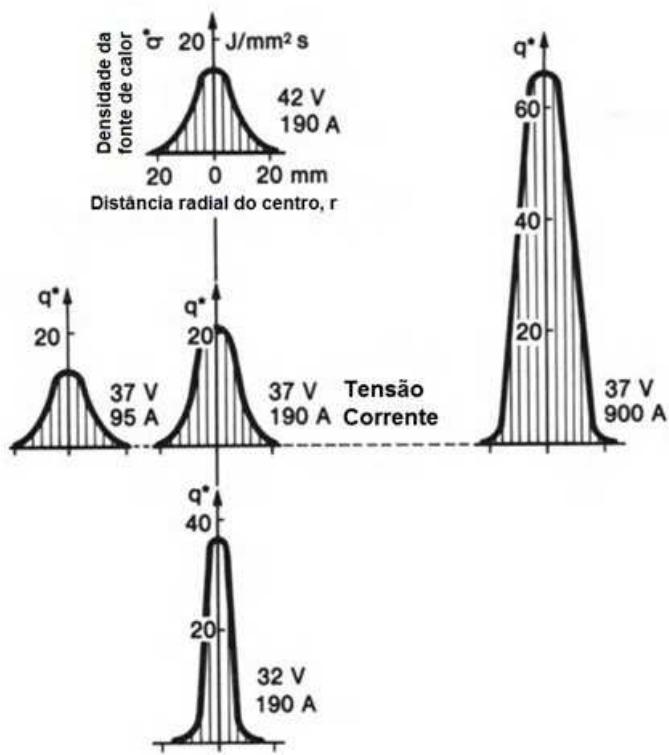


Figura 2.37 - Efeito dos parâmetros de soldagem (Corrente e Tensão) na densidade de energia imposta (J/mm^2s). Adaptado de Radaj (1992)

Devido ao fato que a variação dos parâmetros de corrente e tensão influenciam diretamente na energia de soldagem, a revisão bibliográfica desses três efeitos (corrente, tensão e energia de soldagem) serão realizados juntamente.

Araújo et al. (2013) concluíram que o aumento da energia de soldagem provocou um aumento de até 59% nas tensões residuais transversais (compressivas) na superfície superior em juntas do aço API 5L X80, medidos por difração de Raios-X. Já na superfície inferior (lado da raiz da solda), concluíram que o aumento da energia de soldagem aumentou em 3,6 vezes as tensões residuais transversais (trativas).

Oliveira (2008) concluiu que a energia de soldagem apresentou uma relação não-linear com as tensões residuais geradas nas superfícies das juntas soldadas. Também observou que ao avaliar a energia de soldagem, o efeito da Velocidade de Soldagem se mostrou mais influente na geração de tensões residuais que o efeito da Corrente, como mostrado nas Figura 2.38 e Figura 2.39. Para tais afirmações, foram realizadas soldagem em Aço A516 Gr70 pelo processo SMAW (Shield Metal Arc Weld ou mais conhecido em português como Eletrodo Revestido) utilizando eletrodo com especificação AWS E8010G e medições de tensões residuais por difração de Raios-X.

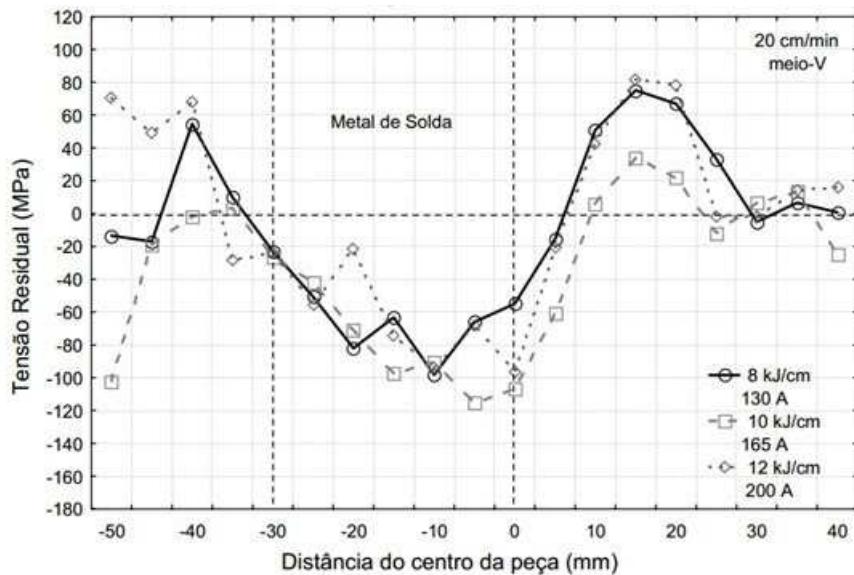


Figura 2.38 - Distribuição de tensões residuais transversais, verificando o efeito da energia de soldagem pelo efeito da variação da corrente. Fonte: (OLIVEIRA, 2008)

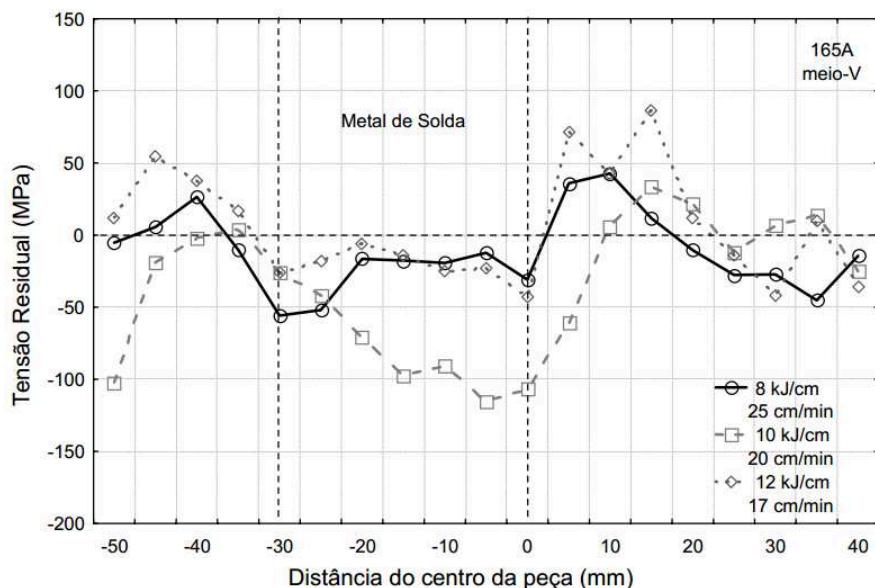


Figura 2.39 - Distribuição de tensões residuais transversais, verificando o efeito da energia de soldagem pelo efeito da variação da velocidade de soldagem. Fonte: (OLIVEIRA, 2008)

(Hemmatzadeh; Moshayedi; Sattari-Far (2017) concluíram que o aumento da energia de soldagem em 100% pode aumentar as tensões residuais axiais e circunferenciais em até 200%. Estes resultados foram obtidos por simulação numérica avaliando soldagem de tubos em Aço API X46 considerando transformações de fase. Concluiu-se também neste trabalho

que a hipótese de alta energia imposta na soldagem de tubos com baixa razão diâmetro do tubo pela espessura, houve aumento das tensões residuais axiais de 8 MPa para até 540 MPa.

2.4.3.5. Quantidade de passes

A variável que trata da modificação de soldagem de uma EPS utilizando multipasses para uma solda com passe simples é o QW-410.9, o qual retrata que esse fato não requer nova qualificação de EPS, exceto quando utilizado Tratamento Térmico Pós Soldagem (TTPS) acima da temperatura de transformação ou para o P-No. 10H.

Este efeito já fora comentando no Item 2.2.2, que segundo Radaj (1992) os passes de camadas intermediárias (entre o passe raiz e a última camada de acabamento) são pré e pós aquecidos.

Sattari-Far; Farahani (2009) obtiveram algumas conclusões a respeito da soldagem multipasse em tubos. Em tubos de parede fina (6 mm) o número de passes de solda não apresentou efeito significativo na distribuição de tensões residuais na superfície, em se tratando de tensões circunferenciais, na superfície interna dos tubos, as mesmas diminuem significativamente quando o número da passes aumenta. Para tubos de parede mais espessa (10 mm) o aumento no número de passes aumenta significativamente as tensões axiais trativas na superfície interna do tubo. No centro dos cordões de solda, a magnitude das tensões residuais, no meio da espessura do tubo, aumentou quando o número de passes diminuiu.

2.5. Qualificação de uma Junta Soldada segundo ASME IX

Após soldagem das chapas de teste, é necessário levá-las a prova com intuito de testá-las e atestar a garantia das propriedades mecânicas da junta. Antes de se iniciar a soldagem propriamente dito, é necessário o planejamento (não levando em conta aqui os parâmetros operacionais) do material a ser ensaiado, como: dimensões das chapas de testes (QW-462 e QW-463), quantidades de corpos de prova (QW-451), tipos de testes a serem realizados (QW-451).

2.5.1. Ensaios Mecânicos Destrutivos

A partir do QW-451 (Anexo B) sabe-se quais e quantos ensaios destrutivos são necessário para atestar a resistência mecânica da junta. Os testes necessários consistem em testes de tração, testes de dobramento de raiz e face e, para espessuras maiores ou iguais a 19 mm, testes de dobramento lateral. Os procedimentos de teste consistem em:

- Teste de tração: O corpo de prova deverá ser rompido sob carga de tração. O limite de resistência deverá ser calculado dividindo o valor da carga máxima atingida dividido pela área da secção transversal, medida antes do ensaio. Os critérios de aceitação para este teste são descritos no QW-153.1. O resultado do ensaio de tração será considerado aprovado se o limite de resistência for maior que: a) o limite de resistência a tração, mínimo especificado, do metal de base, conforme QW/QB-422, ou; b) o limite de resistência a tração, mínimo especificado, do material menos resistente, no caso de soldagem de juntas dissimilares, ou; c) o limite de resistência a tração, mínimo especificado, do cordão de solda quando a Secção aplicável prevê o uso de metal de adição com menor resistência que o metal de base à temperatura ambiente e; d) se o corpo de prova se romper no metal de base, o ensaio será aceito, contando que a resistência seja maior que 95% do limite máximo de resistência a tração, especificado, do metal de base.
- Testes de dobramento: O corpo de prova deverá ser dobrado em dispositivo de acordo com QW-466. Deverá ser forçado para dentro da matriz através de uma força exercida sobre um cutelo de diâmetro igual ou menor ao apresentado em QW-466.1. O lado do corpo de prova voltado para a matriz deverá ser a superfície a ser analisada (por exemplo, dobramento de raiz, a superfície da raiz voltada para a matriz), para dobramento laterais deve-se voltar para a matriz o lado com mais descontinuidades visuais. Os critérios de aceitação são descritos no QW-163. A ZF e ZTA de um corpo de prova submetido ao ensaio de dobramento transversal deverá estar completamente dentro da porção dobrada do corpo de prova. Os corpos de prova não deverão apresentar nenhuma descontinuidade na ZF ou ZTA que exceda 3 mm, medida em qualquer direção sobre a superfície convexa do corpo de prova após teste.

2.5.2. Ensaios Não Destrutivos (END's)

A ASME IX (2017) não requer a realização de END's para qualificação de EPS. Porém são usualmente realizados estes ensaios como garantia de que a ruptura durante ensaio de tração seja única e exclusivamente por efeitos de resistência mecânica ou efeitos metalúrgicos. De forma a evitar que defeitos de soldagem afetem os resultados destes testes.

Os END's mais comumente utilizados como forma de auxiliar, por não ser mandatório, a qualificação de EPS, são o Ensaio Visual e Dimensional, mais comumente chamado de Ensaio Visual de Soldagem (EVS), Líquido Penetrante (LP) e o Ultrassom (US).

Em Guia ABENDI (2018) o ensaio EVS é um método de verificação rápido, simples e com baixo custo. Realizado a olho nu e normalmente o primeiro END realizado em qualquer tipo de solda. É importante para verificação de alterações dimensionais, padrão de acabamento e descontinuidades superficiais. No procedimento de qualificação e recertificação de inspetores, Abendi PR-050 (2011), utilizado para verificação de juntas preparadas para soldagem e após a realização da solda. Na etapa anterior ao processo de soldagem são verificados itens tais como: Ângulo de bisel, abertura de raiz, alinhamento e embicamento (pré-deformação). Já inspeção pós soldagem são verificados os itens: Trinca, falta de fusão, falta de penetração, concavidade, deposição insuficiente, porosidade, mordedura, sobreposição, abertura de arco, respingo, penetração excessiva, reforço excessivo e perfuração.

O ensaio por líquidos penetrantes é um método desenvolvido especialmente para a detecção de descontinuidades essencialmente superficiais, e ainda que estejam abertas na superfície do material, tais como trincas, poros, dobras, etc. podendo ser aplicado em todos os materiais sólidos e que não sejam porosos ou com superfície muito grosseira. É muito usado em materiais não magnéticos como alumínio, magnésio, aços inoxidáveis austeníticos, ligas de titânio, e zircônio, além dos materiais magnéticos. É também aplicado em cerâmica vitrificada, vidro e plásticos. O método consiste em fazer penetrar na abertura da descontinuidade um líquido. Após a remoção do excesso de líquido da superfície, faz-se sair da descontinuidade o líquido retido através de um revelador. A imagem da descontinuidade fica então desenhada sobre a superfície (ANDREUCCI, 2016a).

O ensaio de ultrassom é um método de ensaio não destrutivo baseado em ondas ultrassônicas que visam a detecção de defeitos internos ao material ou com intuito de medição de espessura de paredes de tubos, vasos e etc, também utilizado para detecção de corrosão. Este ensaio consiste na emissão e recepção de uma onda mecânica e ultrassônica do tipo pulso-eco através do material. Esta onda é interrompida e parcialmente devolvida pela presença de imperfeições internas ou na parte posterior da peça. E através desses ecos

(retorno dos sinais), sejam eles da parede posterior da peça, sejam das imperfeições, que se localizam as descontinuidades e dimensões das mesmas (ANDREUCCI, 2016b)

CAPÍTULO III

METODOLOGIA

3.1. Premissas de testes

Para a realização, comparação e análise dos resultados a serem obtidos foram definidas as seguintes premissas:

- Processo de soldagem MAG-CC;
- Metal base em Aço Carbono ABNT 1045 ($\sigma_y = 384 \text{ MPa}$ e $\sigma_u = 625 \text{ MPa}$) com espessura de 4,75 mm (3/16 in), largura de 50,8 mm (2 in) e comprimento aproximado de 280 mm;
- Metal de adição ER70S-6 ($\sigma_y = 400 \text{ MPa}$ e $\sigma_u = 480 \text{ MPa}$), valores mínimos, conforme catálogo do fabricante, Anexo D, (F-No 6, A-No 1);
- Energia de soldagem constante;
- Corrente constante;
- Taxa de deposição por comprimento de solda constante (g/cm);
- Peça travada (com restrição) antes, durante e após soldagem;
- Medição de tensão residual com a peça travada (anterior e posterior ao processo de soldagem) e após remoção da peça soldada do suporte;
- Realização dos ensaios mecânicos previstos na ASME IX (2017).

Foi escolhido o aço ABNT 1045 pela maior resistência mecânica, menor ductilidade, o que poderia propiciar uma maior magnitude das tensões residuais. A espessura de 4,75 mm foi adotada como critério para realização da soldagem em passe único aliada a uma velocidade de soldagem que não fosse tão baixa que pudesse prejudicar a penetração ou causar inclusão de escoria ou cordão muito irregular, nem tão alta que possa obter cordões muito convexos ou mordeduras. Diante disso foi selecionada a largura de 2 in para a chapa

devido a menor predisposição a deformação por flambagem, conforme Figura 2.12, e pela disponibilidade, em largura padrão, não maior que esta dimensão para a espessura adotada.

Como efeito de comparação, adotou-se modificar duas variáveis essenciais e duas variáveis não essenciais, a fim de estudar a real influência das mesmas na geração de tensão residual e posteriormente na resistência mecânica da junta. As variáveis adotadas foram:

- Alteração nos tipos de chanfros (45° e 60°), Figura 3.1;
- Alteração nos diâmetros dos arames-eletrodos (1,0 mm e 1,2 mm);
- Alteração na temperatura de pré-aquecimento (150°C e Temperatura Ambiente);
- Alteração na composição do gás de proteção ($\text{Ar}+25\text{CO}_2$, identificado como C25, e $100\%\text{CO}_2$).

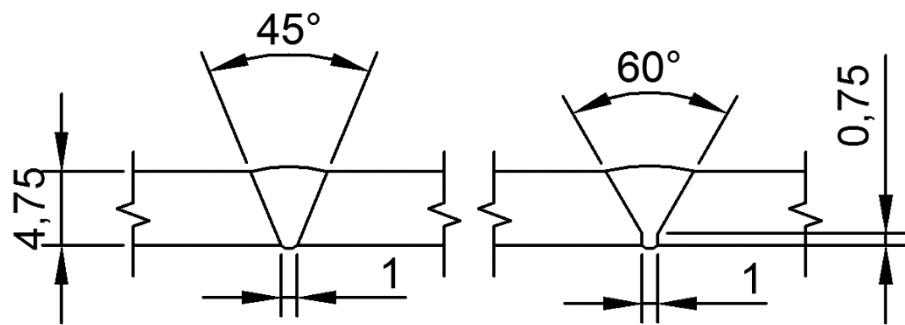


Figura 3.1 - Desenhos de juntas a serem utilizados

Sendo assim, deu-se a nomenclatura dos testes realizando o agrupamento das variáveis na sequência que são mostradas no QW-251 da ASME IX (2017), organizados da seguinte maneira, mostrados abaixo:

- $45^\circ\text{-}\varnothing1,00\text{-Tamb-C25-sequencial}$;
- $45^\circ\text{-}\varnothing1,00\text{-Tamb-CO2-sequencial}$;
- $45^\circ\text{-}\varnothing1,00\text{-T150-C25-sequencial}$;
- $45^\circ\text{-}\varnothing1,20\text{-Tamb-C25-sequencial}$;
- $60^\circ\text{-}\varnothing1,00\text{-Tamb-C25-sequencial}$.

Neste trabalho não se realizou o fatorial completo devido ao elevado tempo dos ensaios envolvidos, principalmente a preparação e medições de tensões residuais. Desta forma tomou-se $45^\circ\text{-}\varnothing1,00\text{-Tamb-C25}$ como condição padrão de comparação, e partir da mesma alterou-se as variáveis propostas.

Para que se consiga realizar as soldagens com estas diferentes condições, adotou-se como parâmetros variáveis: Tensão, Distância entre Bico de Contato e Peça (DBCP), Velocidade de Alimentação, Velocidade de Soldagem, desde que atenda as premissas anteriormente citadas.

O comprimento das chapas de testes é obtido através da quantidade e tipo de ensaios requeridos, conforme QW-451, já discutido anteriormente. Através dessa quantidade o QW-463.1(a) (Anexo B) mostra a disposição dos corpos de prova na chapa de teste. O QW-462.1(a) (Anexo C) mostra as dimensões mínimas para realização do ensaio de tração e o QW-462.3(a) (Anexo C) mostra as dimensões mínimas para ensaio de dobramento, o QW-466.1 (Anexo C) mostra as dimensões do dispositivo de dobramento (cutelo) de forma a se obter o alongamento mínimo do material ensaiado. Após compilação de todos estes "QW" obtém-se o comprimento mínimo das chapas de teste. Importante ressaltar que para efeito desta dissertação, optou-se pela realização de somente 1 teste de tração, 1 teste de dobramento da face e 1 teste de dobramento da raiz por chapa soldada. Daí obteve-se o comprimento de 280 mm especificado anteriormente.

3.2. Aparato experimental

A realização das atividades foi dividida em etapas de acordo com a sequência lógica das atividades. É mostrado na Figura 3.2, de forma esquemática, o fluxograma das atividades realizadas.

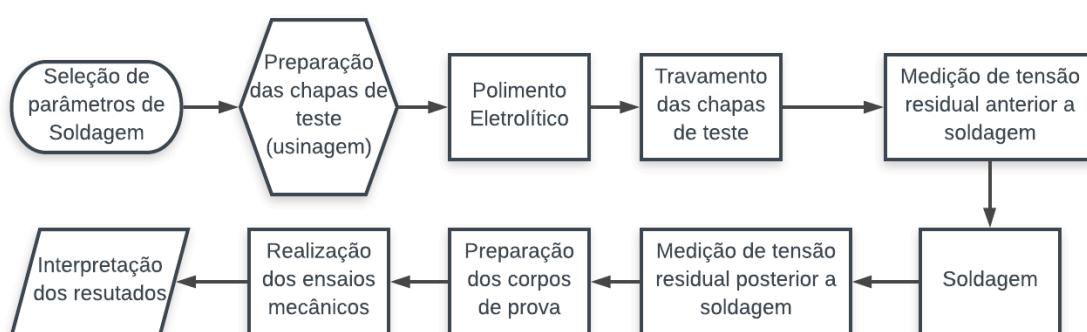


Figura 3.2 - Sequência esquemática das atividades

Já o aparato experimental utilizado é dividido seguindo as principais etapas de trabalho que são:

- Soldagem, o aparato experimental relacionado a atividade de soldagem consiste nos seguintes equipamentos:
 - Fonte de soldagem (MTE Digitec 300 – IMC/LABSOLDA), para dados técnicos do equipamento, ver Anexo E;
 - Tocha de soldagem (275 A com mistura gasosa);

- Sistema de movimentação da tocha (Mesa X-Y com faixa de operação de 1000x570 mm nos eixos X e Y, respectivamente, e velocidades entre 0,1 e 80mm/s, fabricada no LAPROSOLDA), ver curva de calibração em Anexo E;
- Alimentador do arame de soldagem (STA-20), ver curva de calibração em Anexo E;
- Cilindro do gás de proteção (Ar+25CO₂ ou CO₂).
- Polimento eletrolítico, para realização desta etapa foi utilizado o equipamento mepBLITz DC-i5 da empresa *Metals Science Technologies* mostrado na Figura 3.3;
- Medição de tensões residuais, para realização das medições de tensões residuais utilizou-se o equipamento TEC 4000, da empresa *Materials Testing*, mostrado na Figura 3.4.
- Realização dos ensaios mecânicos, para realização dos ensaios mecânicos de tração e dobramentos utilizou-se o equipamento Shimadzu AG-X 300kN, mostrado na Figura 3.5.



Figura 3.3 - Imagem do equipamento de polimento eletrolítico (mepBLITz DC i5). Fonte: ("Weldgina", 2018)



Figura 3.4 - Fotos do equipamento de medição de tensão residual. À esquerda a estação de trabalho (*Workstation*) e à direita o difratômetro



Figura 3.5 - Figura do equipamento universal de testes marca Shimadzu AG-X 300kN. Fonte: (“Shimadzu”, 2018)

3.3. Sistema de travamento

Como já mencionado ao longo deste trabalho, a restrição aos movimentos de dilatação e contração intensificam a geração de tensões residuais, ou sendo mais claramente, provoca a geração de tensões residuais de origem térmica. Assim sendo, foi utilizando um dispositivo como forma de realizar a restrição aos movimentos de dilatação e contração do metal de base.

Objetivando a restrição às distorções transversais, longitudinais, angulares e rotacionais, bem como distorção por empenamento e flambagem, ver tipos de distorção na Figura 2.7. A Figura 2.14 mostra esquematicamente o travamento a estes movimentos.

Este dispositivo é construído em Aço Carbono ABNT 1020 com espessura de 12,7 mm (1/2"), Figura 3.6 (com furação que possibilitasse a realização de medições de tensões residuais na face da raiz da solda), e utilizados 8 parafusos M12 x 1,50 x 40 mm, dimensões: MB DIN 960 / Rosca: DIN 13 - (ISO 965) - 6g / Classe de resistência: 10.9 ($\sigma_y = 900 MPa$) com dupla arruela e porcas sextavadas M12 x 1,50, dimensões: DIN 934 / Rosca: DIN 13 (ISO 965) - 6H / Classe de resistência: 8. Utilizou-se de dois dispositivos de reforço, um constituído de uma chapa em Aço Carbono ABNT 1020 com espessura de 6,35mm (1/4in), Figura 3.7, inicialmente concebida como gabarito de furação e outra construída em cantoneiras de abas iguais 1"x1"x1/8", Figura 3.8. A Figura 3.9 mostra a montagem final do sistema de travamento.

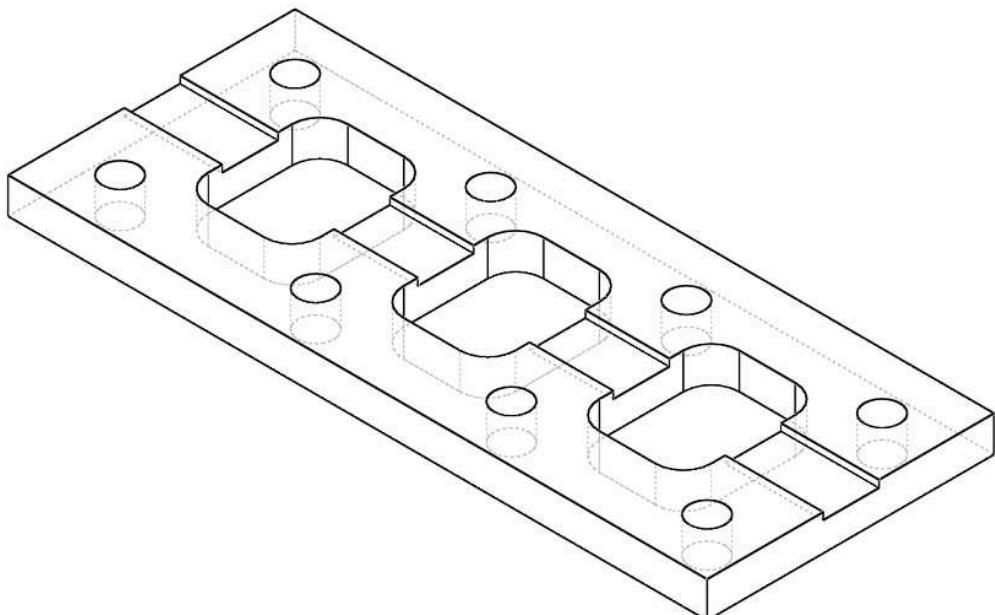


Figura 3.6 - Desenho do suporte de travamento com espessura de 12,7 mm (1/2 in)

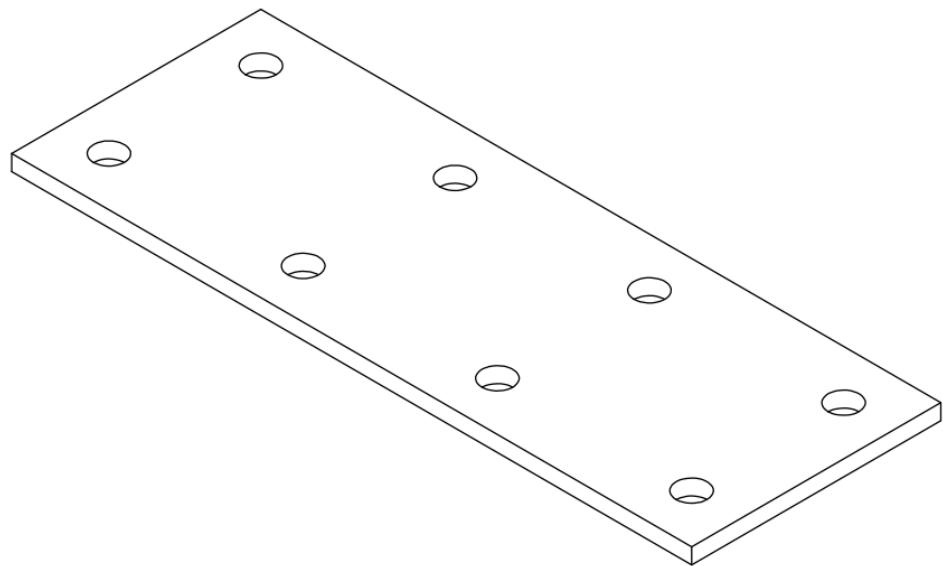


Figura 3.7 - Desenho da chapa utilizada como gabarito de furação e como reforço no sistema de travamento com espessura 6,35 mm (1/4 in)

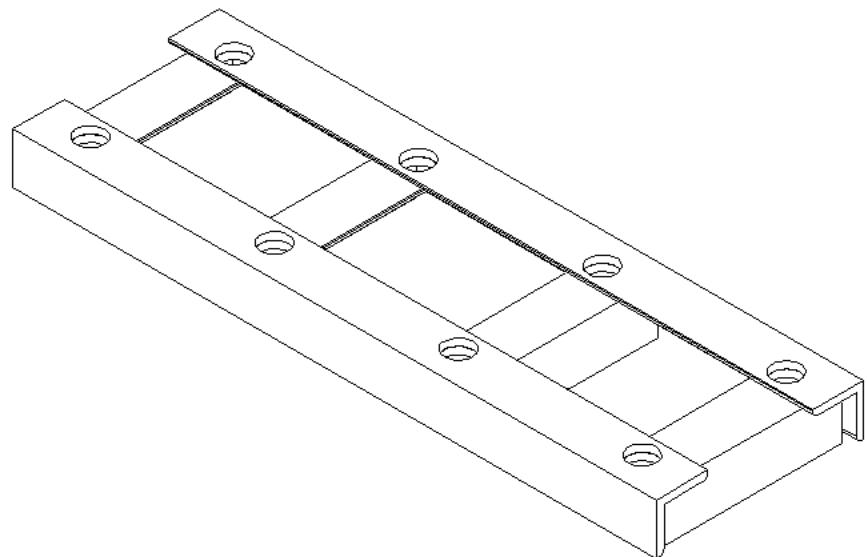


Figura 3.8 - Desenho do reforço do sistema de travamento fabricado com cantoneiras

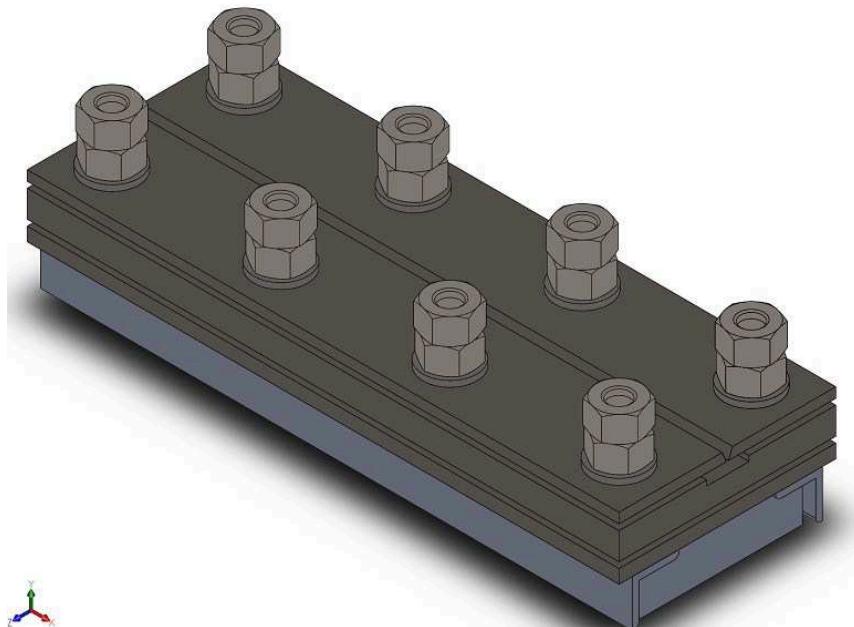


Figura 3.9 - Desenho do sistema de travamento

Durante fixação das chapas de teste padronizou-se o aperto dos parafusos segundo a classe de resistência dos parafusos, mesmo que as porcas possuam menor classe de resistência, as mesmas são menos solicitadas que os parafusos, pois nelas ocorrem somente a esforço trativo dos fios de rosca, em quanto que os parafusos são solicitados a combinação de esforços de tração e torsão (GARCIA, 2011). Utilizou-se sequência de aperto cruzado, realizada em três (3) etapas. Primeiro aperto manual de todos os parafusos com aplicação de torque manual, posteriormente torque de 100 N.m (escala mínima do torquímetro) e por último torque previsto para a classe de resistência e diâmetro do parafuso de 110 N.m. O esquema de aperto é mostrado na Figura 3.10. Foi utilizado o torquímetro Marca Sata, modelo 96401 NTP-500N com escala entre 100 e 500 N.m, ver certificado de calibração no Anexo E.

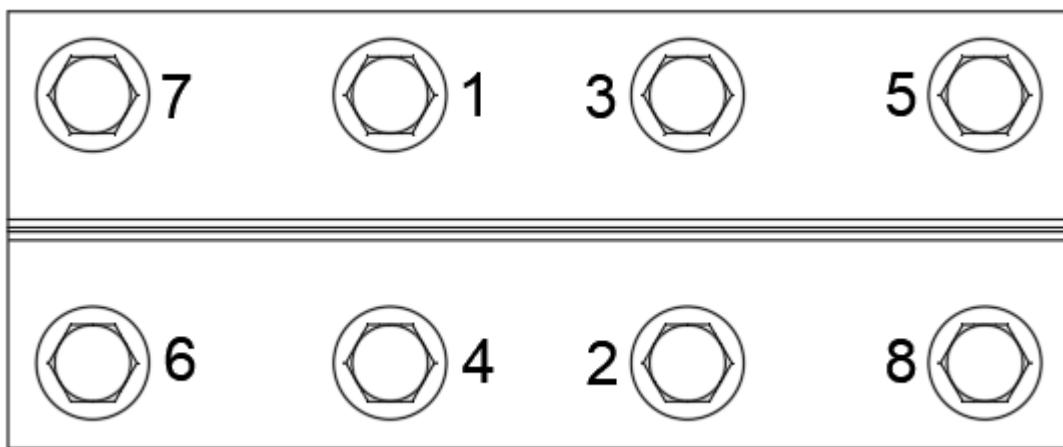


Figura 3.10 - Sequência de aperto durante travamento das chapas de teste

Durante o desaperto, para retirada das chapas soldadas do suporte, obteve-se o valor do torque necessário para este objetivo, possibilitando, dessa forma, verificar a tendência maior ou menor de distorção angular. A sequência de desaperto utilizada foi inversa à de aperto, sendo assim: 8-7-6-5-4-3-2-1, mostrado na Figura 3.10.

Buscando a verificação do grau de restrição do suporte, realizaram-se medições da largura total das chapas, após montagem da junta de soldagem, anteriormente e posteriormente ao processo de soldagem, objetivando verificar possíveis contrações transversais e distorção rotacional, bem como medições de posições na superfície da face superior, visando verificar possíveis distorções angulares. As medições de largura foram executadas através do uso de um paquímetro e as medições de posição na face superior através do uso de relógio comparador.

Foi escolhida a condição de maior tensão residual gerada (diferença entre a tensão antes da soldagem e a tensão após soldagem, com o sistema ainda travado), bem como o maior módulo de tensão residual após soldagem. Realizando um único monitoramento.

A Figura 3.11 mostra esquematicamente as medições realizadas antes e depois do processo de soldagem. As medições nas posições V1, V2, V3 e V4 são verificações quanto às distorções travessais e rotacionais e as medições nas posições H1 e H2 são verificações quanto às distorções longitudinais. As medições na face, apontados pelos pequenos círculos são verificações quanto às distorções angulares, empenamento e flambagem.

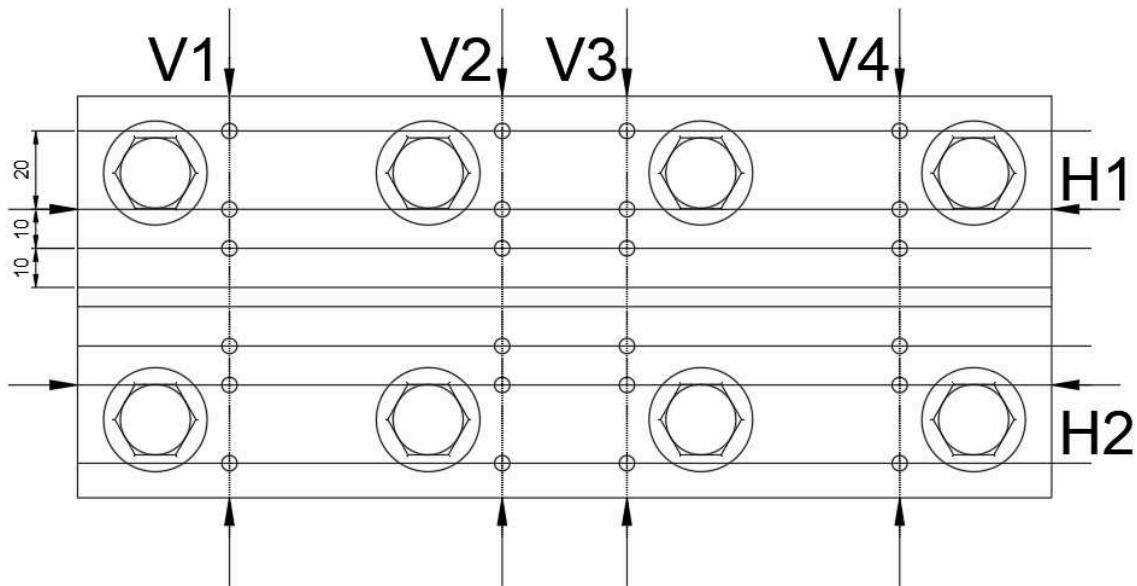


Figura 3.11 - Desenho esquemático mostrando as posições de medições para validação do sistema de travamento

3.4. Soldagem

Na soldagem pelo processo MAG-CC, são necessários os ajustes dos seguintes parâmetros: Tensão de referência, Velocidade de Alimentação, Velocidade de Soldagem, Tipo e Vazão de Gás e DBCP (Distância Bico de Contato à Peça). Os valores utilizados são mostrados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Parâmetros de soldagem ajustados

Condição	Uref [V]	V _a [m/min]	V _s [cm/min]	DBCP [mm]	Gás [L/min]
45°-Ø1,00-T150-C25	22,0	4,5	21,0	22	C25 [15 a 17 L/min]
45°-Ø1,00-Tamb-C25	21,8	4,6	21,3	22	C25 [15 a 17 L/min]
45°-Ø1,00-Tamb-CO2	22,5	4,6	21,5	21	CO2 [15 a 17 L/min]
45°-Ø1,20-Tamb-C25	19,0	2,8	17,7	20	C25 [15 a 17 L/min]
60°-Ø1,00-Tamb-C25	21,5	4,6	21,3	20	C25 [15 a 17 L/min]

A soldagem foi realizada em passe único, os arranjos das juntas, Figura 3.1, foram elaborados de forma a se obter a mesma área de secção transversal da união soldada, dessa forma, mantendo-se a relação entre as velocidades de alimentação e de soldagem, obtém-se a mesma taxa de deposição [kg/h]. No entanto, como optou-se por variar o diâmetro do arame-

eletrodo, foi necessário outro parâmetro para controlar essa taxa de deposição, visto que ao aumentar a área do arame-eletrodo, também aumentaria a deposição. Sendo assim, o melhor parâmetro comparativo observado foi a taxa de deposição por comprimento de solda [g/cm]. A Tabela 3.2 mostra, para cada condição, a relação entre as velocidades, taxa de deposição e taxa de deposição por comprimento de solda, demonstrando o acima explicitado.

Tabela 3.2 - Tabela com parâmetros relativos à deposição de soldagem

Condição	V _a [m/min]	V _s [cm/min]	V _a /V _s	Deposição [kg/h]	Deposição [g/cm]
45°-Ø1,00-T150-C25	4,5	21,0	21,4	1,654	1,313
45°-Ø1,00-Tamb-C25	4,6	21,3	21,6	1,691	1,323
45°-Ø1,00-Tamb-CO2	4,6	21,5	21,4	1,691	1,311
45°-Ø1,20-Tamb-C25	2,8	17,7	15,8	1,482	1,396
60°-Ø1,00-Tamb-C25	4,6	21,3	21,6	1,691	1,323

O aquecimento para a soldagem na condição de pré-aquecimento a 150°C, foi realizado mediante uso de maçarico com gás acetileno e oxigênio. Foi monitorado a temperatura o mais próximo possível da borda (~10 mm) em 6 (seis) pontos, 3 (três) em cada chapa de teste, localizados em posições intermediárias aos parafusos.

3.5. Polimento eletrolítico e medição de tensão residual

Como abordado no Item 2.2.2 sobre a significância maior das tensões residuais transversais diante das longitudinais, optou-se pela medição somente na direção transversal ao cordão de solda.

A medição de tensão residual, e consequentemente do processo de polimento eletrolítico, foi realizada na linha central da chapa soldada (transversalmente ao cordão de solda), realizando-se a medição de 4 (quatro) pontos, sendo 2 (dois) em cada chapa de forma que ficassem simétricos em relação a linha central da solda. Tais pontos foram escolhidos de forma que ficassem próximos um do outro, simulando uma medição numa área maior. Esta linha é localizada entre furação para fixação mediante parafusos, de forma a coincidir com a posição na qual será retirado o corpo de prova para ensaios mecânicos, privilegiando, também, a região central, o qual apresenta maior valor de tensão residual, conforme 2.2.2 e Figura 2.19.

A Figura 3.12 mostra esquematicamente a região na qual foi realizado o polimento eletrolítico (região retangular) e pontos nos quais foram medidas as tensões residuais (círculos), medindo-se 2 (dois) pontos em cada chapa, simetricamente equidistante do centro do cordão de solda.

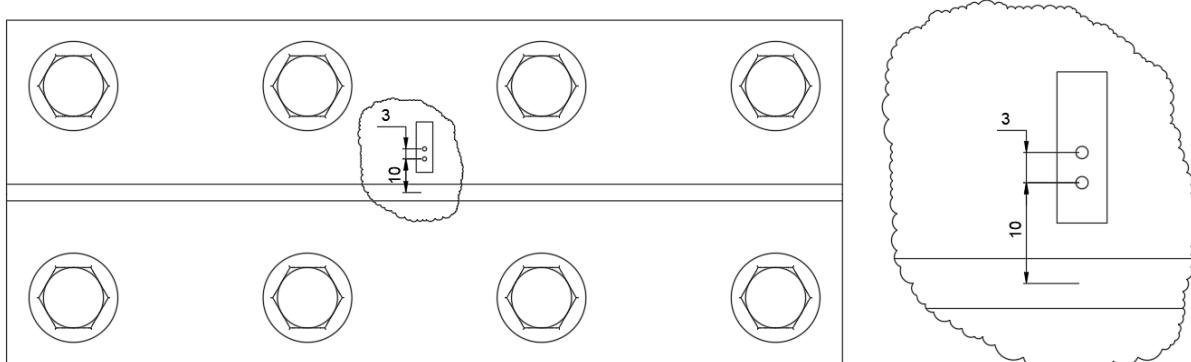


Figura 3.12 – Desenho esquemático mostrando a região onde foi realizado o polimento eletrolítico (região retangular) e locais de medição de tensão residual (círculos)

As medições de tensões residuais foram realizadas utilizando um colimador de Ø3mm objetivando um balanço de área e intensidade de pico melhoradas. Segundo Noyan; Cohen, (1987) colimadores são dispositivos usados para limitar e definir parte dos feixes de raios-X divergentes de forma que os mesmos sejam mais paralelos e com foco no ponto a si medir as tensões residuais.

Segundo Fitzpatrick et al. (2005), uma regra para se obter boa intensidade de pico e dessa forma minimizar erros de medição é de obter no mínimo 1000 contagens no detector. O que segundo Prevéy (1986) daria uma resolução de aproximadamente 3%, segundo este autor a precisão da medição é inversamente proporcional à raiz quadrada das contagens no detector.

Como parâmetros utilizados para o polimento eletrolítico utilizou-se, como referência os parâmetros estudados por Mishchenko; Oliveira; Scotti (2016), conforme abordado no Item 2.3.1. Dessa forma utilizou-se: Corrente de 20A, Solução Eletrolítica composta por 9% de H_2SO_4 e 18% de H_3PO_4 e tempo de ataque de aproximadamente 60s com movimento oscilatório manual.

Em relação à medição de tensões residuais foram utilizados os seguintes parâmetros: 25 KV, 0,3 mA, ângulos de medição de 0°, 10°, 20°, 30°, 40° e 50° com oscilação de +/- 2° e tempo de medição em cada ponto de 45 s.

3.6. Realização de ensaios mecânicos

Como relatado anteriormente no Item 2.5.1, a quantidade de testes são reduzidas em relação ao exigido pela ASME IX (2017). Também optou por um arranjo diferente na disposição dos ensaios, de forma que os corpos de prova para ensaio de tração situassem-se na parte central das chapas de teste e os corpos de prova para dobramento de face e raiz mais próximos às bordas da chapa de teste, conforme Figura 3.13.

Os corpos de prova para ensaio à tração foram fabricados conforme QW-462.1(a) pelo processo por jato de água, os corpos de prova para ensaios ao dobramento de face e raiz conforme QW-462.3(a), ambos mostrados no Anexo C, utilizando como base de cálculo as especificações da SAE J1397 (1992) (deformação de 16%), utilizando, desta forma cutelo com diâmetro de 25,4mm. O desenho referente ao ensaio à tração é mostrado na Figura 3.14. O ensaio de tração foi realizado com a velocidade de carga de 0,5mm/min, conforme ASTM E8 / E8M-16A (2016).

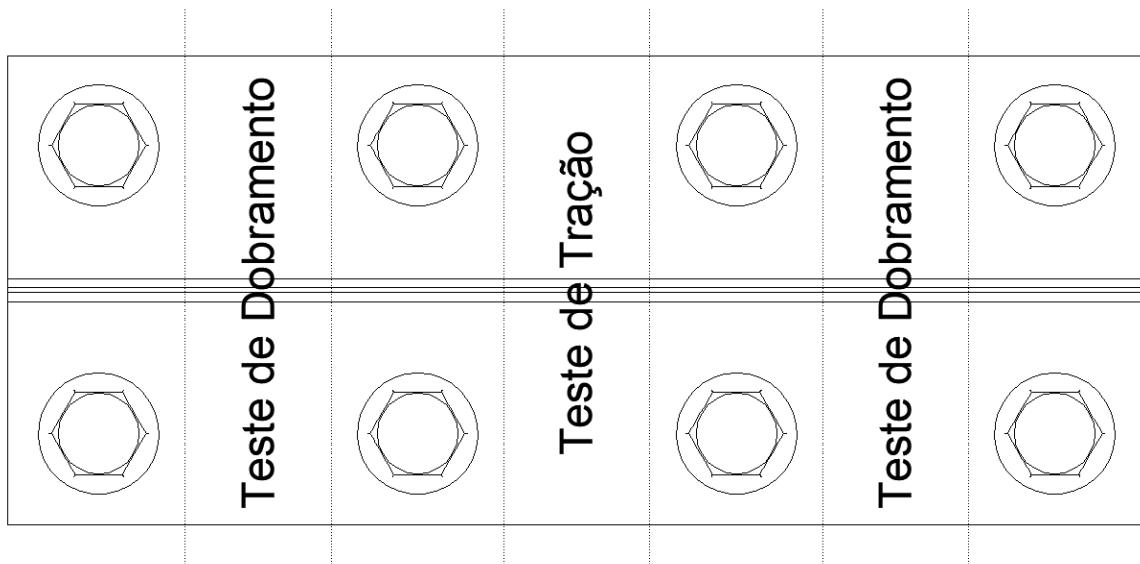


Figura 3.13 - Desenho com localização dos corpos de teste para ensaios mecânicos

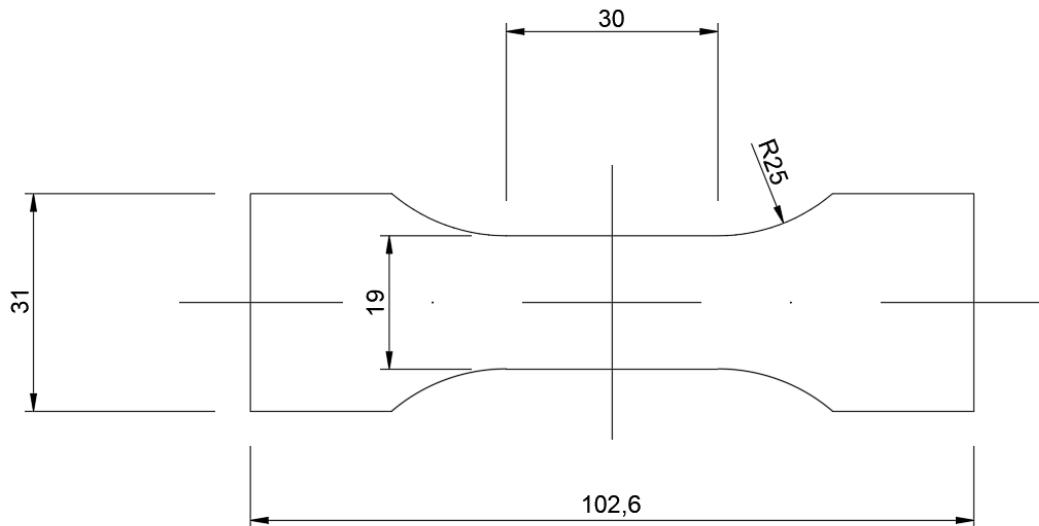


Figura 3.14 - Corpo de prova de uma junta soldada, quanto a tração, fabricado conforme ASME IX (2017)

Ademais, objetivando-se uma melhor caracterização do material adquirido, optou-se pela realização de ensaios de tração das chapas, donde pode se caracterizar as propriedades mecânicas, tais como Resistência a Tração, Limite de Escoamento e Deformação, de forma mais precisa e adequada, evitando o simples uso de tabelas. Este teste foi realizado nos conformes da ASTM E8 / E8M-16A (2016), o desenho do corpo de prova é mostrado na Figura 3.15.

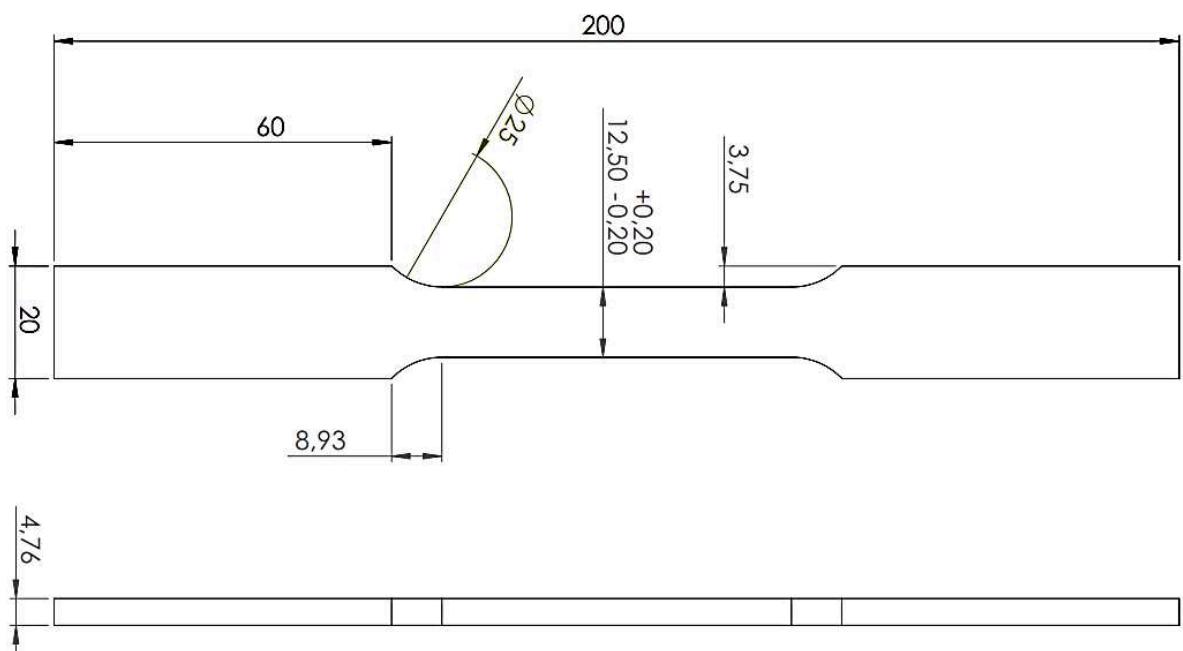


Figura 3.15 - Corpo de prova do metal de base, quanto a tração, fabricado conforme ASTM E8 / E8M-16A (2016)

CAPÍTULO IV

TESTES PRELIMINARES

Com intuito de planejar os ensaios e obter condições melhores para continuação dos mesmos, foram realizados alguns testes preliminares. Neste capítulo será abordado separadamente estes testes na sequência cronológica dos fatos. Destaca-se que não serão abordados os testes para levantamento de parâmetros de soldagem.

4.1. Caracterização do metal base

Como não foi recebido o certificado do material a ser utilizado como chapa de teste, foi então necessária a utilização de técnicas de ensaio para identificação do material adquirido. As técnicas utilizadas para tal foram:

- Composição química: através do teste de composição química em duas amostras de barras chatas diferentes, foram identificados os principais elementos de liga, mostrados na Tabela 4.1, o relatório completo da composição química se encontra no Anexo F
- Ensaio de tração: este teste visa caracterizar algumas propriedades mecânicas, de forma a complementar a avaliação de composição. Foram realizados ensaios de tração em 4 (quatro) corpos de prova de barras chatas diferentes. Os resultados são mostrados na Figura 4.1 e Tabela 4.2.
- Microdureza: foi realizado como teste complementar e auxiliar na correta identificação do metal base. Realizou-se medição de Microdureza Vickers com carga de 0,5 N em 3 amostras, foi obtido o valor de $197,2 \pm 7,1$ HV.

Tabela 4.1 - Composição química do metal de base

Elemento químico	C	Mn	Si	P	S
------------------	---	----	----	---	---

Composição %p	$0,4324 \pm 0,0013$	$0,6325 \pm 0,0086$	$0,151 \pm 0,001$	$0,015 \pm 0,0010$	$0,053 \pm 0,0001$
---------------	---------------------	---------------------	-------------------	--------------------	--------------------

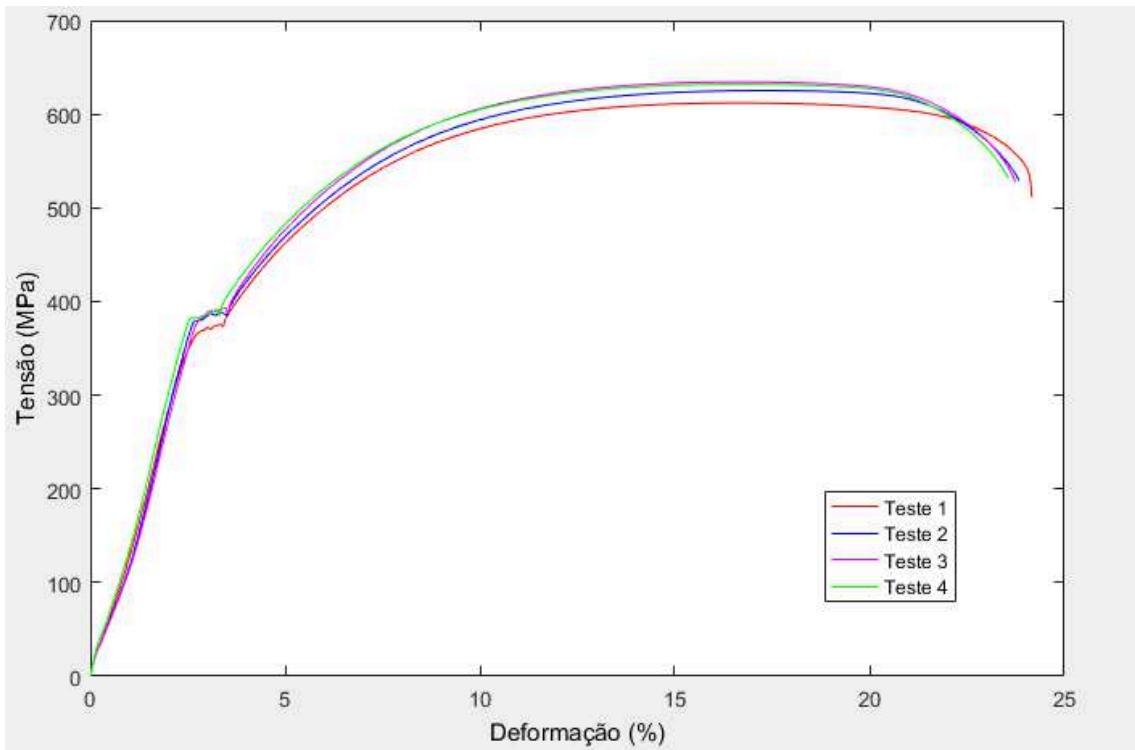


Figura 4.1 - Teste de tração realizado para caracterização do metal base

Tabela 4.2 - Resultados do ensaio de tração realizado no metal base

σ_y [MPa]	σ_u [MPa]	ε [%]
384 ± 8	625 ± 9	$19,8 \pm 0,4$

Diante de tais resultados, foi possível concluir que o material estava conforme especificação de compra, se tratando de Aço ABNT (SAE) 1045 laminando a quente, conforme especificações SAE J1397 (1992) e SAE J403 (2009).

4.2. Levantamento do perfil de tensão

Com este teste, objetivou-se localizar uma região na qual houvesse maior tensão residual. Para isso, neste teste foi realizado um número maior de pontos de medição, na face e raiz, de forma a obter um perfil de tensões semelhante aos característicos em processos de soldagem, Figura 2.19 (com foco nas tensões transversais). Foi então medido tensões

residuais transversais nos 3 (três) eixos (espaços entre parafusos) intermediários previstos para ensaios mecânicos, conforme Figura 3.12 e Figura 3.13.

Este teste foi realizado na condição 45°-Ø1,00-Tamb-CO2. Neste cordão de solda foi utilizado um parâmetro de soldagem previamente utilizado, com uma deposição menor, que objetivava menores reforços de face e raiz, já que os mesmos, em excesso, são prejudiciais, por funcionarem como concentradores de tensão. Estes parâmetros são mostrados na Tabela 4.3. Não se conseguiu um bom cordão de solda com estes parâmetros, pois houve deposição insuficiente. Com isso tornou-se necessário à readequação do mesmo. Mas para fins de levantamento do perfil, haja vista o elevado tempo de preparação e medição, utilizou-se, mesmo assim, deste cordão de solda.

Os valores de tensões residuais transversais medidos são apresentados nas Tabela 4.4 e Tabela 4.5 e na Figura 4.2. É apresentado a média das medidas nos eixos 1 e 3, já que no eixo 2 houve falta de fusão e assim a medição de tensão residual após a soldagem não apresentou valores condizentes. Os valores médios, do desvio padrão e do erro, das medições foram de 20,3099 MPa e 30,0300 MPa, respectivamente.

Tabela 4.3 - Parâmetros de soldagem utilizados no teste preliminar

Condição	Uref [V]	Va [m/min]	Vs [cm/min]	DBCP [mm]	Gás [L/min]
45°-Ø1,00-Tamb-CO2	21,5	4,4	25,2	20	CO2 [15 a 17 L/min]

Tabela 4.4 - Tabela com valores de tensão residual medidos na face durante teste preliminar

Tensão Residual medida na Face			
Distância do centro do cordão [mm]	Antes de soldar [MPa]	Depois de soldar / Travado [MPa]	Depois de soldar / Destravado [MPa]
7,5	-123,9418	-5,7954	85,6627
12,5	-131,6649	68,0185	131,5115
17,5	-140,4967	-57,4413	61,4942
27,5	-195,4673	-212,4086	-161,7445
37,5	-196,4644	-229,2032	-135,9099

Tabela 4.5 - Tabela com valores de tensão residual medidos na raiz durante teste preliminar

Tensão Residual medida na Raiz			
Distância do centro do cordão [mm]	Antes de soldar [MPa]	Depois de soldar / Travado [MPa]	Depois de soldar / Destravado [MPa]
5,5	-142,5757	179,6786	37,3097
10,5	-91,7433	219,0969	139,8371

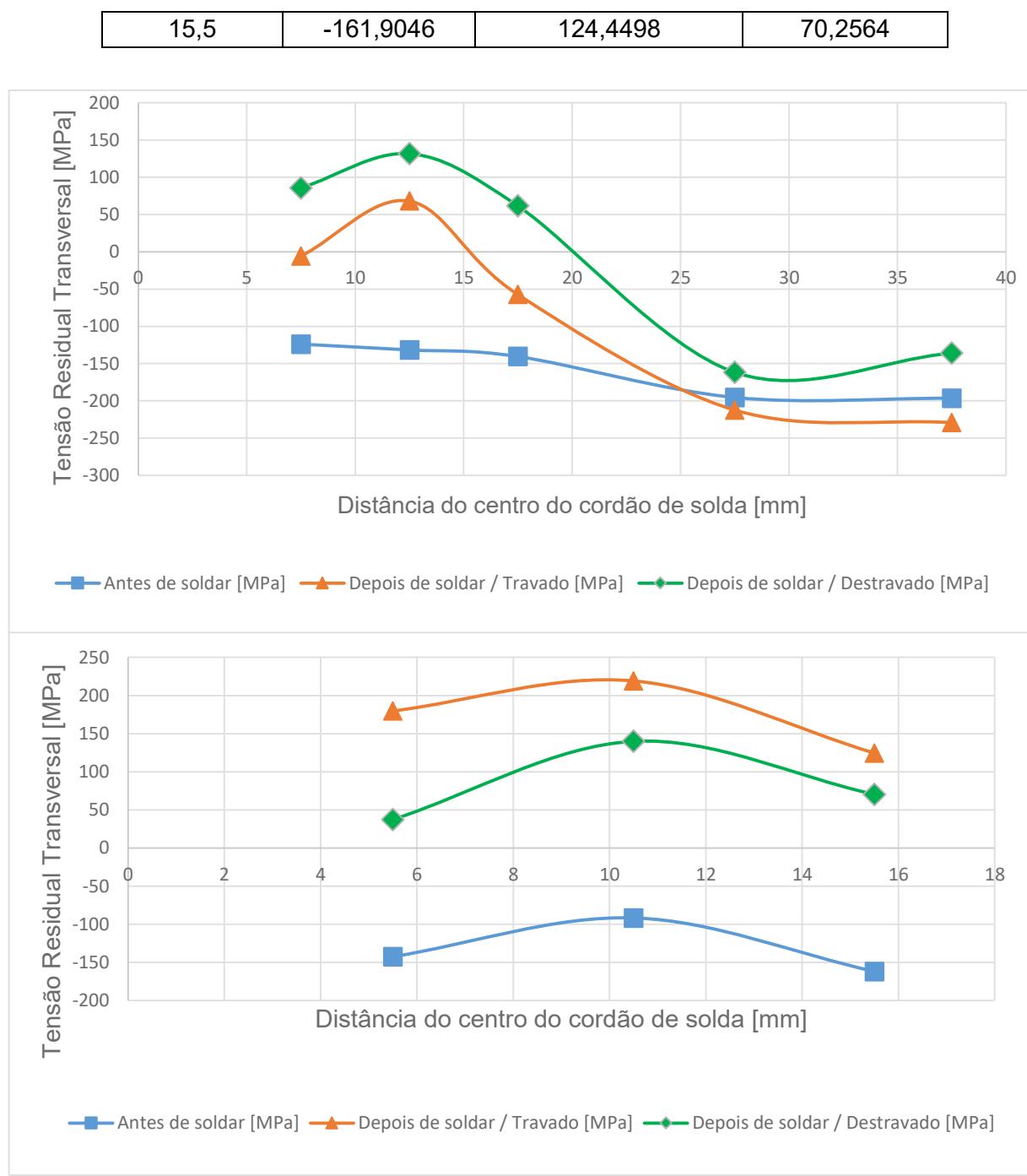


Figura 4.2 - Gráficos mostrando as tensões residuais medidas durante teste preliminar: superior mostra tensão residual medida na face e inferior mostra tensão residual medido na raiz

Algumas conclusões prévias puderam ser retiradas deste teste preliminar:

- As tensões residuais transversais na raiz tendem a apresentarem maiores valores em módulo. Acredita-se que o possível motivo pode estar no fato de a solidificação do metal de solda ocorrer primeiro na raiz;

- Falta de fusão lateral não gera tensão residual, uma vez que há uma descontinuidade das linhas de força. Tal falta de fusão ocorreu devido a uma instabilidade causada ao arco devido ao polimento eletrolítico ter chegado até o chanfro, associado a um pequeno desalinhamento da tocha de soldagem em relação chanfro.

Foram readequados os parâmetros de soldagem, após este teste preliminar, aumentando a deposição, visando corrigir a deposição insuficiente. Após nova soldagem, observou-se, claramente, a deformação do suporte. O sistema de travamento, na sua concepção inicial, foi composto somente pelo suporte mostrado na Figura 3.6, parafusos, porcas, arruelas e chapas de teste, mencionados em 3.3. Esta montagem é mostrada na Figura 4.3. Diante disto, fez-se necessário a readequação do sistema de travamento, tendo como arranjo final, aquele mostrado na Figura 3.9.

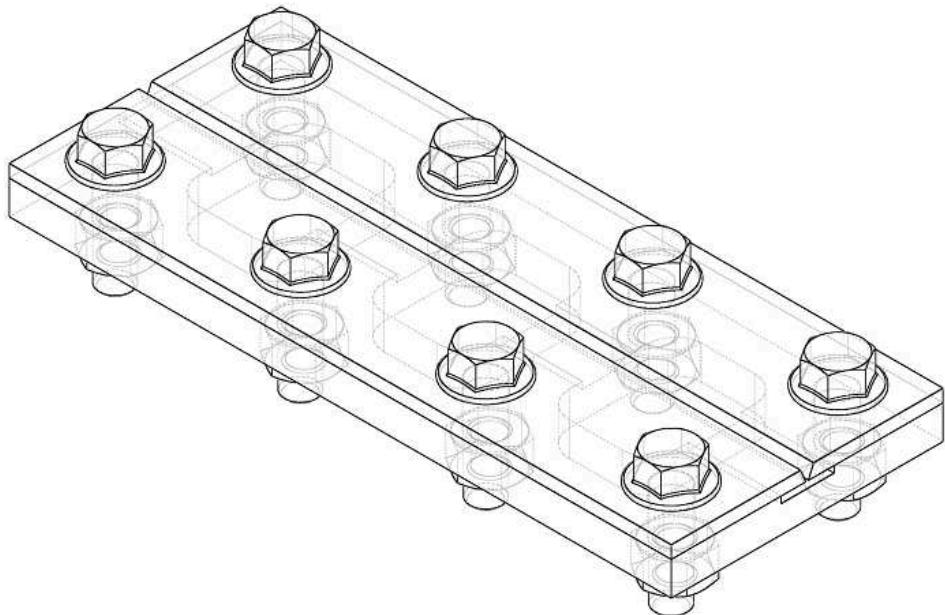


Figura 4.3 - Desenho do sistema de travamento utilizando no teste preliminar

4.3. Avaria no equipamento de medição de tensões residuais

Na etapa de levantamento de perfil de tensões residuais, foram medidos uma quantidade alta de pontos, aproximadamente 74 pontos, isso sem levar em consideração pontos medidos mais de uma vez por questões de buscar parâmetros de medição com menores desvios e erros apresentados.

Ao final desta etapa foi percebida uma medição com resultado aleatório, o que levou à realização de calibração do equipamento, que consiste em 3 etapas principais:

- Eficiência do espectro, aproximadamente 15 min de radiação sem uso de qualquer filtro;
- Calibração do detector, utilizando o filtro de 17 picos, por um tempo de aproximadamente 10 min;
- Calibração da distância Z, com duração de aproximadamente 50 min, com uso do filtro de Vanádio.

Durante a calibração, na etapa de verificação da eficiência do espectro, notou-se uma característica, já apresentada pelo equipamento em outras ocasiões, de dano no detector. Salientando informar, que o detector do equipamento já houvera de ser reparado por outras 2 vezes.

O dano aparenta ser uma perda de sensibilidade do detector, percebido por uma depressão na linha de contagens de raios-X, justamente na faixa central de medição, próximo ao ângulo a ser medido, como mostra a Figura 4.4. Todas as medições subsequentes foram realizadas com esta limitação do equipamento.

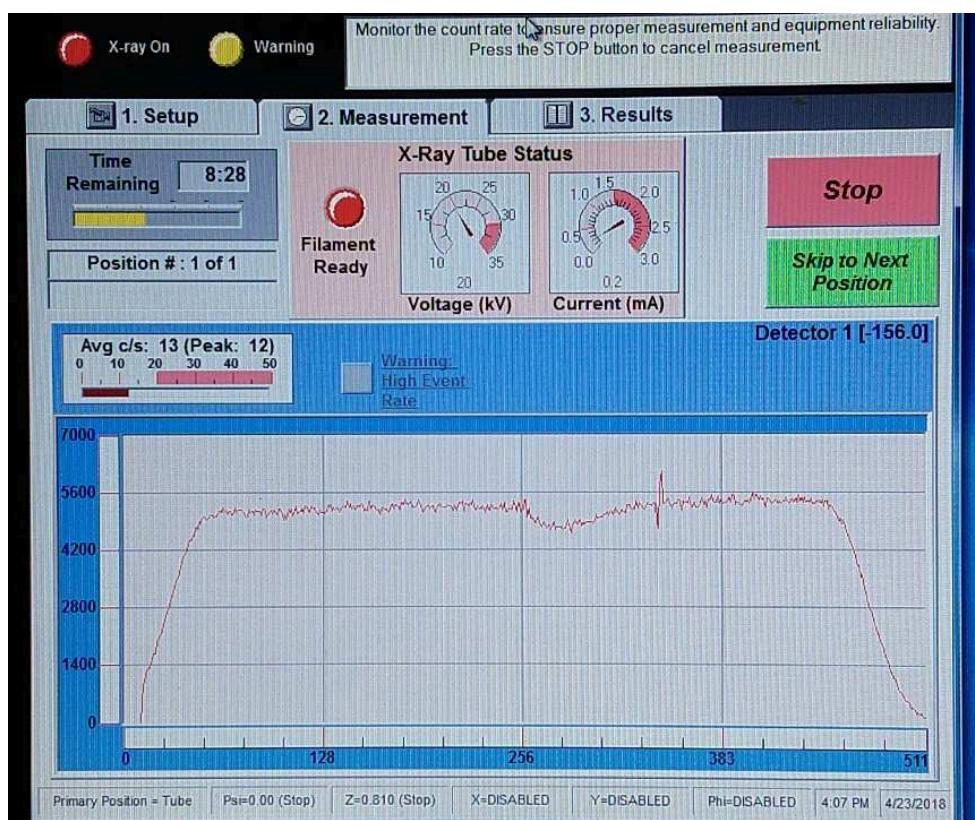


Figura 4.4 - Ilustração do dano no detector do difratômetro

4.4. Ensaio de tração

Após soldagem e medição de tensões residuais preliminares, conforme item anterior, foi realizado teste de tração nas regiões previamente definidas para realização dos ensaios mecânicos com o objetivo de averiguar o local de rompimento do ensaio, buscando observar alguma tendência deste com o ponto de maior tensão residual medido.

A Figura 4.5 mostra o resultado da média de 2 (dois) corpos de prova à tração. Em relação ao exposto no Item 3.1 pode-se observar um leve aumento no limite de escoamento ($\sim 447,6\text{ MPa}$) e limite de resistência a tração ($\sim 660\text{ MPa}$), muito provavelmente devido a um possível tratamento térmico, visto alta temperabilidade do material utilizado. O rompimento se deu próximo ao ponto de maior tensão residual, no entanto não se pode afirmar categoricamente que seja devido, única e exclusivamente, à presença desta, visto que ao desconsiderar a área da Zona Fundida (ZF) e Zona Termicamente Afetada (ZAC) da área útil do teste (Figura 3.14), fica restante uma pequena área, que pode, dessa forma coincidir com a área, detectada, de maior tensão residual.

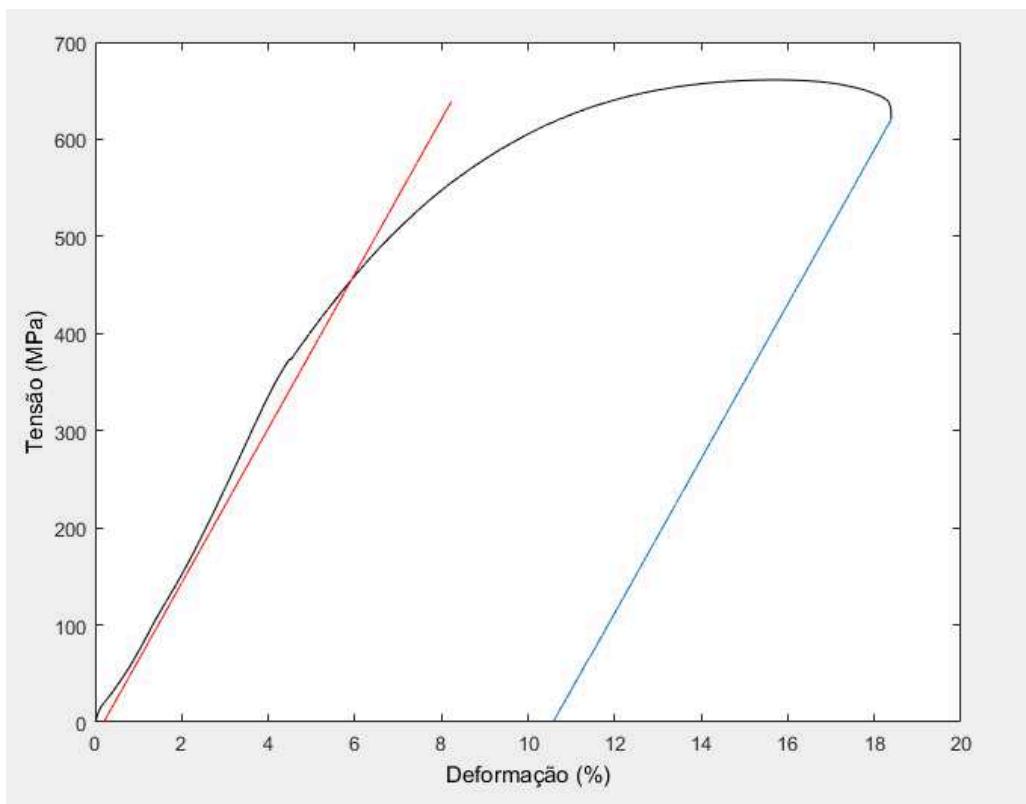


Figura 4.5 - Resultado do teste de tração no cordão de solda preliminar, onde as linhas auxiliares mostram a deformação a 0,02% (para encontrar o Limite de Escoamento) e deformação total

Para verificar o ponto de rompimento, marcou-se o corpo de prova com linhas igualmente espaçadas em 5 mm de forma que ao terminar o teste se tornasse possível a posição aproximada do rompimento. A Figura 4.6 mostra essas linhas após teste de tração, verificando a posição de rompimento, em relação ao centro do cordão de solda.

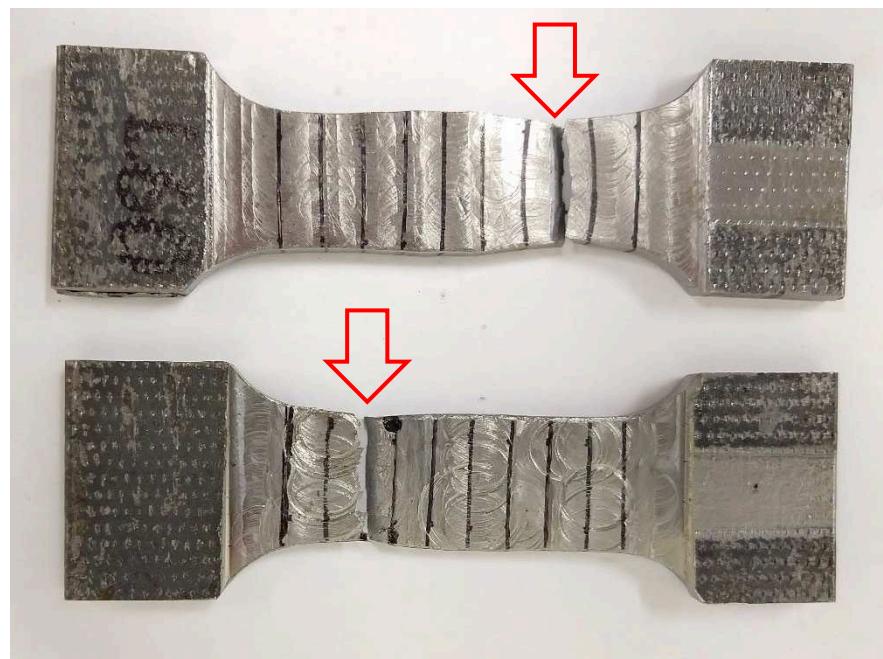


Figura 4.6 - Imagem dos corpos de prova à tração para o teste preliminar, com destaque para a região da fratura

CAPÍTULO V

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo é dedicado à discussão dos resultados obtidos separados em tópicos conforme assuntos.

5.1. Remoção eletrolítica

Após procedimento relatado no Item 3.5, objetivou-se remoção eletrolítica de 0,10 mm, com intuito de melhorar a qualidade superficial, visto não haver outros processos afetando a superfície, que não os da siderúrgica, no caso, laminação.

Por se tratar de um processo com oscilação manual e também pelo fato de que o consumo de solução foi relativamente pequeno por junta soldada, o que fez com que a solução fosse utilizada por um período possivelmente longo (~70 dias), levando a crer que a solução possa ter se tornado mais “fraca” nos últimos polimentos realizados. Diante disso, houve uma variação substancialmente entre as remoções, obtendo assim uma remoção média de $0,10 \pm 0,05$ mm.

5.2. Parâmetros de soldagem

Mesmo que a junta soldada não se enquadrasse com requisito de ensaio a tenacidade, optou-se por manter a energia de soldagem constante em todos as condições, também se optou por manter constante a corrente de soldagem. Isso foi adotado de forma a obter-se

menor influência destes parâmetros nos resultados, visando direcionar o estudo para as condições ensaiadas.

As premissas de testes foram mostradas no Item 3.1 e os parâmetros ajustados são conforme Item 3.4. Após a soldagem de duas (2) chapas em cada condição, foram obtidos os resultados mostrados na Tabela 5.1. A Energia de Soldagem foi calculada conforme Tabela 2.2, através do cálculo da potência instantânea média dividindo pela velocidade de soldagem.

Tabela 5.1 - Parâmetros de soldagem monitorados durante a soldagem

Condição	Tensão [V]	Corrente [A]	Energia de Soldagem [J/mm]
45°-Ø1,00-T150-C25	20,7 ± 0,10	112,7 ± 0,6	553,7 ± 4,9
45°-Ø1,00-Tamb-C25	20,6 ± 0,10	114,1 ± 1,2	550,8 ± 4,7
45°-Ø1,00-Tamb-CO2	21,5 ± 0,05	102,6 ± 0,2	509,8 ± 4,9
45°-Ø1,20-Tamb-C25	17,9 ± 0,05	109,5 ± 0,3	553,3 ± 1,2
60°-Ø1,00-Tamb-C25	20,0 ± 0,00	118,0 ± 0,2	551,1 ± 4,1

Algumas observações podem ser realizadas da Tabela 5.1. A energia imposta para a condição 45°-Ø1,00-Tamb-CO2 diferenciou-se, em relação aos demais testes, devido a maior capacidade térmica do gás utilizado (CO2), de forma que ao utilizar este gás foi possível obter uma penetração aceitável com um nível de corrente menor. No caso de alterar a corrente aos mesmos níveis dos demais testes, provocaria um reajuste em outros parâmetros que influenciaria na energia de soldagem, tornando mais distante ainda dos demais ou não conseguindo qualidade satisfatória. Em relação à condição 45°-Ø1,20-Tamb-C25, o parâmetro a se distanciar dos demais foi a tensão utilizada, optou-se pela tensão menor, pois as premissas de testes adotadas foram corrente, energia de soldagem e deposição por comprimento de solda, e, ao elevar os níveis de tensão, uma das outras variáveis iria se afastar de forma mais pronunciada.

A Tabela 5.2 mostra os valores médios, desvios padrão e erro percentual numa análise geral, levando em consideração todos os ensaios. Desta forma é possível observar que os parâmetros selecionados e os obtidos atingiram o objetivo de mantê-los constantes, dentro de uma faixa aceitável, visto que o maior erro percentual foi de 6,1% para a variável tensão.

Tabela 5.2 - Parâmetros médios de soldagem para todas as condições agrupadas

	Tensão [V]	Corrente [A]	Energia Imposta [J/mm]
Média	20,1 ± 1,2	111,4 ± 5,2	543,8 ± 17
Erro [%]	6,1%	4,6%	3,1%

Os dados foram adquiridos em 5 kS/s e posteriormente processados por meio do programa Curto Versão 5 do Grupo Laprosolda, na plataforma Matlab®. As Figura 5.1 e Figura 5.2 mostram a tela do software com os resultados calculados bem como oscilogramas de tensão e corrente, respectivamente, para a solda 45°-Ø1,20-Tamb-C25-1.

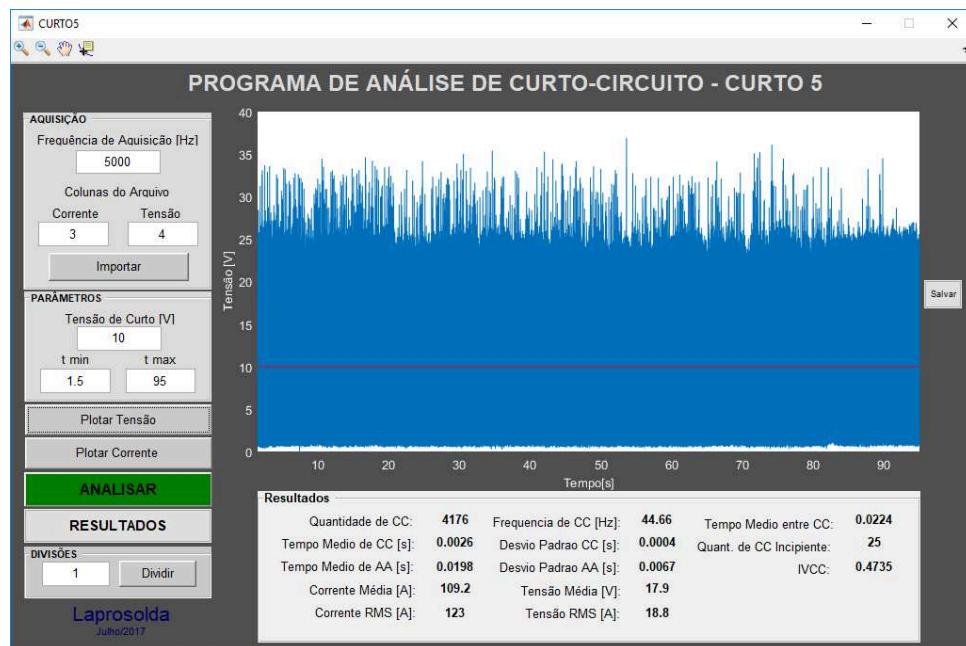


Figura 5.1 - Tela do software Curto, versão 5, com resultados e oscilograma de tensão

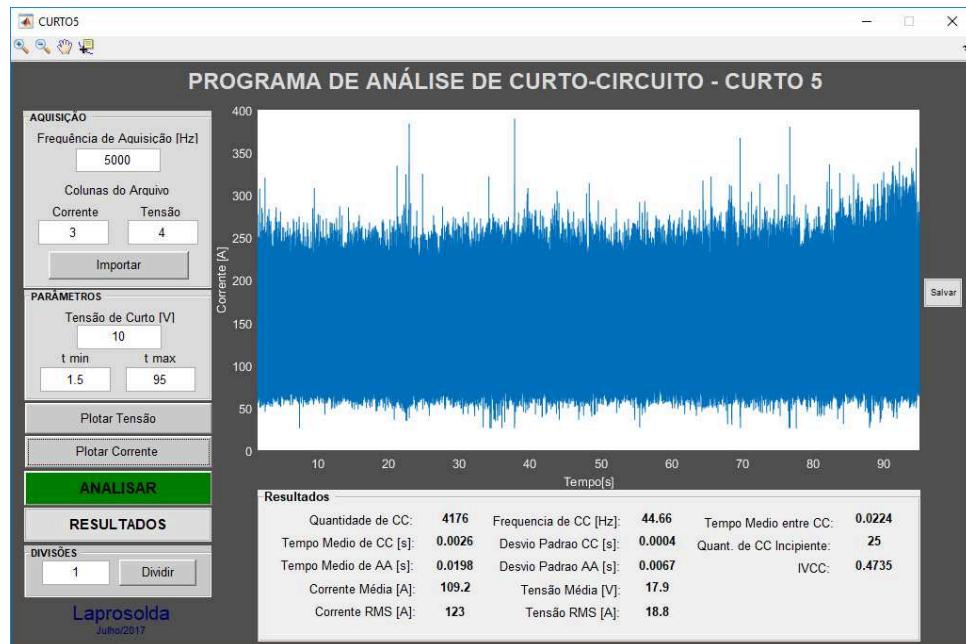


Figura 5.2 - Tela do software Curto, versão 5, com resultados e oscilograma de corrente

5.3. Ensaios Mecânicos

Foi realizado 1 (um) ensaio de dobramento de face, 1 (um) ensaio de dobramento de raiz e 1 (um) ensaio de tração por cada junta soldada, conforme Item 3.6.

Durante os ensaios de dobramento, além da avaliação qualitativa (passa / não passa), foi possível realizar uma avaliação quantitativa, através da obtenção da tensão máxima de dobramento e tensão de ruptura.

Na Tabela 5.3 são mostrados os resultados qualitativos e quantitativos para os ensaios de dobramentos de face. Qualitativamente, pode se observar que praticamente todos os testes seriam aprovados no dobramento de face, com a exclusão de dois ensaios reprovados, indo mais adiante, somente uma condição houve ruptura, a outra condição foi reprovada por critério de aceitação (descontinuidades maiores que 3 mm). Quantitativamente observa-se que a única condição na qual houve ruptura, a mesma ocorreu com tensão máxima cerca de 16% menor que a média dos ensaios não rompidos.

Na Tabela 5.4 são mostrados os resultados qualitativos e quantitativos para os ensaios de dobramento de raiz. Qualitativamente observa-se quase que total reprovação dos ensaios. Com aprovação de um único ensaio. Quantitativamente, observa-se que houve uma redução da tensão máxima de cerca de 25% se comparado ao dobramento de face, mostrando que além de maiores quantidades de rompimentos, houve, também, perda da resistência mecânica. Nota-se que a relação entre as tensões de ruptura e tensões máximas, encontram-se, relativamente próximas, distanciados em cerca de 7%, levando a crer que houve ruptura frágil por perda de ductilidade, fato razoavelmente aceitável e esperado, devido ao grau de temperabilidade do aço soldado. Tal afirmação, também, pode ser confirmada através dos valores de deformação obtidos nos ensaios de tração, mostrados posteriormente.

Uma possível justificativa para a maior ocorrência de falhas nos dobramentos de raiz, pode ter ocorrido, devido, também, a maior taxa de resfriamento:

- a raiz, neste caso, somente recebe calor provido da poça de fusão, alcançando menores temperaturas absolutas;
- a superfície inferior, por estar mais próximo do sistema de travamento, perde calor mais facilmente para este;
- é na raiz que se inicia a solidificação, o que pode ter ocasionado, devido à restrição imposta pelo sistema de travamento, aliado a maiores taxas de resfriamento, microtrincas, justificando a ruptura frágil.

Outro motivo para tal, pode estar relacionado ao diâmetro do cutelo utilizado, conforme Item 3.6, adotou-se um diâmetro relativamente pequeno, dentro da faixa utilizada, já que o QW-466.1 estabelece um diâmetro mínimo através do cálculo com a deformação prevista pela norma de fabricação até um diâmetro máximo para a menor deformação, 3% na faixa enquadrada pelo material utilizado. No entanto, como está intrínseco ao processo de soldagem, transformações metalúrgicas e alterações das propriedades mecânicas, optou-se por utilizar a mesma deformação prevista pelo metal de base, a fim de não mascarar a perda expressiva de ductilidade, que pode ser um fator preponderante à utilização de procedimentos de tratamento térmico pós soldagem.

Tabela 5.3 - Resultados para ensaios mecânicos de dobramento de face

Condição	Local	Tensão Máxima [MPa]	Tensão de Ruptura [MPa]	Deslocamento Ruptura [mm]	A [Aprovado] R [Reprovado]
45°-Ø1,00-Tamb-CO2-1	Face	1809	NA	NA	A
45°-Ø1,00-Tamb-CO2-6	Face	1945	NA	NA	R*
45°-Ø1,20-Tamb-C25-2	Face	1510	1465	16,3	R
45°-Ø1,20-Tamb-C25-4	Face	1748	NA	NA	A
45°-Ø1,00-Tamb-C25-3	Face	1882	NA	NA	A
45°-Ø1,00-Tamb-C25-3	Face	1828	NA	NA	A
45°-Ø1,00-T150-C25-1	Face	1761	NA	NA	A
45°-Ø1,00-T150-C25-2	Face	1733	NA	NA	A
60°-Ø1,00-Tamb-C25-1	Face	1744	NA	NA	A
60°-Ø1,00-Tamb-C25-2	Face	1804	NA	NA	A

* Reprovação se deu por critérios de aceitação, conforme Item 2.5.1

Tabela 5.4 - Resultados para ensaios mecânicos de dobramento de raiz

Condição	Local	Tensão Máxima [MPa]	Tensão de Ruptura [MPa]	Deslocamento Ruptura [mm]	A [Aprovado] R [Reprovado]
45°-Ø1,00-Tamb-CO2-1	Raiz	1653	707	23,7	R
45°-Ø1,00-Tamb-CO2-6	Raiz	1846	1712	26,5	R
45°-Ø1,20-Tamb-C25-2	Raiz	613	613	1,2	R
45°-Ø1,20-Tamb-C25-4	Raiz	1056	1024	5,4	R
45°-Ø1,00-Tamb-C25-3	Raiz	1463	1407	15,6	R
45°-Ø1,00-Tamb-C25-3	Raiz	1130	956	8,0	R
45°-Ø1,00-T150-C25-1	Raiz	1474	1396	10,8	R
45°-Ø1,00-T150-C25-2	Raiz	1381	1125	11,8	R
60°-Ø1,00-Tamb-C25-1	Raiz	1606	1577	15,5	R

60°-Ø1,00-Tamb-C25-2	Raiz	1730	NA	NA	A
----------------------	------	------	----	----	---

Na Tabela 5.5 são mostrados os resultados para os ensaios mecânicos de tração. Nota-se claramente que a condição 45°-Ø1,20-Tamb-C25 obteve reprovação em ambos ensaios realizados, o que leva a crer que a condição específica não obteve resultados aceitáveis para este ensaio. A condição 45°-Ø1,00-Tamb-C25 resultou em uma condição aprovada e outra não, podendo-se destacar que a condição obteve resultado relativamente aceitável e que a reprovação tenha sido ocasional, pela presença de uma descontinuidade / defeito, possivelmente detectada em um END, não realizado neste estudo. Em relação aos ensaios aprovados, percebe-se que os valores dos limites de escoamento e limite de resistência a tração (tensão máxima) não sofreram grandes influências das condições de soldagem e tampouco das tensões residuais, como mostra a Tabela 5.6, onde são mostradas as propriedades mecânicas com desvio e erro percentual.

Percebe-se um leve aumento da resistência mecânica (~12,5% para o limite de escoamento e 6,9% para a tensão máxima), em detrimento de uma perda substancial da ductilidade (~42,4%), comparando se as propriedades do metal base (Tabela 4.2) e das soldas aprovadas (Tabela 5.6). Atribui-se o fato de tais alterações, possivelmente, a uma alta taxa de resfriamento, pois ao comparar o peso das chapas de teste com o sistema de travamento (~3,9 vezes maior), percebe-se que o sistema de travamento poderia ser considerado com uma fonte de remoção de calor, o que do ponto de vista prático, é, razoavelmente, aceitável, já que as estruturas soldadas, usualmente, possuem elevadas dimensões.

Tabela 5.5 - Resultados para ensaios mecânicos de tração

Condição	σ_y [MPa]	σ_u [MPa]	Local de Rompimento	ε [%]	A [Aprovado] R [Reprovado]
45°-Ø1,00-Tamb-CO2-1	442,1	661,0	MB	11,4	A
45°-Ø1,00-Tamb-CO2-6	421,5	661,3	MS	10,6	A
45°-Ø1,20-Tamb-C25-2	120,2	286,6	MS	2,2	R
45°-Ø1,20-Tamb-C25-4	123,5	419,2	MS	2,9	R
45°-Ø1,00-Tamb-C25-2	120,6	361,5	MS	2,1	R
45°-Ø1,00-Tamb-C25-3	444,7	682,6	MB	11,8	A
45°-Ø1,00-T150-C25-1	416,9	654,2	MB	11,7	A
45°-Ø1,00-T150-C25-2	442,1	677,9	MB	11,0	A
60°-Ø1,00-Tamb-C25-1	424,6	663,1	MB	11,5	A
60°-Ø1,00-Tamb-C25-2	429,9	673,8	MB	11,7	A

Tabela 5.6 - Valores médios, desvio e erro percentual dos ensaios mecânicos aprovados

	Média	Desvio	Erro [%]
σ_y [MPa]	431,7	10,4	2,4%
σ_u [MPa]	667,7	9,7	1,5%
ϵ [%]	11,4	0,4	3,5%

Uma possível justificativa para a maior tendência de ruptura nos ensaios de dobramento de raiz e tração com ruptura no metal de solda (já que a ruptura iniciou-se na raiz se propagando até o rompimento final), pode estar associado a frequência de curto-circuito, mostradas na Tabela 5.7, de forma que quanto maior esta, menos favorável seria a fusão na área próxima da abertura de raiz, visto que dessa forma a fonte de calor predominante se dá pelo aquecimento do arame-eletrodo livre, devido ao efeito Joule. Essa linha de raciocínio é corroborada por Modenesi (2008), que destaca que como, durante parte do processo, o arco está apagado, o calor transferido para a peça e, portanto, a capacidade de fusão da mesma é reduzida durante o curto circuito, o que pode levar à formação de defeitos de fusão (falta de fusão) na soldagem de peças de maior espessura.

Adicionalmente, algumas observações podem ser realizadas, evitando a comparação, pura e simplesmente, da frequência de curto-circuito:

- Para a condição 45°-Ø1,00-Tamb-CO2 obteve-se frequências aproximadamente iguais às da condição 45°-Ø1,20-Tamb-C25, mas houve resultados melhores, o que pode ser justificado devido a maior condutividade térmica quando utilizado este gás, favorecendo a penetração e consequentemente a fusão da raiz, resultando em maiores tensões máximas no dobramento a raiz;
- Para a condição 60°-Ø1,00-Tamb-C25 que obteve frequências intermediárias, na comparação de todas as condições, no entanto foi a que obteve melhores resultados qualitativos no agregado de todos os ensaios. Isso pode ter ocorrido devido ao maior ângulo de chanfro, o que torna o acesso do arco à raiz mais facilitada, sendo a única condição a obter aprovação ao dobramento de raiz; e
- Para as condições 45°-Ø1,00-T150-C25 e 45°-Ø1,00-Tamb-C25 obtiveram frequências similares, também resultou em tensões máximas ao dobramento aproximadas.

Tabela 5.7 - Frequências de curto-circuito para as condições realizadas

Condição	Frequência de CC [Hz]
45°-Ø1,00-T150-C25	26,4 ± 1,5
45°-Ø1,00-Tamb-C25	29,8 ± 0,7

45°-Ø1,00-Tamb-CO2	49,6 ± 2,3
45°-Ø1,20-Tamb-C25	48,8 ± 4,1
60°-Ø1,00-Tamb-C25	40,0 ± 1,9

A Figura 5.3 mostra a comparação entre as rupturas ocorridas no metal de solda nas condições 45°-Ø1,00-Tamb-CO2 e 45°-Ø1,20-Tamb-C25. Onde é possível observar a diferença de uma ruptura puramente frágil (45°-Ø1,00-Tamb-CO2), porém sem perda de resistência mecânica, por isso aprovado pelos critérios de aceitação e uma ruptura parcialmente frágil (45°-Ø1,20-Tamb-C25), onde é possível observar que houve um início de ruptura, ocorrido no lado da raiz da solda, com ruptura súbita posterior, se assemelhando a uma típica ruptura por fadiga, no entanto este ensaio a ruptura se deu a uma carga muito inferior ao do metal base, levando à rejeição da condição por quesitos de resistência mecânica.

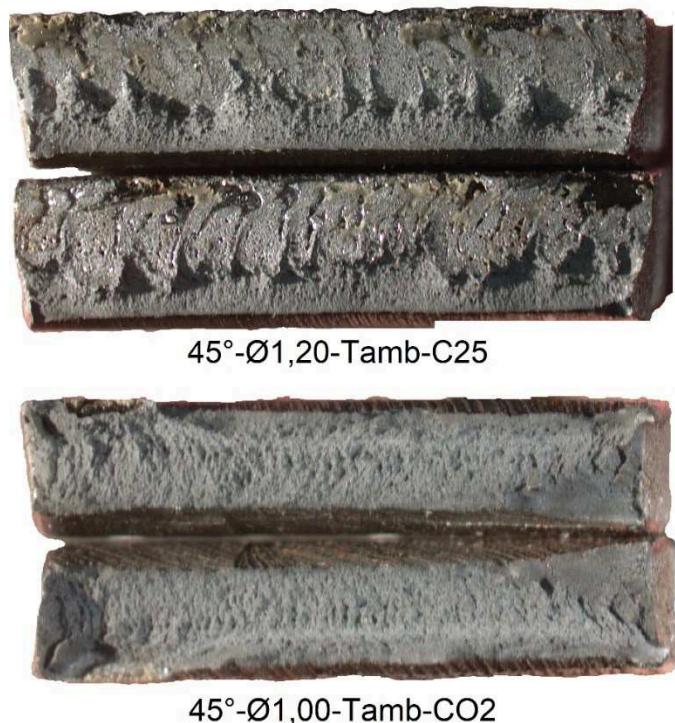


Figura 5.3 - Imagens com diferentes tipos de ruptura no Metal de Solda para diferentes condições de soldagem

5.4. Macrografias

Objetivando a verificação da existência de defeitos sistemáticos na solda, provindo dos parâmetros utilizados, e não de descontinuidades/defeitos pontuais, realizou-se o ensaio macrográfico em duas amostras de cada condição soldada, retiradas em regiões adjacentes às dos ensaios de tração. As imagens obtidas são mostradas na Figura 5.4. Pode se notar que em todas as condições não foi possível observar qualquer defeito aparente, o que leva a crer que os parâmetros de soldagem foram adequados para as soldas realizadas.

Adicionalmente, foi possível retirar alguns dados quantitativos das imagens obtidas. Através de medições dimensionais dos cordões de solda, onde mediu-se a largura do cordão de solda, área da ZF e ZAC. Os valores são mostrados na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 - Dimensionais dos cordões de solda

Condição	Largura [mm]	ZF [mm ²]	ZAC [mm ²]
45°-Ø1,00-T150-C25	7,804 ± 0,071	25,794 ± 0,507	35,129 ± 0,751
45°-Ø1,00-Tamb-C25	6,914 ± 0,060	23,795 ± 2,073	28,918 ± 0,078
45°-Ø1,00-Tamb-CO2	7,356 ± 0,320	22,226 ± 0,942	29,086 ± 2,123
45°-Ø1,20-Tamb-C25	7,071 ± 0,183	20,863 ± 0,720	28,076 ± 0,240
60°-Ø1,00-Tamb-C25	7,294 ± 0,008	22,010 ± 0,172	29,596 ± 0,762

As medições da área da ZF mostram que a premissa de manter a taxa de deposição por comprimento de solda constante é minimamente aceitável, já que se obteve um erro percentual de aproximadamente 7,4%. É possível inferir, através das medições das áreas da ZAC, informações tais como eficiência térmica do processo, dessa forma observa-se que a condição com maior tendência de propagação de calor é 45°-Ø1,00-T150-C25, seguido das condições 60°-Ø1,00-Tamb-C25, 45°-Ø1,00-Tamb-C25 e 45°-Ø1,00-Tamb-CO2, em ordem descendente, numa faixa mais próxima e por último a condição com menor propagação de calor através da chapa soldada, 45°-Ø1,20-Tamb-C25.

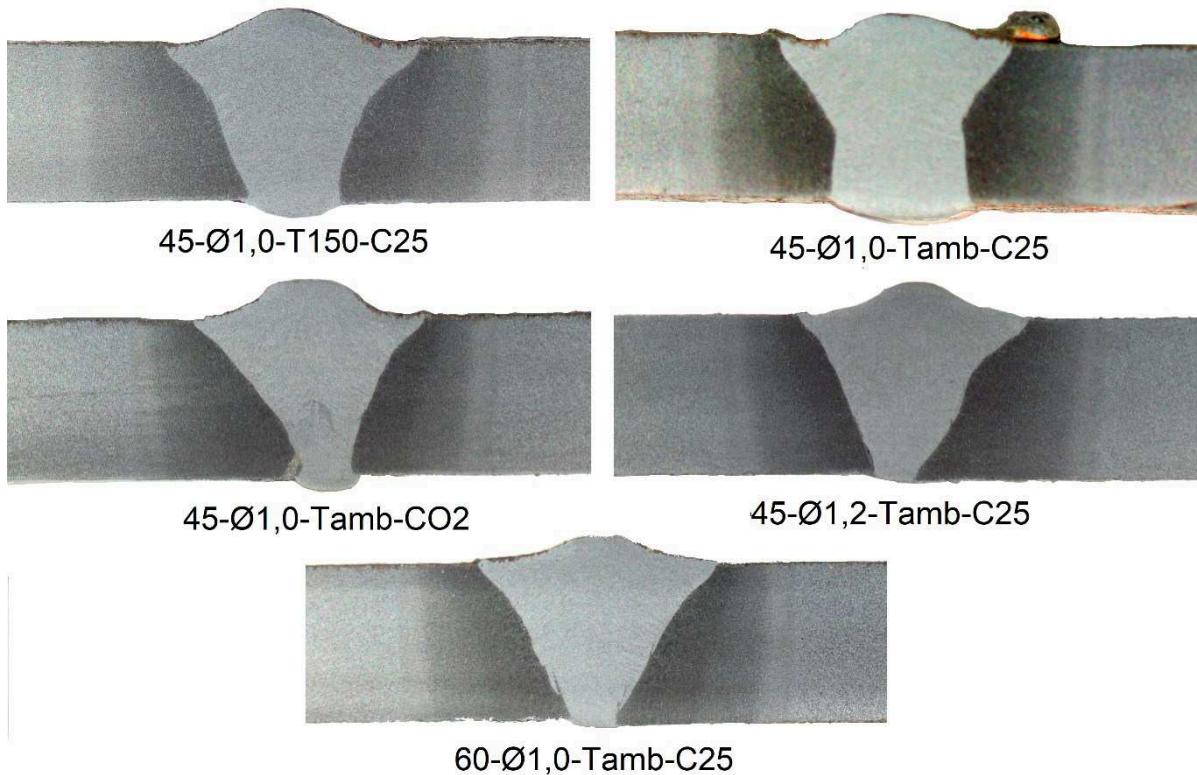


Figura 5.4 - Macrografias das condições de soldadas (Para escala, utilizar espessura da chapa de 3/16 in ou 4,7625 mm)

5.5. Tensões Residuais

Conforme Item 3.5, foram realizadas 4 (quatro) medições para cada ponto, considerando a simetria em relação ao centro do cordão de solda. Como houve certa dispersão dos resultados obtidos, optou-se por aplicar tratamento estatístico, aplicando a distribuição *t-student* com 90% de significância, aplicado a cada ponto isoladamente, ou seja, aplicou-se a metodologia *t-student* num total de 4 (quatro) medições para cada ponto, num total de 40 (quarenta) pontos. Os resultados, após tratamento são mostrados na Tabela 5.9. Para consulta dos dados brutos (sem tratamento), ver Anexo G.

Tabela 5.9 - Valores de tensões residuais medidas

Tensão Residual medida na Face				
Condição	Distância do centro [mm]	Antes de Soldar [MPa]	Depois de soldar / Travado [MPa]	Depois de Soldar /

				Destravado [MPa]
45-Ø1,0-T150-C25	10	-30,9 ± 12,4	31,2 ± 5,1	47,3 ± 11,4
	13	-57,3 ± 4,3	40,8 ± 15,8	72,4 ± 11,2
45-Ø1,0-Tamb-C25	10	-76,2 ± 4,0	47,8 ± 11,6	51,4 ± 2,0
	13	-65,2 ± 24,6	41,0 ± 0,8	49,2 ± 2,0
45-Ø1,0-Tamb-CO2	10	-93,9 ± 7,7	54,7 ± 21,4	78,9 ± 9,9
	13	-92,7 ± 26,1	41,6 ± 5,9	59,8 ± 9,0
45-Ø1,2-Tamb-C25	10	-130,9 ± 50,0	70,1 ± 21,5	56,5 ± 35,3
	13	-87,2 ± 40,6	63,6 ± 5,8	45,3 ± 16,0
60-Ø1,0-Tamb-C25	10	-68,8 ± 0,7	32,1 ± 10,9	54,7 ± 2,6
	13	-81,0 ± 3,9	12,1 ± 3,5	40,6 ± 2,2

Utilizando o conceito de tensões residuais geradas, diferença entre o valor de tensão medido após a soldagem e o valor antes do processo de soldagem, já que o valor da tensão medida antes de soldar pode apresentar papel significativo, apresenta-se na Tabela 5.10 os valores de tensões residuais geradas com as chapas ainda travadas no suporte e após destravadas.

Tabela 5.10 - Resultados das tensões residuais geradas, com as chapas ainda travadas e após destravamento

Tensão Residual Gerada na Face			
Condição	Distância do centro [mm]	Chapas Travadas [MPa]	Chapas Destravadas [MPa]
45-Ø1,0-T150-C25	10	62,1	78,2
	13	98,0	129,6
45-Ø1,0-Tamb-C25	10	124,0	127,6
	13	106,1	114,3
45-Ø1,0-Tamb-CO2	10	148,6	172,7
	13	134,3	152,5
45-Ø1,2-Tamb-C25	10	201,0	187,5
	13	150,7	132,4
60-Ø1,0-Tamb-C25	10	100,9	123,6
	13	93,2	121,6

Pode-se observar na Tabela 5.10 que alguns ensaios apresentam tensão residual gerada maior após o destravamento das chapas soldadas. Tal fato pode ter acontecido devido a movimentação das chapas durante os ciclos térmicos de aquecimento e resfriamento, que, então possa ter tido seu movimento travado, pela contração dos parafusos, no sentido de reter a expansão das chapas, que após estes serem soltos (destravamento das chapas), possibilitou esta movimentação, no sentido de “aumentar” a largura da chapa, que causaria um possível acréscimo de tensão trativa.

Tomando 45-Ø1,0-Tamb-C25 como condição padrão de comparação, pode-se observar da seguinte forma:

- Variáveis Não Essenciais: foi possível observar que estas variáveis apresentaram alterações significativas em relação à tensão residual, de forma, até que inesperada.
 - Em relação ao ângulo de chanfro (60-Ø1,0-Tamb-C25), era esperado aumento das tensões residuais, conforme abordado no Item 2.4.3.1, percebeu-se efeito inesperado de diminuição da tensão residual, mostrado na Figura 5.5, o que pode estar relacionado à baixa espessura ensaiada e pela maior facilidade de fusão da raiz, devido a maior acessibilidade. Outro possível fator pode estar relacionado às questões de restrição do suporte, pois esperava-se um aumento das tensões residuais ao se aumentar o ângulo de chanfro, devido a maior tendência de distorção angular, restringida pelo sistema de travamento.
 - Já em se tratando do diâmetro do arame-eletrodo (45-Ø1,2-Tamb-C25), abordado no Item 2.4.3.2, onde esta variável não apresentou distorções tão pronunciadas, neste trabalho, em tensões residuais, a variação foi substancialmente observada, mostrada na Figura 5.6, acredita-se que possa estar associada à menor tensão utilizada, fato que aumenta a densidade de corrente (ver Figura 2.37), gerando maior calor localizado e por ventura, maiores tensões residuais. Outro fator, embora de pequena diferença em relação aos demais testes, seria a deposição por comprimento de solda, que também aumenta a tendência de maiores tensões residuais, devido ao maior volume de metal se solidificando e gerando tensões trativas no metal de base.
- Variáveis essenciais: como era de se esperar estas variáveis surtiram maior efeito em relação à geração de tensões residuais, pois a alteração delas acarreta a necessidade de nova EPS. Os resultados encontrados foram mais coerentes:
 - Em relação à temperatura de pré-aquecimento (45-Ø1,0-T150-C25), sugere-se que houve uma variação de temperatura menor, visto que o metal base já se

encontrava pré-aquecido, surtindo efeito de menor tensão residual após a soldagem, mostrado na Figura 5.7.

- Em relação ao gás de proteção (45-Ø1,0-Tamb-CO2), houve efeito contrário, pois o gás utilizado, no caso do CO2, possui maior condutividade térmica, levando mais calor a chapa, aumentando a diferença de temperatura, o que provoca maiores valores de tensões residuais nas chapas testadas nessas condições, mostrado na Figura 5.8.

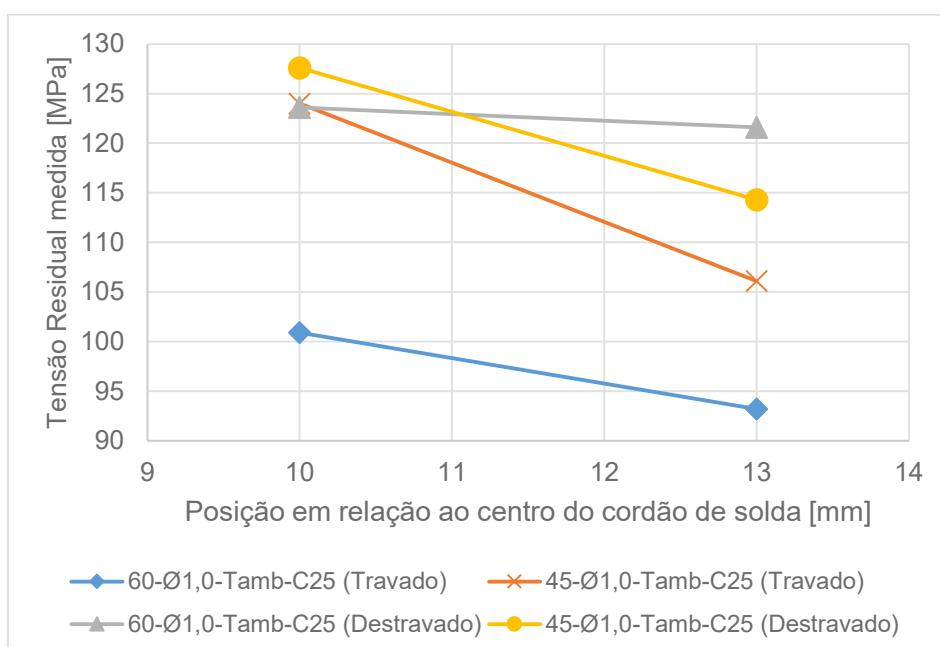


Figura 5.5 - Gráfico comparativo entre as condições 45-Ø1,0-Tamb-C25 e 60-Ø1,0-Tamb-C25

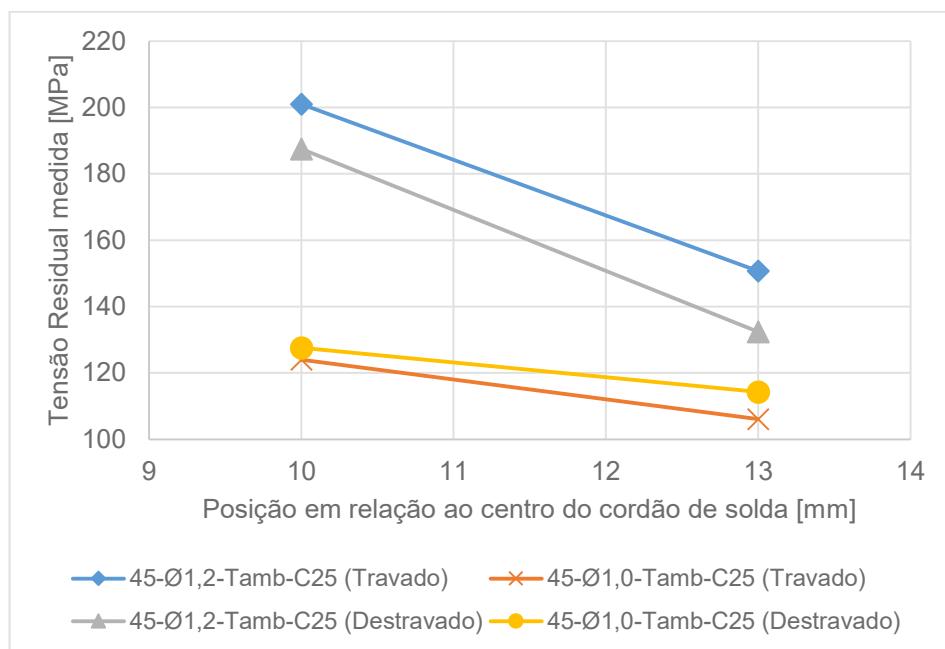


Figura 5.6 - Gráfico comparativo entre as condições 45-Ø1,0-Tamb-C25 e 45-Ø1,2-Tamb-C25

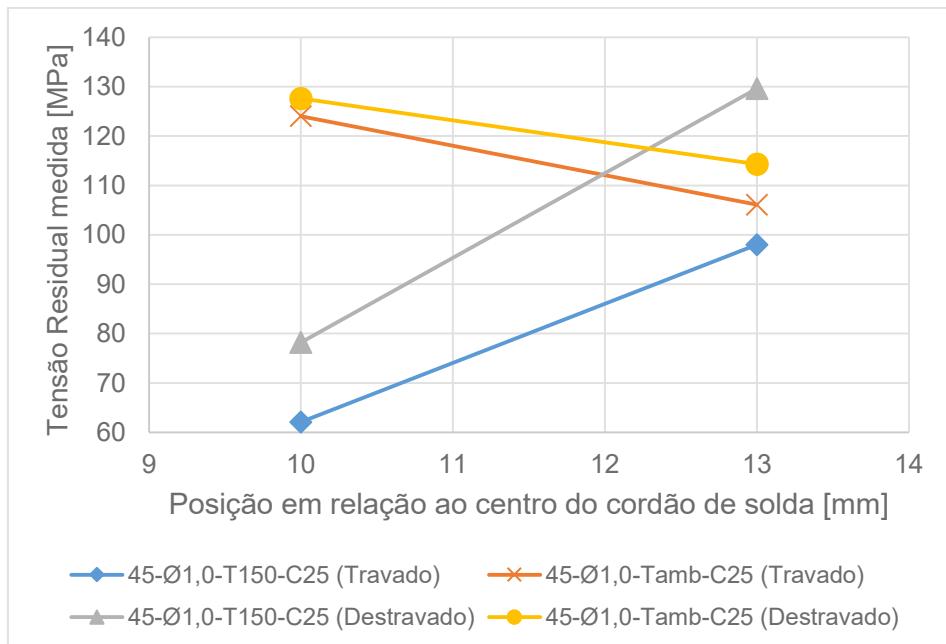


Figura 5.7 - Gráfico comparativo entre as condições 45-Ø1,0-Tamb-C25 e 45-Ø1,0-T150-C25

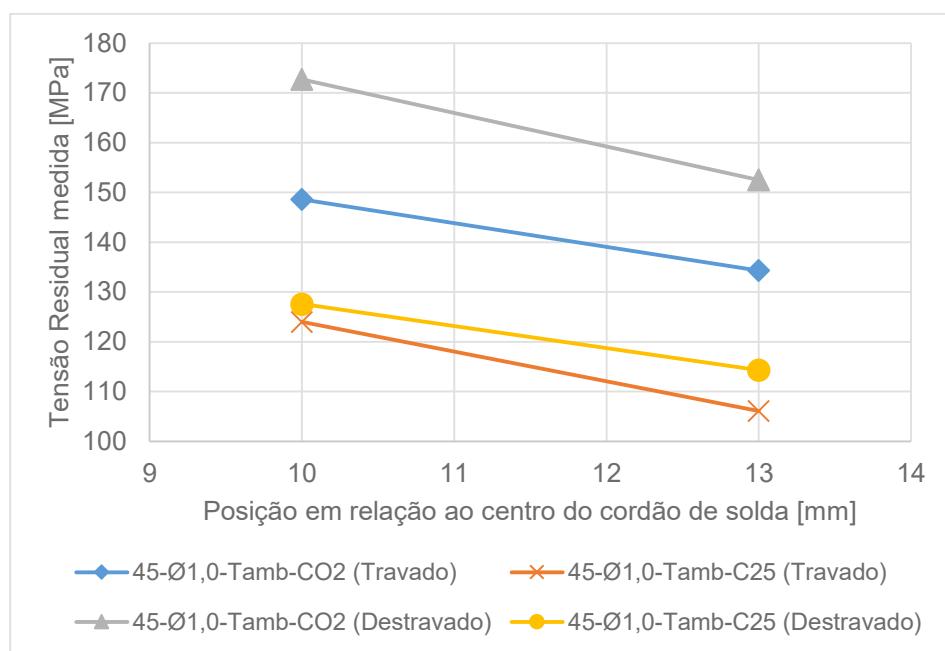


Figura 5.8 - Gráfico comparativo entre as condições 45-Ø1,0-Tamb-C25 e 45-Ø1,0-Tamb-CO2

5.6. Validação do sistema de travamento

Com intuído de averiguar o quanto o sistema de travamento fora restritivo às chapas soldadas, buscou-se verificar de forma mais abrange uma das condições de soldagem. Escolheu-se a condição 45-Ø1,2-Tamb-C25 por ser a condição que apresentou maior tensão gerada dentre as condições ensaiadas. Verificação realizada conforme Item 3.3 e Figura 3.11.

A Tabela 5.11 mostra os valores medidos através do uso do relógio comparador, na superfície das chapas. Foi realizado uma média dos valores medidos numa mesma linha longitudinal (paralelos a H1 e H2, Figura 3.11 e Figura 5.9). Diante disso é possível concluir que a distorção angular foi devidamente contida através do sistema de travamento proposto.

Através das mesmas medições com relógio comparador, mas, no entanto, realizando uma média dos valores em linhas transversais (paralelos a V1, V2, V3 e V4, Figura 3.11). A Tabela 5.12 mostra esses valores. Dessa forma, também pode-se afirmar que o suporte deu a rigidez necessária ao empenamento longitudinal.



Figura 5.9 - Medição das posições superiores das chapas durante verificação de deformação

Tabela 5.11 - Valores médios de desnívelamento, na direção longitudinal da solda, antes e depois de soldar

Antes [mm]	Depois [mm]
-0,44 ± 0,33	-0,51 ± 0,34
-0,30 ± 0,30	-0,39 ± 0,30
-0,34 ± 0,24	-0,37 ± 0,29
-0,33 ± 0,34	-0,34 ± 0,31
-0,22 ± 0,33	-0,28 ± 0,32
-0,09 ± 0,30	-0,12 ± 0,26

Tabela 5.12 - Valores médios de desnívelamento, na direção transversal, paralelas à solda, antes e depois de soldar

Antes [mm]	0,07 ± 0,10	-0,17 ± 0,13	-0,28 ± 0,15	-0,77 ± 0,10
Depois [mm]	0,08 ± 0,07	-0,27 ± 0,13	-0,39 ± 0,17	-0,76 ± 0,12

Na Tabela 5.13 são mostrados os valores das medições das larguras (V1, V2, V3 e V4) e na Tabela 5.14 são mostrados os comprimentos (H1 e H2). É possível verificar que o sistema de travamento possibilitou maior deformação transversal (contração de aproximadamente $0,43 \pm 0,06$ mm), e deformação longitudinal (contração de aproximadamente 0,18 mm). Dessa forma, o sistema de travamento não conseguiu restringir completamente a movimentação das chapas e consequentemente “aliviando” as tensões que possivelmente poderiam ser majoradas. No entanto, tal deslocamento ocorreu devido a dois fatores:

- O primeiro se refere ao fato de que os parafusos ficaram relativamente próximos ao cordão de solda e, portanto, passaram por um elevado gradiente térmico, que possivelmente facilitou tal movimentação, pois a dilatação dos parafusos fez com o aperto fosse diminuído. Este fato foi comprovado por meio da comparação entre o torque de aperto (110 N.m) e o torque de desaperto, menor que 100 N.m, não possível de ser detectado por estar fora da faixa de aplicação do torquímetro.
- O segundo fator se refere ao fato de que, por questões de montagem, foi deixada folga na furação de aproximadamente $0,75 \pm 0,12$ mm, priorizando a obtenção da abertura de raiz proposta.

Tabela 5.13 - Valores da largura de montagem das chapas, medidos antes e depois de soldar

	V1	V2	V3	V4	Média
Antes [mm]	101,74	101,66	101,78	101,94	101,78
Depois [mm]	101,38	101,18	101,3	101,54	101,35

Tabela 5.14 - Valores do comprimento de montagem das chapas, medidos antes e depois de soldar

	H1	H2	Média
Antes [mm]	291,66	291,46	291,56
Depois [mm]	291,48	291,28	291,38

Com intuito de aferir a distorção causada numa condição de qualificação de EPS convencional, sem uso do sistema de travamento, realizou-se as mesmas medições anteriores, porém com uma das chapas sem o travamento com parafusos, utilizou-se somente do ponteamento nas extremidades para ajuste da abertura de raiz. Os valores mostram que houve uma distorção angular bem superior (~10 vezes), se comparado ao sistema com travamento. Ocorrendo uma diferença de distorção angular (entre a solda com chapas travadas e chapas destravadas) de aproximadamente 0,023 rad, melhor visualizado através da Figura 5.10. A Figura 2.9 mostra a variação da distorção angular com a velocidade de soldagem e energia imposta. Utilizando-se da mesma como forma de prever tal deformação, era de se esperar uma distorção de aproximadamente 0,005 rad para as condições utilizadas.

Através das medições de largura do cordão de solda, Tabela 5.8 pode-se prever a distorção angular, através das relações dimensionais da soldagem, conforme Figura 2.10. Diante disso, com largura do cordão de solda médio de 7,28 mm e penetração de 4,76 mm (penetração total conseguida em todas as condições), observa-se que a distorção angular prevista seria da ordem de 0,016 rad, valor este mais próximo dos 0,023 rad medidos, mas com energia imposta na ordem de 84% menor do previsto na literatura mencionada.

Tabela 5.15 - Valores médios de desnívelamento, na direção longitudinal solda, sem travamento, antes e depois de se soldar

Antes [mm]	Depois [mm]
$-0,20 \pm 0,10$	$-0,21 \pm 0,07$
$-0,04 \pm 0,09$	$-0,04 \pm 0,08$
$-0,01 \pm 0,1$	$-0,01 \pm 0,09$
$0,44 \pm 0,08$	$0,47 \pm 0,03$
$0,59 \pm 0,07$	$0,85 \pm 0,05$
$0,83 \pm 0,05$	$1,54 \pm 0,08$

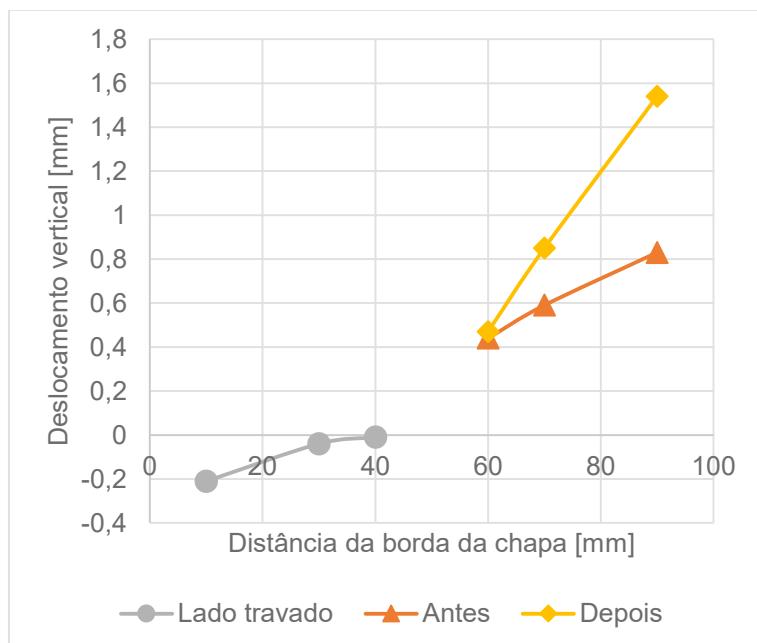


Figura 5.10 - Deslocamentos verticais transversalmente ao cordão de solda

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES

Tomando-se como ponto de partida que o objetivo proposto foi o de avaliar a geração de tensões residuais ao modificar algumas das variáveis essenciais e não essenciais, de forma a tornar possível a análise da real influência destas variáveis durante o processo de qualificação de uma Especificação de Procedimento de Soldagem, e diante dos resultados obtidos, conclui-se que:

- A variável não essencial relacionada ao arranjo da junta causou queda nos valores de tensão residual ao aumentar o ângulo de chanfro;
- A variável não essencial relacionada ao diâmetro do arame-eletrodo, causou acréscimo nas tensões residuais ao aumentar essa medida;
- A variável essencial de pré-aquecimento levou a queda nos valores das tensões residuais ao aumentar esta temperatura;
- A variável essencial relacionada ao gás de proteção, aumentou a tensões residuais ao modificar da mistura 75% Ar + 25% CO₂ para 100% CO₂;

Como conclusões adicionais, relacionadas aos demais ensaios, tem-se:

- Tensões residuais na raiz tendem a apresentarem maiores valores, se comparados ao medidos na face, para soldagem em passe único;
- Mesmo com a presença de tensões residuais, observou-se que os valores do limite de escoamento e tensão máxima foram maiores, se comparados os ensaios de tração do metal de base e das juntas soldadas, levando a crer que a influência de transformações metalúrgicas superaram o efeito das tensões residuais no que tange à resistência mecânica da junta;
- Nos dobramentos de face, praticamente todas as condições foram aprovadas;
- Por outro lado, apenas uma condição de soldagem obteve aprovação no ensaio de dobramento de raiz;

- A condição que apresentou maiores valores de tensão residual foi a única condição a não obter resultados satisfatórios nos ensaios de tração;
- Nos casos onde houve a presença de falta de fusão lateral, os valores de tensão residual foram nulos;
- As macrografias mostraram que os parâmetros de soldagem foram adequados para as juntas soldadas, não revelando qualquer defeito aparente;
- O sistema de travamento se mostrou eficaz quanto a restrição das distorções angulares, empenamentos e flambagem, no entanto percebeu-se certa liberdade de movimentação quanto a contração transversal.

CAPÍTULO VII

TRABALHOS FUTUROS

Os trabalhos futuros, sugeridos, como forma de complementar e aprimorar esta dissertação são:

- Realizar medições de tensões residuais por outros métodos como forma de comparação e validação;
- Optar por suportes maiores, de forma que os parafusos se situem mais distantes do cordão de solda, dentro do limite para que não haja deformação por flambagem, da chapa;
- Ensaiar outras variáveis essenciais e não essenciais;
- Verificar a real influência da frequência de curto-circuito na resistência mecânica da junta, como forma de comprovar ou contestar este trabalho.

CAPÍTULO VIII

REFERÊNCIAS

Abendi PR-050. São Paulo: Abendi, 2011.

ABNT NBR-14842. Soldagem - Critérios para a qualificação e certificação de inspetores para o setor de petróleo e gás, petroquímico, fertilizantes, naval e termogeração (exceto nuclear). Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2015.

ABNT NBR 8800. NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. 2. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

ADEDAYO, S. M.; ADEYEMI, M. B. Effect of preheat on residual stress distributions in arc-welded mild steel plates. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 9, n. 1, p. 7–11, 2000.

<https://doi.org/10.1361/105994900770346213>

ALMEIDA, D. Determinação das tensões residuais e deformações resultantes do processo de soldadura TIG através do método dos elementos finitos. 2012.

ANDREUCCI, R. **Líquidos Penetrantes** São Paulo: Abendi, , 2016a.

ANDREUCCI, R. **Aplicação Industrial Ensaio por Ultrassom** São Paulo: Abendi, , 2016b.

ARAÚJO, B. A. et al. Estudo das tensões residuais de juntas soldadas de aço API 5L X80. **Soldagem e Inspeção**, v. 18, n. 3, p. 217–226, 2013.

<https://doi.org/10.1590/S0104-9224201300030004>

- ARAÚJO, D. B. DE. **Estudo das Distorções em Soldagem com Uso de Técnicas Numéricas e de Otimização.** [s.l.] Universidade Federal de Uberlândia, 2012.
- ASME B31. **Pressure Piping.** New York, NY: The American Society of Mechanical Engineers, 2017.
- ASME II-C. Materials. In: **Part C - Specifications for Welding Rods Electrodes and Filler Metals.** New York, NY: The American Society of Mechanical Engineers, 2017. p. 969.
- ASME IX. **Welding, Brazing and Fusion Qualifications.** New York, NY: The American Society of Mechanical Engineers, 2017.
- ASME VIII - DIV1. **Rules for Construction of Pressure Vessels.** 2007. ed. New York, NY: ASME International, 2017.
- ASTM E8 / E8M-16A. **Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials 1.** West Conshohocken, PA: ASTM International, 2016.
- AWS 5.18. Committee on Filler Metals and Allied Materials. In: **SPECIFICATION FOR CARBON STEEL ELECTRODES AND RODS FOR GAS SHEILDDED ARC WELDING.** Miami, FL: American Welding Society, 2005.
- AWS 5.28. Committee on Filler Metals and Allied Materials. In: **SPECIFICATION FOR LOW-ALLOY STEEL ELECTRODES AND RODS FOR GAS SHIELDED ARC WELDING.** Miami, FL: American Welding Society, 2005.
- AWS 5.32. Committee on Filler Metals and Allied Materials. In: **WELDING CONSUMABLES - GASES AND GAS MIXTURES FOR FUSION WELDING AND ALLIED PROCESSES.** Miami, FL: American Welding Society, 2011.
- AWS A2.4. Committee on Definitions and Symbols. In: **STANDARD SYMBOLS FOR WELDING, BRAZING, AND NONDESTRUCTIVE EXAMINATION.** Miami, FL: American Welding Society, 2012. p. 150.
- BECK, G.; DENIS, S.; SIMON, A. **International Conference on Residual Stresses.** Dordrecht: Springer Netherlands, 1989.

<https://doi.org/10.1007/978-94-009-1143-7>

COFIÑO, R. C. **Análise das tensões residuais em uma junta soldada em condição overmatch**. [s.l.] Centro Universitário da FEI, 2010.

CORAINI, R.; KOBAYASHI, Y.; GONÇLVES, G. DE M. B. Influência do tipo de chanfro, tecimento e sentido de laminação na distorção angular em soldagem GMAW-P robotizada de alumínio. **Soldagem e Inspecão**, v. 16, n. 2, p. 123–136, 2011.

<https://doi.org/10.1590/S0104-92242011000200005>

CULLITY, B. D.; STOCK, S. R. **Elements of X-ray diffraction**. 3. ed. [s.l.] Pearson Education, 2001.

DE MELO, L. G. T. C. et al. Influência do ângulo de bisel no cálculo de tensões residuais através do método de Deslocamento de Pontos Coordenados (DPC) em chapas navais soldadas. **Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**, p. 7823–7833, 6 nov. 2016.

DONATO, G. H. B. **Efeitos de Heterogeneidades Mecânicas sobre Forças Motrizes de Trinca em Juntas Soldadas: Determinação Experimental de Tenacidade e Extensão de Metodologias de Avaliação de Criticidade de Defeitos**. [s.l.] Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2008.

FENG, Z. **Processes and mechanisms of welding residual stress and distortion**. [s.l: s.n.].

FITZPATRICK, M. et al. **A National Measurement Good Practice Guide No. 52: Determination of Residual Stresses by X-ray Diffraction - Issue 2**. London: National Physical Laboratory, 2005.

FOGAGNOLO, J. B. **Introdução a processos e metalurgia da soldagem** Campinas: Universidade de Campinas, , 2011.

GARCIA, R. Conceitos Gerais sobre Torque e Processos de Torque Conceitos Relevantes sobre Coeficiente de Atrito. 2011.

Guia ABENDI. São Paulo: Abendi, 2018.

HEMMATZADEH, M.; MOSHAYEDI, H.; SATTARI-FAR, I. Influence of heat input and radius to pipe thickness ratio on the residual stresses in circumferential arc welded pipes of API X46 steels. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, v. 150, p. 62–71, 2017.

<https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2017.01.001>

IDC. Residual stresses in weld joints. Disponível em: <http://www.idc-online.com/technical_references/pdfs/mechanical_engineering/Residual_stresses_in_weld_joints.pdf>. Acesso em: 26 jul. 2017.

ISO 2553. Welding and allied processes -- Symbolic representation on drawings -- Welded joints. Genève, Switzerland: International Organization of Standardization, 2018.

ISO 3834-1. Quality requirements for fusion welding of metallic materials. In: Part 1: Criteria for the selection of the appropriate level of quality requirements. Genève, Switzerland: International Organization of Standardization, 2005. p. 14.

LU, J. Handbook on Measurement of Residual Stresses. Libum, USA: Fairmont Pr, 1996.

MASUBUCHI, K. Analysis of welded structures: Residual Stresses, Distortion, and their Consequence. 1. ed. London: Pergamon Ltd, 1980. v. 33

MISHCHENKO, A.; OLIVEIRA, B. J. DE; SCOTTI, A. Preparação de Superfície para Medição de Tensões Residuais em Soldagem por DRX. **Soldagem & Inspeção**, v. 21, n. 4, p. 497–507, dez. 2016.

<https://doi.org/10.1590/0104-9224/si2104.09>

MODENESI, P., MARQUES, P., SANTOS, D. Introdução à metalurgia da soldagem. **Belo Horizonte, MG:** ..., p. 1–21, 2012.

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V.; SANTOS, D. B. **Introdução a Metalurgia da Soldagem** Belo HorizonteUniversidade Federal de Minas Gerais, , 2006.

MODENESI, P. P. J. Terminologia Usual de Soldagem e Símbolos de Soldagem Belo HorizonteUniversidade Federal de Minas Gerais, , 2008.

N-133. Soldagem. In: **Normas Petrobras**. Rev. M ed. Rio de Janeiro: CONTEC - PETROBRAS, 2015. p. 1–97.

NBR ISO 9001. **Sistemas de gestão da qualidade - Requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT–Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2001.

NOYAN, I. C.; COHEN, J. B. **Residual Stress: Measurement by Diffraction and Interpretation**. New York, NY: Springer New York, 1987.

<https://doi.org/10.1007/978-1-4613-9570-6>

OLIVEIRA, G. L. G. **Avaliação de Tensões Residuais de Soldagem em Chapas Planas do Aço Estrutural ASTM A516 G70**. [s.l.] Universidade Federal do Ceará, 2008.

PANONTIN, T. L.; HILL, M. R. The effect of residual stresses on brittle and ductile fracture initiation predicted by micromechanical models. **International Journal of Fracture**, v. 82, n. 4, p. 317–333, 1996.

<https://doi.org/10.1007/BF00013236>

PEREIRA, J. H.; BRACARENSE, A. Q. Análise de Distorções na Soldagem de Juntas em “X” e “V” em Modelos Reduzidos em Escala de Anéis Segmentados Utilizando o Monitoramento Contínuo com Sensores a Laser. v. 21, n. 1, p. 44–58, 2016.

PREVÉY, P. S. X-ray diffraction residual stress techniques. **Metals Handbook. 10. Metals Park**, n. 513, p. 380–392, 1986.

RADAJ, D. **Heat Effects of Welding**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1992.
<https://doi.org/10.1007/978-3-642-48640-1>

RADAJ, D. **Welding Residual Stresses and Distortion**. Dusseldorf: DVS Verlag, 2003.

REDDY, B. N. S.; SWAMY, N. L. Influence of Groove Angle in V-groove Butt joints on Transverse shrinkage in CO2 Arc Welding process. **International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST)**, v. 5, n. 2, p. 410–412, 2013.

SAE J1397. **ESTIMATED MECHANICAL PROPERTIES AND MACHINABILITY OF STEEL BARS.** Warrendale, PA: SAE International, 1992.

SAE J403. **Chemical Compositions of SAE Carbon Steels.** Warrendale, PA: SAE International, 2009.

SATTARI-FAR, I.; FARAHANI, M. R. Effect of the weld groove shape and pass number on residual stresses in butt-welded pipes. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, v. 86, n. 11, p. 723–731, 2009.

<https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2009.07.007>

SCHAJER, G. S. **Practical Residual Stress Measurement Methods.** Chennai, India: John Wiley & Sons, Inc, 2013.

<https://doi.org/10.1002/9781118402832>

SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. **Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho.** São Paulo: Artliber Editora, 2008.

Shimadzu. Disponível em: <<https://www.ssi.shimadzu.com/products/universal-tensile-testing/ags-x.html>>. Acesso em: 3 ago. 2018.

TELLES, P. C. DA S. **Vasos de pressão.** 2 ed. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2001.

TOTTEN, G.; HOWES, M.; INOUE, T. **Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel.** Ohio: ASM, 2002.

TUŠEK, J. et al. Influence of type of welded joint on welding efficiency. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 8, n. 3, p. 157–164, 4 jun. 2003.

<https://doi.org/10.1179/136217103225010961>

WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H. DE. **Soldagem: Processos e Metalurgia.** São Paulo, SP: Edgard Blucher, 2004.

Weldgina. Disponível em: <<https://weldgina.com/?product=mepblitz-dc-i5>>. Acesso em: 3 ago. 2018.

WELDING HANDBOOK. **Welding Technology**. 8. ed. Miami, FL: American Welding Society Inc, 1998. v. 1

WITHERS, P. J.; BHADESHIA, H. K. D. H. Residual stress. Part 1—measurement techniques. **Materials Science and Technology**, v. 17, n. April, p. 355–365, 2001.
<https://doi.org/10.1179/026708301101509980>

WULPI, D. J. **Understanding how components fail**. 2. ed. Portland, OR: ASM International, 1999.

Anexo A

Table QW-255 Welding Variables Procedure Specifications (WPS) — Gas Metal-Arc Welding (GMAW and FCAW)				
Paragraph	Brief of Variables		Essential	Supplementary Essential
				Nonessential
QW-402 Joints	.1	ϕ Groove design		X
	.4	- Backing		X
	.10	ϕ Root spacing		X
	.11	\pm Retainers		X
QW-403 Base Metals	.5	ϕ Group Number		X
	.6	T Limits		X
	.8	ϕ T Qualified	X	
	.9	t Pass $> \frac{1}{2}$ in. (13 mm)	X	
	.10	T limits (S. cir. arc)	X	
	.11	ϕ P-No. qualified	X	
QW-404 Filler Metals	.4	ϕ F-Number	X	
	.5	ϕ A-Number	X	
	.6	ϕ Diameter		X
	.12	ϕ Classification		X
	.23	ϕ Filler metal product form	X	
	.24	\pm or ϕ Supplemental	X	
	.27	ϕ Alloy elements	X	
	.30	ϕ t	X	
	.32	t Limits (S. cir. arc)	X	
	.33	ϕ Classification		X
QW-405 Positions	.1	+	Position	
	.2	ϕ Position		X
	.3	ϕ $\uparrow \downarrow$ Vertical welding		X
QW-406 Preheat	.1	Decrease $> 100^{\circ}\text{F}$ (55°C)	X	
	.2	ϕ Preheat maint.		X
	.3	Increase $> 100^{\circ}\text{F}$ (55°C) (IP)		X
QW-407 PWHT	.1	ϕ PWHT	X	
	.2	ϕ PWHT (T & T range)		X
	.4	T Limits	X	
	.1	\pm Trail or ϕ comp.		X
QW-408 Gas	.2	ϕ Single, mixture, or %	X	
	.3	ϕ Flow rate		X
	.5	\pm or ϕ Backing flow		X
	.9	- Backing or ϕ comp.	X	
	.10	ϕ Shielding or trailing	X	
	.1	$>$ Heat input		X
QW-409 Electrical Characteristics	.2	ϕ Transfer mode	X	
	.4	ϕ Current or polarity		X
	.8	ϕ I & E range		X

Figura A. 1 - QW-255 (Variáveis da Especificação de Procedimento de Soldagem (EPS) para os processos GMAW e FCAW). Fonte: (ASME IX, 2017)

Table QW-255 Welding Variables Procedure Specifications (WPS) — Gas Metal-Arc Welding (GMAW and FCAW) (Cont'd)				
Paragraph	Brief of Variables	Essential	Supplementary Essential	Nonessential
QW-410 Technique	.1 ϕ String/weave			X
	.3 ϕ Orifice, cup, or nozzle size			X
	.5 ϕ Method cleaning			X
	.6 ϕ Method back gouge			X
	.7 ϕ Oscillation			X
	.8 ϕ Tube-work distance			X
	.9 ϕ Multiple to single pass/side		X	X
	.10 ϕ Single to multiple electrodes		X	X
	.15 ϕ Electrode spacing			X
	.25 ϕ Manual or automatic			X
	.26 \pm Peening			X
	.64 Use of thermal processes	X		

Legend:

+ Addition	> Increase/greater than	↑ Uphill	← Forehand	ϕ Change
- Deletion	< Decrease/less than	↓ Downhill	→ Backhand	

Figura A.1 - QW-255 (Variáveis da Especificação de Procedimento de Soldagem (EPS) para os processos GMAW e FCAW) (continuação)

Anexo B

Tabela B. 1 - QW-451 - Procedimento de qualificação para limites de espessuras e corpos de prova. Fonte: (ASME IX, 2017)

Table QW-451.1
Groove-Weld Tension Tests and Transverse-Bend Tests

Thickness T of Test Coupon, Welded, in. (mm)	Range of Thickness T of Base Metal, Qualified, in. (mm) [Note (1)] and [Note (2)]		Maximum Thickness t of Deposited Weld Metal, Qualified, in. (mm) [Note (1)] and [Note (2)]	Type and Number of Tests Required (Tension and Guided-Bend Tests) [Note (2)]			
	Min.	Max.		Tension, QW-150	Side Bend, QW-160	Face Bend, QW-160	Root Bend, QW-160
Less than $\frac{1}{16}$ (1.5)	T	$2T$	$2t$	2	...	2	2
$\frac{1}{16}$ to $\frac{3}{8}$ (1.5 to 10), incl.	$\frac{1}{16}$ (1.5)	$2T$	$2t$	2	[Note (5)]	2	2
Over $\frac{3}{8}$ (10), but less than $\frac{3}{4}$ (19)	$\frac{3}{16}$ (5)	$2T$	$2t$	2	[Note (5)]	2	2
$\frac{3}{4}$ (19) to less than $1\frac{1}{2}$ (38)	$\frac{3}{16}$ (5)	$2T$	$2t$ when $t < \frac{3}{4}$ (19)	2 [Note (4)]	4	...	...
$\frac{3}{4}$ (19) to less than $1\frac{1}{2}$ (38)	$\frac{3}{16}$ (5)	$2T$	$2T$ when $t \geq \frac{3}{4}$ (19)	2 [Note (4)]	4	...	...
$1\frac{1}{2}$ (38) to 6 (150), incl.	$\frac{3}{16}$ (5)	8 (200) [Note (3)]	$2t$ when $t < \frac{3}{4}$ (19)	2 [Note (4)]	4	...	...
$1\frac{1}{2}$ (38) to 6 (150), incl.	$\frac{3}{16}$ (5)	8 (200) [Note (3)]	8 (200) [Note (3)] when $t \geq \frac{3}{4}$ (19)	2 [Note (4)]	4	...	...
Over 6 (150) [Note (6)]	$\frac{3}{16}$ (5)	$1.33T$	$2t$ when $t < \frac{3}{4}$ (19)	2 [Note (4)]	4	...	...
Over 6 (150) [Note (6)]	$\frac{3}{16}$ (5)	$1.33T$	$1.33T$ when $t \geq \frac{3}{4}$ (19)	2 [Note (4)]	4	...	...

NOTES:

- (1) The following variables further restrict the limits shown in this table when they are referenced in QW-250 for the process under consideration: QW-403.9, QW-403.10, QW-404.32, and QW-407.4. Also, QW-202.2, QW-202.3, and QW-202.4 provide exemptions that supersede the limits of this table.
- (2) For combination of welding procedures, see QW-200.4.
- (3) For the SMAW, SAW, GMAW, PAW, and GTAW welding processes only; otherwise per Note (1) or $2T$, or $2t$, whichever is applicable.
- (4) see QW-151.1, QW-151.2, and QW-151.3 for details on multiple specimens when coupon thicknesses are over 1 in. (25 mm).
- (5) Four side-bend tests may be substituted for the required face- and root-bend tests, when thickness T is $\frac{3}{8}$ in. (10 mm) and over.
- (6) For test coupons over 6 in. (150 mm) thick, the full thickness of the test coupon shall be welded.

Figure QW-463.1(a)
Plates — Less Than $\frac{3}{4}$ in. (19 mm)
Thickness Procedure Qualification

Discard	this piece
Reduced section	tensile specimen
Root bend	specimen
Face bend	specimen
Root bend	specimen
Face bend	specimen
Reduced section	tensile specimen
Discard	this piece



Tabela B. 2 – QW-463.1(a): Localização dos corpos de prova à tração e aos dobramentos na chapa soldada. Fonte: (ASME IX, 2017)

Anexo C

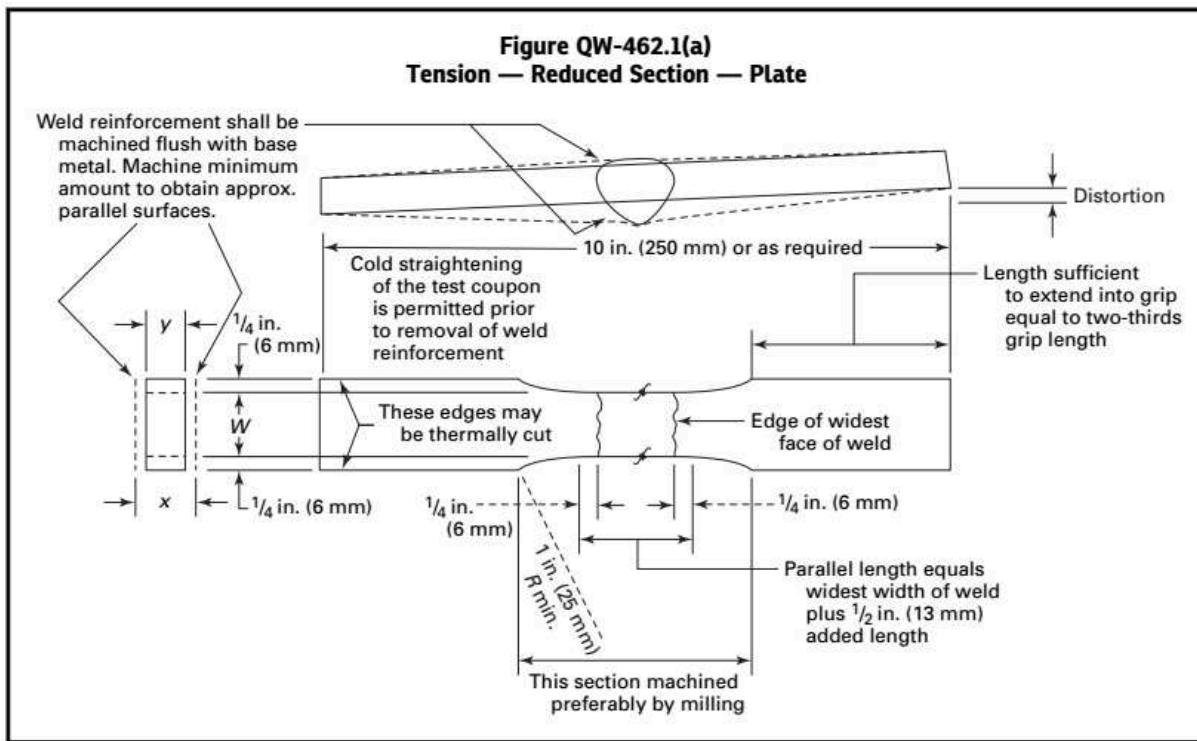
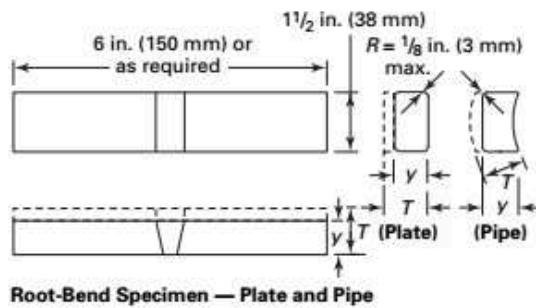
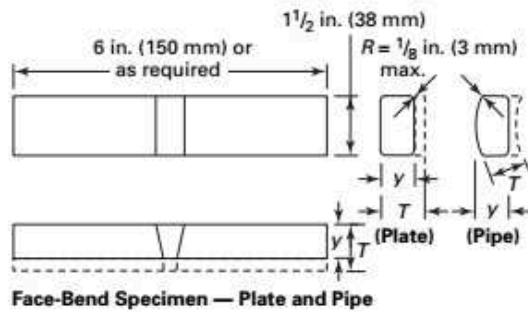


Figura C. 1 - QW-462.1(a): Dimensões para os corpos de prova à tração. Fonte: (ASME IX, 2017)

Figure QW-462.3(a)
Face and Root Bends — Transverse



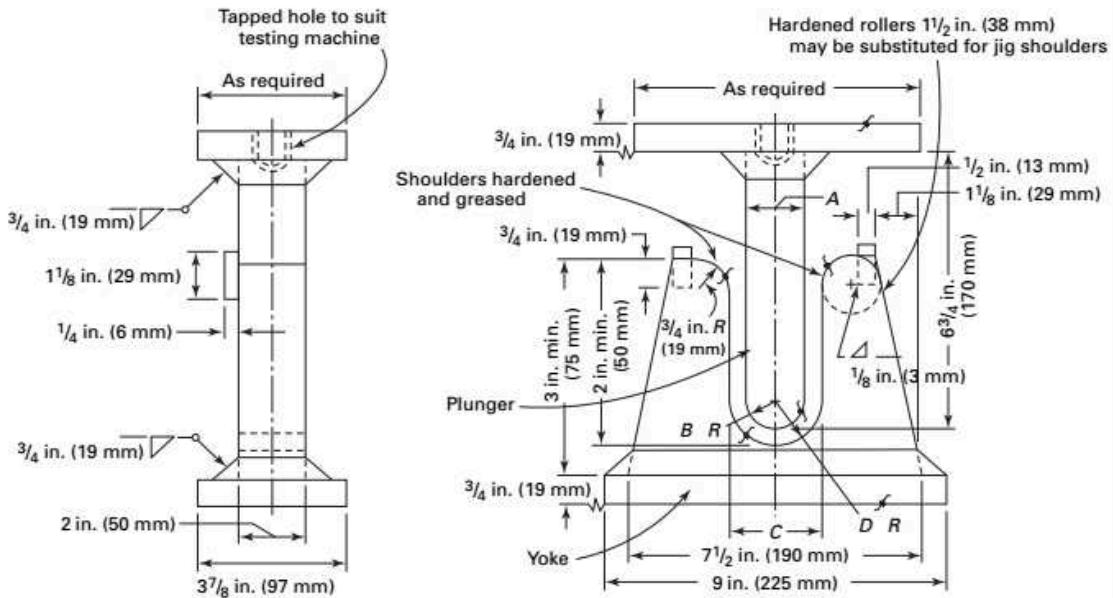
Y, in. (mm)		
<i>T</i> , in. (mm)	P-No. 23, F-No. 23, or P-No. 35	All Other Metals
$\frac{1}{16} < \frac{1}{8} (1.5 < 3)$	T	T
$\frac{1}{8} - \frac{3}{8} (3 - 10)$	$\frac{1}{8} (3)$	T
$> \frac{3}{8} (10)$	$\frac{1}{8} (3)$	$\frac{3}{8} (10)$

GENERAL NOTES:

- (a) Weld reinforcement and backing strip or backing ring, if any, may be removed flush with the surface of the specimen. If a recessed ring is used, this surface of the specimen may be machined to a depth not exceeding the depth of the recess to remove the ring, except that in such cases the thickness of the finished specimen shall be that specified above. Do not flame-cut nonferrous material.
- (b) If the pipe being tested has a diameter of NPS 4 (DN 100) or less, the width of the bend specimen may be $\frac{3}{4}$ in. (19 mm) for pipe diameters NPS 2 (DN 50) to and including NPS 4 (DN 100). The bend specimen width may be $\frac{7}{8}$ in. (10 mm) for pipe diameters less than NPS 2 (DN 50) down to and including NPS $\frac{3}{8}$ (DN 10) and as an alternative, if the pipe being tested is equal to or less than NPS 1 (DN 25) pipe size, the width of the bend specimens may be that obtained by cutting the pipe into quarter sections, less an allowance for saw cuts or machine cutting. These specimens cut into quarter sections are not required to have one surface machined flat as shown in **QW-462.3(a)**. Bend specimens taken from tubing of comparable sizes may be handled in a similar manner.

Figura C. 2 - QW-462.3(a): Dimensões para os corpos de prova ao dobramento. Fonte: (ASME IX, 2017)

Figure QW-466.1
Test Jig Dimensions



Material	SI Units				
	Thickness of Specimen, mm	A, mm	B, mm	C, mm	D, mm
P-No. 23 to P-No. 21 through P-No. 25; P-No. 21 through P-No. 25 with F-No. 23; P-No. 35; any P-No. metal with F-No. 33, 36, or 37	3 $t = 3$ or less	50 $16\frac{1}{2}t$	25 $8\frac{1}{4}t$	57 $18\frac{1}{2}t + 1.6$	29 $9\frac{1}{4}t + 0.8$
P-No. 11A, P-No. 11B; P-No. 25 to P-No. 21 or P-No. 22 or P-No. 25	10 $t = 10$ or less	67 $6\frac{2}{3}t$	33 $3\frac{1}{3}t$	90 $8\frac{2}{3}t + 3.2$	45 $4\frac{1}{3}t + 1.6$
P-No. 51; P-No. 49	10 $t = 10$ or less	80 $8t$	40 $4t$	103 $10t + 3.2$	52 $5t + 1.6$
P-No. 52; P-No. 53; P-No. 61; P-No. 62	10 $t = 10$ or less	100 $10t$	50 $5t$	123 $12t + 3.2$	62 $6t + 1.6$
All others with greater than or equal to 20% elongation	10 $t = 10$ or less	40 $4t$	20 $2t$	63 $6t + 3.2$	32 $3t + 1.6$
Materials with 3% to less than 20% elongation	$t = [\text{see Note (1)}]$	$32\frac{7}{8}$ $t \text{ max.}$	$16\frac{7}{16}t$ max.	$A + 2t + 1.6$ max.	$\frac{1}{2}C + 0.8$ max.

GENERAL NOTES:

- For P-Numbers, see QW/QB-422; for F-Numbers, see QW-432.
- For guided-bend jig configuration, see QW-466.2, QW-466.3, and QW-466.4.
- The weld and heat-affected zone, in the case of a transverse weld bend specimen, shall be completely within the bend portion of the specimen after testing.
- For materials with less than 3% elongation, a macro-etch specimen shall be used in lieu of bend test at each bend test location. Acceptance criteria shall be in accordance with QW-183(a).

NOTE:

- The dimensions of the test jig shall be such as to give the bend test specimen a calculated percent outer fiber elongation equal to at least that of the base material with the lower minimum elongation as specified in the base material specification.

$$\text{percent outer fiber elongation} = \frac{100t}{A + t}$$

The following equation is provided for convenience in calculating the bend specimen thickness:

$$\text{thickness of specimen}[t] = \frac{A \times \text{percent elongation}}{100 - (\text{percent elongation})}$$

Figura C. 3 – QW-466.1: Dimensões dos dispositivos para realização dos ensaios ao dobramento. Fonte: (ASME IX, 2017)

Anexo D

MIG-MAG

A composição química dos arames para soldagem da Belgo Bekaert Arames proporciona excelente desoxidação, resultando em soldas com bom acabamento superficial, ótimas propriedades mecânicas, baixo nível de respingos e excelente sanidade radiográfica.

Com um revestimento de cobre delgado e aderente, os arames para soldagem MIG-MAG garantem ótima alimentabilidade e baixo desgaste do bico de contato, além de boa proteção contra oxidação do arame durante seu uso.

Arames para soldagem **MIG-MAG de Aços ao Carbono**

BME-C4

AWS A5.18 / ASME SFA5.18 ER70S-6

Aplicações

Largamente utilizado em praticamente todas as aplicações de soldagem MIG-MAG de Aços ao Carbono em geral: ASTM A36, A285-C, A515-60, A516-55/60, SAE 1010, 1020, etc.

Indicado para a soldagem de chapas finas (tubos e estampados em geral) e chapas grossas (máquinas pesadas, vasos de pressão, estruturas soldadas, construção naval, etc.), inclusive com CO₂ puro.

Faixa de composição química (%):

C Carbono	Si Silício	Mn Manganês	P Fósforo	S Enxofre	Cu Cobre
0,06 a 0,15	0,8 a 1,15	1,4 a 1,85	0,025 máx.	0,035 máx.	0,5 máx.

Demais ligas sob consulta.

Características

Extremamente versátil, o BME-C4 é um arame sólido com boa fluidez da poça de fusão. Quando é usado na transferência por curto-círcito, o BME-C4 apresenta grande eficiência de deposição e permite a soldagem com alta penetração e em todas as posições. O elevado teor de manganês e silício proporciona excelente desoxidação do metal de solda nas aplicações em superfícies com moderada oxidação superficial. O resultado são cordões com bom acabamento, ótimas propriedades mecânicas, baixo nível de respingos e junta de excelente sanidade radiográfica.

Faixa de propriedades mecânicas:

Resistência à tração MPa	Límite de escoamento MPa	Alongamento %	Resistência ao impacto J a -30° C
480 mín.	400 mín.	22 mín.	27 mín.

Gás de proteção

Dióxido de Carbono (CO₂)

Misturas: Argônio + Dióxido de Carbono (Ar+CO₂)

Argônio + Oxigênio (Ar+O₂)

Argônio + Dióxido de Carbono + Oxigênio (Ar+CO₂+O₂)

Diâmetros disponíveis (mm)

0,80 / 0,90 / 1,00 / 1,20 / 1,32 / 1,60

Acondicionamentos e embalagens:

Carretel metálico com 18 kg

Carretel plástico com 15 kg (apenas para 0,8 e 0,9 mm)

Pack Belgo (Barrica) com 150, 280 e 300 kg

Posições de soldagem

Todas



Plana



Horizontal
em ângulo



Horizontal



Vertical



Sobre cabeça

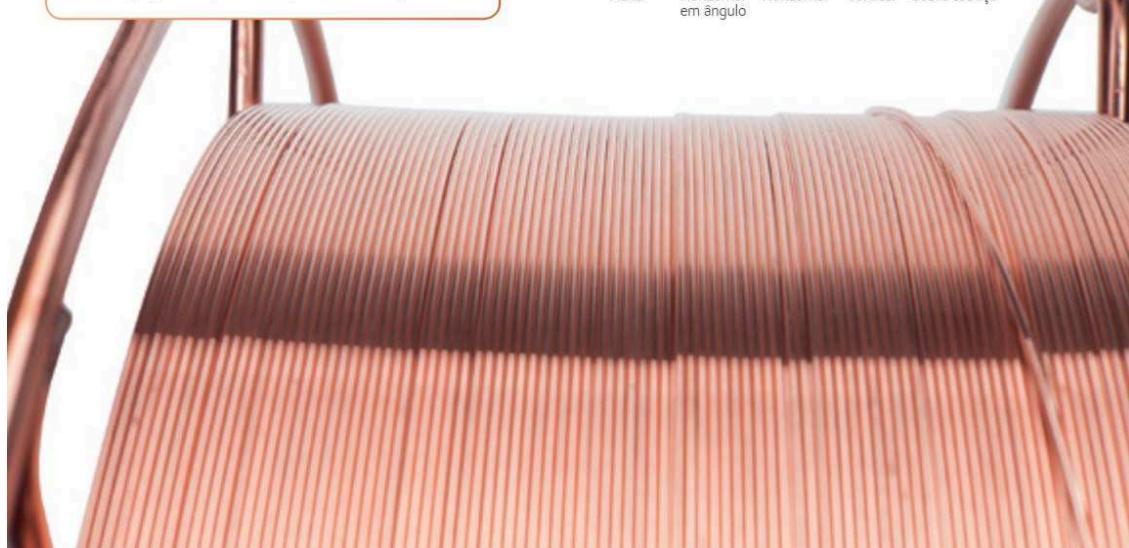


Figura D. 1 - Catalogo Gerdau - Arames para Soldagem MIG-MAG de Aços ao Carbono

Anexo E

Tabela E. 1 - Dados Técnicos da Fonte MTE/Digitec 300

Voltagem	220, 380 ou 440 trifásica
Tensão em vazio	64 V
Corrente	Contínua (Constante ou Pulsada)
Corrente Nominal	300 A
Dimensões	0,5 x 0,6 x 0,9 m
Peso	150 kg
Círculo de arrefecimento	3,5 litros de água destilada
Potência máxima consumida	12 kW
Fator de potência	0,94

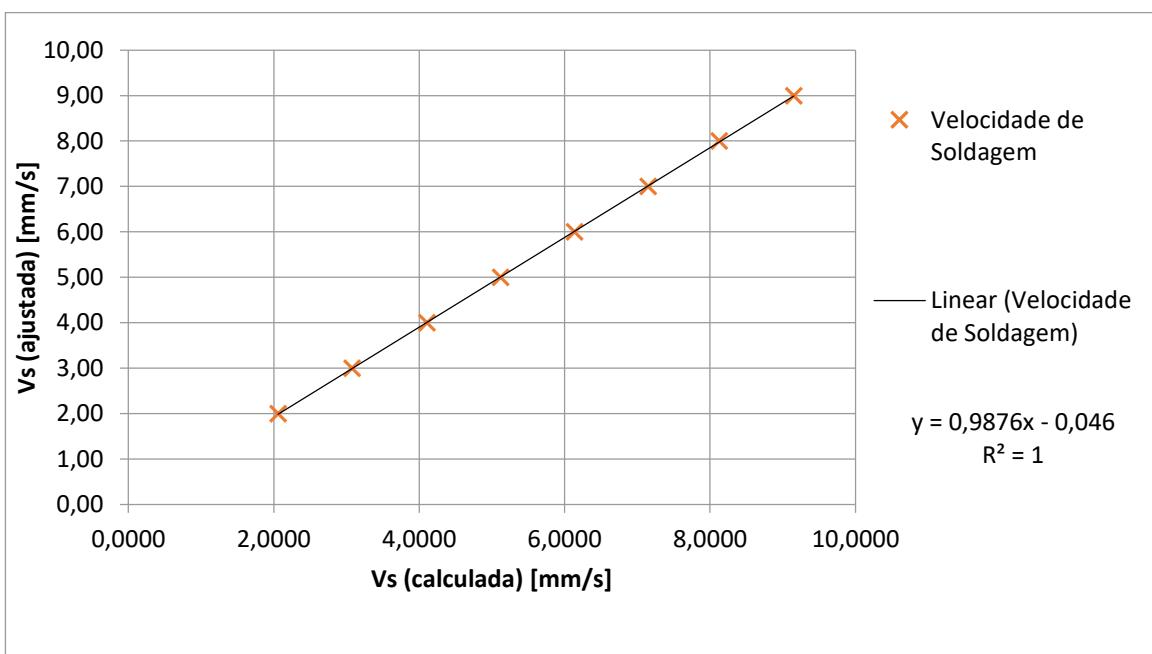


Figura E. 1 - Curva de calibração da mesa de movimentação da tocha

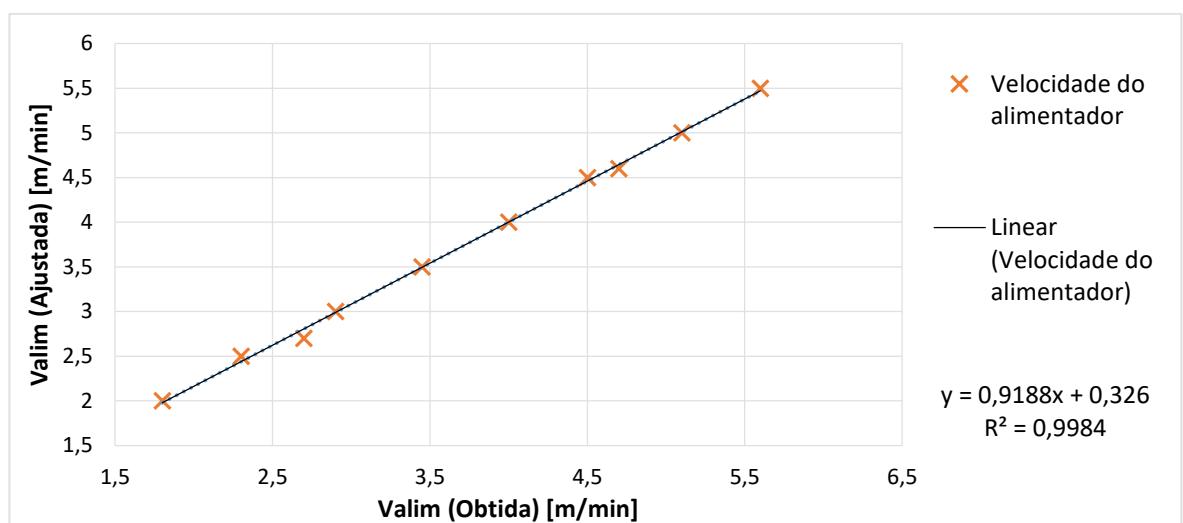


Figura E. 2 - Curva de calibração do sistema de alimentação do arame-eletrodo

CERTIFICATE OF CALIBRATION / CERTIFICADO DE CALIBRAGEM / CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN				
SERIAL NO. & CERTIFICATE NO. / NO. DE SÉRIE & NO. DO CERTIFICADO / NO. DE SERIE Y CERTIFICADO NO. :				
453846				
PART NO NO. DA PEÇA NO. DA PIEZA	SET TORQUE TORQUE NORMAL TORSIÓN	LOWER INFERIOR INFERIOR	UPPER SUPERIOR SUPERIOR	ACTUAL READING LEITURA REAL LECTURA REAL
	Nm	Nm	Nm	Nm
NTP-30N 96101	6 18 30	5.76 17.28 28.80	6.24 18.72 31.20	_____
NTP-110N 96203	19 68 110	18.24 65.28 105.6	19.76 70.72 114.40	_____
NTP-210N 96303	40 120 210	38.40 115.20 201.60	41.60 124.80 218.40	_____
NTP-350N 96304	70 210 350	67.20 201.60 336.00	72.80 218.40 364.00	_____
NTP-500N 96401	100 300 500	96.00 288.00 480.00	104.00 312.00 520.00	102.40 303.40 510.10
NTP-700N 96402	140 420 700	134.40 403.20 672.00	145.60 436.80 728.00	_____
NTP-980N	140 560 980	134.40 537.60 940.80	145.60 582.40 1019.20	_____

THIS TORQUE WRENCH IS ACCURATE TO $\pm 4\%$ THE OF SET LOAD AND HAS BEEN
MANUFACTURED AND TESTED ACCORDANCE WITH BSEN 26789: 1994, ISO 6789:2003 & DIN 3122.

ESTE TORQUÍMETRO É AJUSTADO A $\pm 4\%$ DA CARGA CONFIGURADA E FOI FABRICADO E
TESTADO DE ACORDO COM BSEN 26789: 1994, ISO 6789:2003, DIN 3122, ABNT NBR ISO 6789:2009.

ESTE TORQUÍMETRO ES PRECISO HASTA EL $\pm 4\%$ DE LA CARGA DETERMINADA Y HA
SIDO FABRICADA Y PROBADA CONFORME A BSEN 26789: 1994, ISO 6789:2003 Y DIN 3122.

TESTED BY/ TESTADO POR/ PROBADO POR : MALDEN

DATE/ DATA/ FECHA : DEC-25-2014

PLACE OF PURCHASE/ LOCAL DE COMPRA/ LUGAR DE COMPRA :

DATE OF PURCHASE/ DATA DE COMPRA/ FECHA DE COMPRA :

Figura E. 3 - Certificado de calibração do torquímetro Sata, modelo 96401 NTP-500N

Anexo F

Relatório de composição química das amostras



*Laboratório de Corrosão e Superfície
Gerência de Pesquisa*

Resultado de Ensaios e Testes

Ensaio: Análise Química Via -instrumental

Material: Carbono SAE 1045, acabamento esmerilhado

Solicitação: SS 18/063

Solicitante: Vitor **Área:** OPD

1	
Elemento	Valor
B	0,0002
Ca	0,0003
V	0,0006
Nb	0,0006
Ti	0,0015
Co	0,0022
Sn	0,0022
W	0,0042
S	0,0054
Cr	0,0079
Mo	0,0079
Ni	0,0128
P	0,0146
Cu	0,017
Al	0,0403
Si	0,152
C	0,4314
Mn	0,6264
N	136

2	
Elemento	Valor
B	0,0001
Ca	0,0003
V	0,0008
Nb	0,0008
Ti	0,0014
Sn	0,0015
Co	0,0023
W	0,0033
S	0,0052
Mo	0,01
Cu	0,0139
Ni	0,0151
P	0,016
Cr	0,0321
Al	0,0425
Si	0,1506
C	0,4333
Mn	0,6385
N	53

Anexo G

Tabela G. 1 - Resultados das medições de tensões residuais sem tratamento estatístico

Condição	Posição	Remoção	Distância do Centro [mm]	Antes de Soldar			Depois de Soldar / Travado			Depois de Soldar / Destravado		
				Tensão [MPa]	Desvio [MPa]	Erro [MPa]	Tensão [MPa]	Desvio [MPa]	Erro [MPa]	Tensão [MPa]	Desvio [MPa]	Erro [MPa]
45-Ø1,2-Tamb-C25-1	1.1	0,09	10	-220,2	29,7	42,4	126,3	25,4	19,7	98,1	25,5	18,3
45-Ø1,2-Tamb-C25-1	1.2	0,11	13	-261,2	32,0	17,1	70,7	23,8	13,3	85,9	23,9	15,9
45-Ø1,2-Tamb-C25-1	2.1	0,13	10	-180,9	29,9	39,0	91,6	24,0	12,5	91,9	22,4	32,8
45-Ø1,2-Tamb-C25-1	2.2	0,14	13	-127,8	30,6	32,0	63,4	22,9	19,1	61,2	22,8	15,2
45-Ø1,2-Tamb-C25-2	1.1	0,07	10	-20,6	26,6	14,4	33,2	25,9	35,7	11,2	23,7	35,1
45-Ø1,2-Tamb-C25-2	1.2	0,08	13	-46,6	29,2	9,9	16,6	22,9	7,7	15,5	25,2	31,8
45-Ø1,2-Tamb-C25-2	2.1	0,08	10	-80,9	34,9	18,0	48,6	25,3	24,4	21,2	24,7	24,6
45-Ø1,2-Tamb-C25-2	2.2	0,08	13	4,7	22,7	24,6	56,6	23,3	16,1	29,3	24,5	35,9
45-Ø1,0-T150-C25-2	1.1	0,07	10	-40,9	25,0	12,7	26,1	25,0	30,5	32,6	26,0	13,1
45-Ø1,0-T150-C25-2	1.2	0,06	13	-61,5	23,7	32,8	-27,2	25,1	26,7	-7,5	23,8	20,1
45-Ø1,0-T150-C25-2	2.1	0,06	10	-13,5	25,5	17,0	2,9	25,3	25,5	48,8	25,3	20,8
45-Ø1,0-T150-C25-2	2.2	0,05	13	-53,0	27,1	27,3	56,6	28,0	23,5	61,2	27,4	25,9
45-Ø1,0-T150-C25-1	1.1	0,06	10	5,8	25,2	19,8	36,3	26,6	31,9	60,3	25,5	23,0
45-Ø1,0-T150-C25-1	1.2	0,07	13	27,2	24,9	24,8	25,0	25,4	21,2	83,6	25,7	21,6

Condição	Posição	Remoção	Distância do Centro [mm]	Antes de Soldar			Depois de Soldar / Travado			Depois de Soldar / Destravado		
				Tensão [MPa]	Desvio [MPa]	Erro [MPa]	Tensão [MPa]	Desvio [MPa]	Erro [MPa]	Tensão [MPa]	Desvio [MPa]	Erro [MPa]
45-Ø1,0-T150-C25-1	2.1	0,06	10	-38,4	24,8	26,3	-6,3	25,8	32,6	-27,8	27,2	25,2
45-Ø1,0-T150-C25-1	2.2	0,08	13	-112,3	25,8	42,0	-19,2	26,7	15,7	13,6	26,1	22,9
45-Ø1,0-Tamb-C25-1	1.1	0,08	10	-80,2	27,0	33,4	59,4	24,1	34,9	50,9	26,3	26,3
45-Ø1,0-Tamb-C25-1	1.2	0,09	13	-10,7	25,4	25,2	53,2	22,8	28,8	66,5	23,7	38,7
45-Ø1,0-Tamb-C25-1	2.1	0,09	10	-72,2	24,4	21,4	81,8	28,2	32,2	49,3	25,8	39,9
45-Ø1,0-Tamb-C25-1	2.2	0,09	13	-30,3	24,7	19,6	40,2	23,1	21,4	39,7	24,4	18,9
45-Ø1,0-Tamb-C25-2	1.1	0,1	10	22,3	24,9	15,3	2,3	24,2	16,2	54,1	25,1	9,1
45-Ø1,0-Tamb-C25-2	1.2	0,11	13	-82,6	29,6	18,2	41,7	26,0	27,5	49,8	27,5	33,5
45-Ø1,0-Tamb-C25-2	2.1	0,05	10	-159,9	24,3	29,5	36,2	25,4	27,8	121,9	25,5	24,8
45-Ø1,0-Tamb-C25-2	2.2	0,08	13	-82,5	23,5	27,0	16,2	26,5	16,8	48,5	25,1	14,5
60-Ø1,0-Tamb-C25-1	1.1	0,07	10	-69,9	27,6	39,6	-8,6	25,2	15,6	49,9	24,5	34,1
60-Ø1,0-Tamb-C25-1	1.2	0,07	13	-77,1	26,1	41,4	15,6	25,5	24,5	70,4	26,7	34,9
60-Ø1,0-Tamb-C25-1	2.1	0,06	10	-14,0	25,4	25,9	42,6	25,6	14,8	63,3	23,8	20,3
60-Ø1,0-Tamb-C25-1	2.2	0,07	13	-84,9	27,0	49,5	8,7	25,0	34,3	37,7	25,7	23,5
60-Ø1,0-Tamb-C25-2	1.1	0,06	10	-68,2	28,4	29,3	36,6	28,2	41,3	57,4	27,0	22,7
60-Ø1,0-Tamb-C25-2	1.2	0,07	13	-46,0	29,0	35,7	-28,6	25,4	37,2	43,0	27,5	47,4

Condição	Posição	Remoção	Distância do Centro [mm]	Antes de Soldar			Depois de Soldar / Travado			Depois de Soldar / Destravado		
				Tensão [MPa]	Desvio [MPa]	Erro [MPa]	Tensão [MPa]	Desvio [MPa]	Erro [MPa]	Tensão [MPa]	Desvio [MPa]	Erro [MPa]
60-Ø1,0-Tamb-C25-2	2.1	0,07	10	-68,4	27,8	38,6	17,1	24,8	22,5	52,1	27,7	15,8
60-Ø1,0-Tamb-C25-2	2.2	0,07	13	-103,3	28,4	27,3	-4,1	27,7	28,1	41,2	27,7	40,3
45-Ø1,0-Tamb-CO2-2	1.1	0,22	10	-99,6	34,2	21,0	46,1	36,8	27,7	28,4	35,5	8,1
45-Ø1,0-Tamb-CO2-2	1.2	0,26	13	-135,2	40,2	35,7	34,3	38,2	38,1	27,9	37,6	33,9
45-Ø1,0-Tamb-CO2-2	2.1	0,21	10	-83,0	34,2	8,6	44,8	37,2	7,5	106,9	37,6	15,4
45-Ø1,0-Tamb-CO2-2	2.2	0,21	13	-77,9	32,4	7,0	44,1	32,7	35,8	32,1	38,5	12,1
45-Ø1,0-Tamb-CO2-4	1.1	0,06	10	-31,0	27,0	30,5	36,8	28,7	31,5	68,9	28,1	45,2
45-Ø1,0-Tamb-CO2-4	1.2	0,08	13	-14,3	26,5	30,8	38,3	27,8	24,6	64,8	29,5	26,8
45-Ø1,0-Tamb-CO2-4	2.1	0,05	10	-24,4	25,4	26,9	7,2	25,5	24,0	41,0	27,4	30,7
45-Ø1,0-Tamb-CO2-4	2.2	0,06	13	-66,4	26,4	17,2	24,6	26,7	20,8	44,4	26,1	34,4
45-Ø1,0-Tamb-CO2-3	1.1	0,14	10	-120,8	34,4	33,8	145,6	36,5	24,3	88,8	28,2	22,2
45-Ø1,0-Tamb-CO2-3	1.2	0,17	13	-188,1	31,1	19,3	49,8	32,4	37,9	66,2	37,5	16,9
45-Ø1,0-Tamb-CO2-3	2.1	0,14	10	-99,1	34,3	14,6	91,3	33,5	25,6	103,0	38,8	8,4
45-Ø1,0-Tamb-CO2-3	2.2	0,16	13	-91,1	33,6	4,9	79,6	32,1	5,4	64,0	37,1	0,5